

Original Research Paper

Study of rock geochemistry in the Moalleman epithermal gold deposit, (Semnan province), Iran

Abbas Saeedi¹ and Farajollah Fardoost*¹¹ Department of Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran**ARTICLE INFO***Article history:*

Received: 2025 May 27

Accepted: 2025 September 21

Available online: 2025 December 22

Keywords:

Moalleman deposit

Geochemistry

Epithermal gold

ABSTRACT

The Moalleman epithermal gold deposit is located 130 km southeast of Damghan, part of the Toroud-Chah Shirin volcanic-intrusive belt. The approximate reserve of this deposit is 4.2 million tons with an average grade of 1.1 grams per ton and is located in Eocene rocks such as tuff, sandy tuff, siltstone and marl. The east-west fault trend of the region separates this deposit from volcanic rocks and the dominant fault system is northeast-southwest. Mineralization occurs in 2 types of hypogene (chalcopyrite, magnetite, pyrite) and supergene (chalcocite, covellite) and is accompanied by different alterations such as silicic and propylitic alterations. The origin of mineralization is the intrusion of semi-deep magmatic masses along the faults. Geochemical compositions indicate that the rocks of the region are basic to intermediate in composition and include dacite, rhyolite, basalt, and andesite. Based on geological, mineralogical, and geochemical characteristics, the Moalleman area is classified as an epithermal deposit.

1. Introduction

The Moalleman deposit is part of the Toroud -Chah Shirin volcanic-intrusive belt, which was formed in a complex tectonomagmatic environment in Iran. These deposits are considered to be among the most important gold resources in the world and are closely related to magmatic activities and hydrothermal fluids. They are formed in active tectonic environments and volcanic belts. Geochemical studies play a fundamental role in understanding the formation processes, the origin and movement of fluids, and

ultimately the deposition of gold. These studies include isotopic analyses (such as sulfur, oxygen, hydrogen, and heavier isotopes) and thermobarometric analyses (to determine the temperature of mineral formation and ambient pressure). This information is crucial for reconstructing the geological conditions governing the formation of the deposit and determining the origin of the gold.

The Moalleman gold deposit, located 130 km southeast of Damghan, is recognized as one of the most important potential

* Corresponding author: Farajollah Fardoost; E-mail: faraj_fardoost@yahoo.com

Citation:

Saeedi, A., and Fardoost, F., 2025. Study of rock geochemistry in the Moalleman epithermal gold deposit, (Semnan province), Iran. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 35(4), 138, 19-34. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.526530.2202>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2025.526530.2202

 dor: 20.1001.1.10237429.1404.35.4.2.9



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

epithermal gold deposits in Iran. The development of this deposit in a complex geological environment with unique characteristics doubles the importance of its detailed geochemical investigation. The aim of this study is to investigate the geochemical characteristics of the Moalleman deposit to better understand the mineralization processes, the origin of the hydrothermal fluids associated with the deposit, and to provide an accurate and reliable geochemical model of the deposit formation. This model can greatly contribute to the prediction and exploration of similar gold deposits in similar structural areas. In addition, a detailed study of the geochemical characteristics will provide a better understanding of the tectonic and evolutionary processes of the region.

2. Research methodology

A geological study of the Moalleman gold mining area with the aim of identifying the rock units, their relationships, tectonics and their connection with mineralization will help determine the temporal and spatial location of mineralization. This area is located in the 1:250,000 Toroud and 1:100,000 Toroud geological sheets.

Volcanic Activities and Rock Units:

Geological studies show that during the Eocene, extensive volcanic activities occurred in the Toroud -Moalleman rift basin, leading to the formation of the Toroud -Chahshirin volcanic-sedimentary belt. This belt includes rock units ranging in age from the Paleozoic to the Cenozoic. However, the main focus of this study is on the Middle Eocene volcanic activities, which play an important role in the occurrence of gold mineralization in the study area.

Middle Eocene volcanic-sedimentary complex: This complex includes various types of volcanic rocks, ranging from basalt, andesitic-basalt, to andesite, respectively. Also, various pyroclastic rocks, such as tuff, lithic crystal tuff, and agglomerate, are present in this complex. It is important to note the microscopic and chemical characteristics of these rocks, such as texture, secondary mineral minerals, and chemical composition (SiO_2 , MgO , FeO , TiO_2 , etc.). The study of the extent and type of thermal and hydrothermal alterations in these rocks is of great importance in understanding the mineralization process. Given the importance of this complex, a more detailed study and description of the rocks in terms of texture, mineral composition, and chemical properties is necessary.

Pyroclastic-sedimentary complex: includes tuff, tuffite, sandy tuff, tuff sandstone, siltstone, shale, and marl separated from the underlying volcanic complex by the Moalleman fault. This fault has a northeast-southwest to east-west trend with a near-vertical dip to the southeast.

Semi-deep intrusive masses: Acidic intrusive domes with a composition of dacite and rhyolite that have intruded the tuffs and probably belong to the Oligo-Miocene or Mio-Pliocene.

Plate dikes: Rhyodacite dikes with a northeast-southwest trend that have formed within the kaolinite section. Mineralization in surface outcrops is limited to the margins of the dikes, and the oxidant zone in the surface horizons has been formed under the influence of the dikes. Sometimes rhyolitic lavas have intruded along the tuff bed as rhyolitic floods, forming shear structures in dikes.

Recent (Quaternary) sediments: Young, discontinuous alluviums formed by the physical and chemical weathering of rocks exposed upstream. These sediments lack cement and are similar to the upstream rocks.

3. Results

A study of the tectonics of the area, including identification of faults, folds, and geological structures in the area, and their relationship to mineralization is essential. A detailed description of the temporal and spatial relationships between volcanic activity, alteration, and mineralization should be provided.

Relationship to mineralization:

In this section, the possible relationship between rock units, volcanic activity, alteration, and gold mineralization is examined. Depending on the type of mineralization (e.g. hydrothermal mineralization), it is necessary to investigate the related mineralization models.

In this study, a set of microscopic and laboratory methods were used at Shahrood University of Technology to investigate the mineralogy and petrological characteristics of the deposit under study. These methods include the preparation and examination of 50 thin sections, 50 thin-polished sections, and 30 polished sections for microscopic study, 7 samples of altered rocks for XRD analysis, and 7 samples of ore and host rocks for chemical analysis. Microscopic studies were conducted using a dual-purpose microscope. The results indicate the presence of primary sulfide minerals including chalcopyrite, galena, sphalerite, pyrite, and gold, and secondary minerals including malachite, azurite, smithsonite, cerussite, and iron oxides (hematite, goethite, and limonite) in the deposit. Barite, as the most abundant non-metallic mineral, is sometimes observed in the form of thick veins up to several tens of centimeters in the deposit. Argillic (or kaolinic) alteration is identified as the most widespread type of alteration within the deposit and its effects can be seen in the rocks.

4. Discussions

4.1. Geochemistry

According to geochemical data and diagrams, it is possible to analyze the behavior and distribution of major and minor elements and determine their role in the overall composition of magma and mineralization processes in the region. Pierce (1946) and Yermakian (1965) have highlighted the importance of interpreting

these data for a better understanding of the structure of the mineral and exploration processes). For detailed geochemical analysis and element distribution in the rocks of the region, 7 samples for chemical analysis by X-ray fluorescence (XRF), 7 samples for X-ray diffraction (XRD) and 7 samples for chemical analysis by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) were collected through field visits. After microscopic examination of the rock samples and precise determination of the type of minerals present (e.g., quartz, pyrite, gold, chalcopyrite, etc.) and texture of the rocks, the data obtained by various methods were analyzed. These analyses included drawing various geochemical diagrams, such as element distribution diagrams, distribution diagrams of minor elements relative to major elements, diagenetic diagrams and isotopic diagrams (if available). Also, comparison of the distribution of elements in mineralized rocks with host rocks was carried out to detect any specific patterns and analyze the mineralization processes and the influence of hydrothermal fluids on the chemical composition of the rocks. In order to interpret the results obtained, existing geochemical models for similar deposits in the region and elsewhere in the world were used. Comparing the chemical composition of mineralized rocks with host rocks and also with the parent magma (if possible) helps to identify the origin of hydrothermal fluids and their transport routes. Providing this information, along with field geological information and structural studies of the region, will greatly help to reconstruct the mineralization processes and determine the exploration potential in the region. For example, the specific distribution of elements such as gold, sulfur, lead, zinc and rare metal elements can show evidence of the presence and movement of hydrothermal fluids and mineralization processes. The results of these studies, along with other geological information, will be used in modeling the Moalleman deposit, determining the origin of fluids and their

transport routes, and ultimately predicting the exploration potential of the region.

5. Conclusion

Despite its very low abundance in the Earth's crust (0.0007 to 0.0011%), gold has great economic and cultural importance due to its unique physical and chemical properties. Its bright yellow color, flexibility, malleability, and resistance to corrosion are among the important features of this metal that have been noted throughout human history. Gold is located in group 11 and period 6 of the periodic table and is known by the symbol Au and atomic number 79. Its atomic weight is 196.967 and its density is 19.32 g/cm³. Its high melting and boiling points (1065 and 2807 °C, respectively) and relatively low hardness (between 2 and 5.3 on the Mohs scale) indicate the stability and high malleability of this metal.

The concentration of gold in sedimentary rocks, especially placers (such as sands and black shales), is the most important method of its extraction. This concentration is the result of various geological processes that, over time, have separated gold particles from the parent rocks and concentrated them in sedimentary environments. Understanding these processes and recognizing the gold mineralization environments is the main key to the economic exploration and extraction of this valuable metal. Also, the order of metal displacement (Ag > Zn > Cu) in shale and quartzite environments provides important information about the chemical and geochemical processes involved in the formation of metal deposits. This information, along with field geological studies and geochemical data, helps us to identify and extract gold deposits. However, more research is still needed to better understand the mechanisms of gold mineralization and optimize exploration and extraction methods.

مطالعه ژئوشیمی سنگ در کانسار طلای اَپی‌ترمال معلمان (استان سمنان)، ایران

عباس سعیدی^۱ و فرج‌الله فردوست^{۱*}^۱ گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

کانسار طلای اَپی‌ترمال معلمان واقع در ۱۳۰ کیلومتری جنوب خاوری دامغان، بخشی از کمربند آتشفشانی-نفوذی طرود-چاه شیرین است. ذخیره تخمینی این کانسار ۴/۲ میلیون تن طلا با عیار متوسط ۱/۱ گرم در تن است و در سنگ‌های توفی، توف ماسه‌ای، سیلتستون و مارن با قدمت انوسن بالایی قرار دارد. یک پهنه گسلی خاوری-باختری، این کانسار را از سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری انوسن جدا می‌کند. سیستم گسلی چیره در منطقه دارای روند شمال خاوری-جنوب باختری است. کانی‌سازی به دو صورت درون‌زاد (hypogene) (کالکوپیریت، مگنتیت، پیریت و غیره) و برون‌زاد (Supergene) (کالکوسیت، کولیت و غیره) رخ داده و با دگرسانی‌های سیلیسی، پروپلیتیک و غیره همراه است. منشا کانی‌سازی، توده‌های نیمه‌ژرف ماگمایی نفوذ کرده در امتداد گسل‌ها هستند. نتایج ژئوشیمیایی نشان می‌دهند که سنگ‌های منطقه از نظر ترکیبات شیمیایی، بازیگ تا حد واسط و شامل داسیت، ریولیت، بازالت و آندزیت هستند. بر اساس ویژگی‌های کانی‌شناسی، زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی، محدوده معلمان در گروه ذخایر اَپی‌ترمال طبقه‌بندی می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:

کانسار معلمان

ژئوشیمی

طلای اَپی‌ترمال

۱- پیش‌نوشتار

ایران به دلیل پیشینه پیچیده زمین‌ساختی-ماگمایی خود در دوران‌های پالئوزویک و سنوزویک، محیط مناسبی برای تشکیل کانسارهای اَپی‌ترمال فراهم کرده است (Richards et al., 2006). کانسارهای طلای اَپی‌ترمال، که از مهم‌ترین منابع طلای جهان هستند، به دلیل ارتباط نزدیک با فعالیت‌های ماگمایی و سیالات گرمایی، همواره مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران بوده‌اند (Hedenquist et al., 2000). این کانسارها در محیط‌های زمین‌ساختی فعال، به‌ویژه در کمربندهای آتشفشانی و مناطق مرتبط با سامانه‌های زمین‌گرمایی شکل می‌گیرند و ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی منحصربه‌فردی دارند (White and Hedenquist, 1995). مطالعات ژئوشیمیایی نقش مهمی در درک فرایندهای تشکیل این کانسارها، تعیین منشا سیال‌های کانی‌ساز، شناسایی عوامل موثر در انتقال و رسوب‌گذاری طلا، و همچنین اکتشاف ذخایر جدید دارند (Simmons et al., 2005). بررسی ترکیب شیمیایی سنگ‌ها و کانی‌ها، مطالعات ایزوتوپی و دما-فشارسنجی (ترموبارومتري)، اطلاعات ارزشمندی را در مورد شرایط فیزیکی و شیمیایی حاکم بر سامانه‌های

اَپی‌ترمال ارائه می‌دهند. کانسار اَپی‌ترمال معلمان بخشی از کمربند آتشفشانی-نفوذی طرود-چاه شیرین است که در ۱۳۰ کیلومتری جنوب خاور دامغان و ۱۵ کیلومتری جاده معلمان به طرود و در نزدیکی روستای سطوه واقع شده است (شکل‌های ۱ و ۲) و یکی از پتانسیل‌های مهم طلای اَپی‌ترمال در کشور به‌شمار می‌رود. این کانسار در یک محیط زمین‌شناسی پیچیده شکل گرفته و شواهد نشان می‌دهند که فعالیت‌های ماگمایی و سیال‌های گرمایی نقش مهمی در تشکیل آن داشته‌اند. با این حال، تاکنون مطالعات جامعی در زمینه ژئوشیمی این کانسار انجام نشده است. هدف این پژوهش، بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی کانسار طلای معلمان به منظور درک بهتر فرایندهای کانی‌سازی، تعیین منشا سیال‌های کانی‌ساز و ارائه یک مدل ژئوشیمیایی برای تشکیل این کانسار است. در این راستا، نمونه‌های مختلفی از سنگ‌ها و کانی‌های موجود در کانسار مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفته و داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده از روش‌های مختلف تفسیر و تحلیل خواهند شد. نتایج این مطالعه می‌تواند به بهبود راهبردهای اکتشاف و ارزیابی پتانسیل معدنی منطقه کمک کند.

* نویسنده مسئول: فرج‌الله فردوست؛ E-mail: faraj_fardoost@yahoo.com

ماخذنگاری:

سعیدی، ع. و فردوست، ف.، ۱۴۰۴، مطالعه ژئوشیمی سنگ در کانسار طلای اَپی‌ترمال معلمان (استان سمنان)، ایران. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۵(۴)، ۱۳۸-۱۹. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.526530.2202>

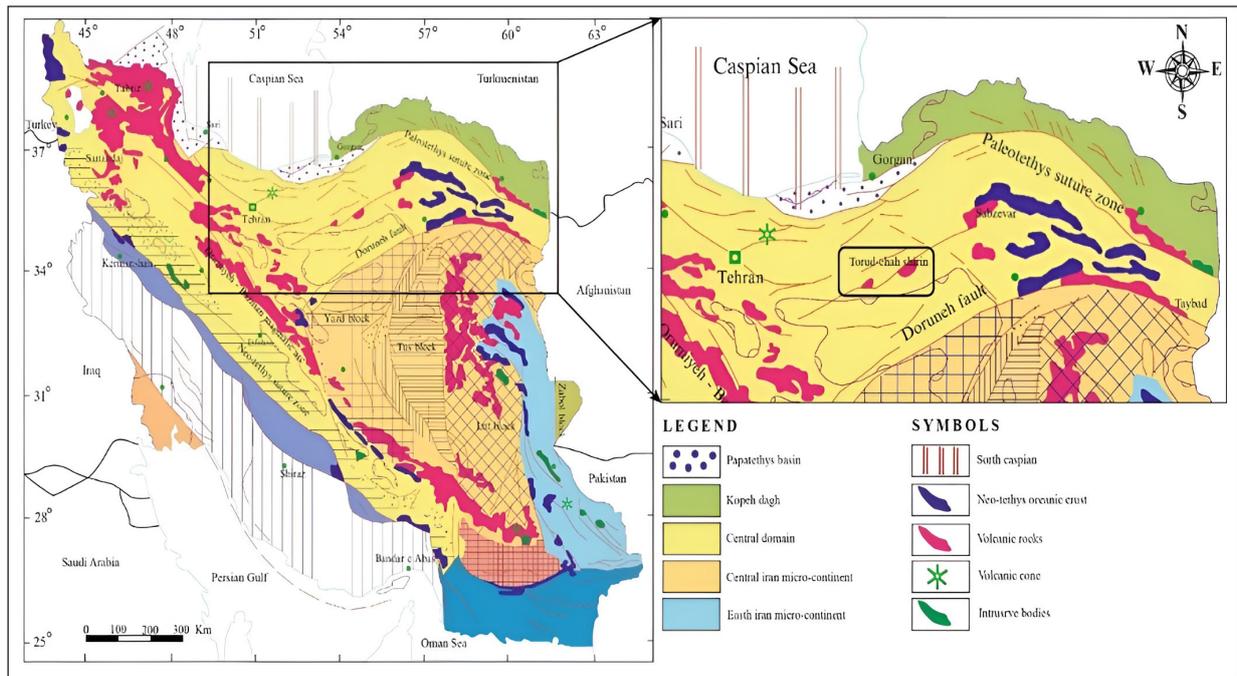
doi: 10.22071/gsj.2025.526530.2202



doi: 20.1001.1.10237429.1404.35.4.2.9

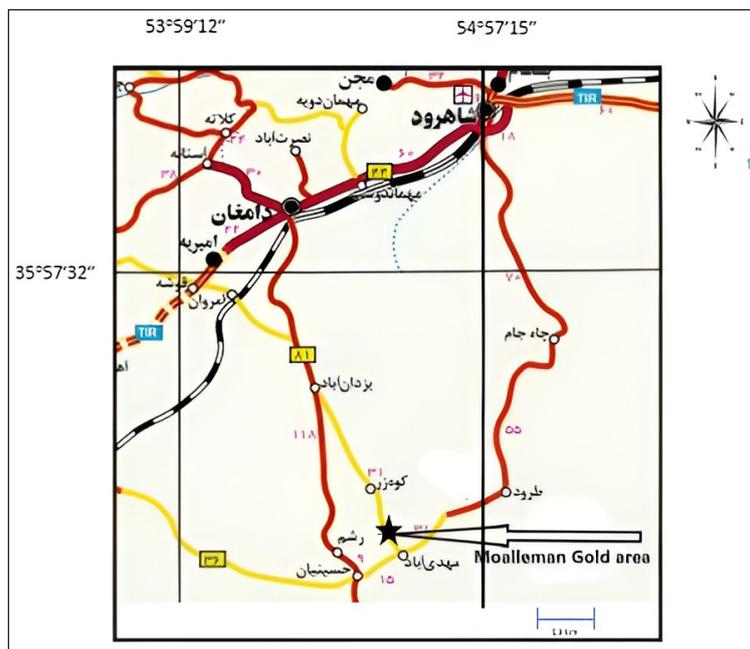
حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



شکل ۱- نقشه پهنه بندی ساختاری رسوبی ایران (آغانباتی، ۱۳۸۳) و موقعیت نوار آتشفشانی-رسوبی طرود - چاه شیرین بر روی آن.

Figure 1. Structural-sedimentary zoning map of Iran (Aghanabati, 2004) and the location of the Toroud-Chah-Shirin volcanic-sedimentary belt on it.



شکل ۲- موقعیت و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه.

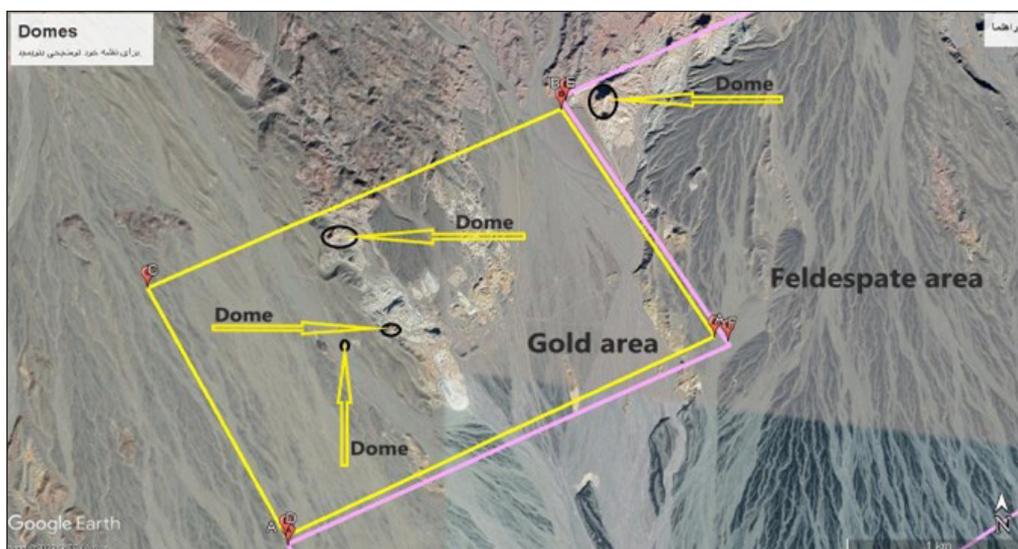
Figure 2. Location and access roads to the study area.

کلیات زمین‌شناسی شامل جایگاه ساختاری-رسوبی، سنی و سنگ‌شناختی برگرفته از اطلاعات نقشه‌های یاد شده می‌باشند. برای تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس بزرگ، افزون بر بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای، پیمایش صحرائی و نمونه‌برداری از واحدهای مختلف سنگی، ترانسه‌ها و سینه کارهای استخراجی (پیت‌ها) انجام گرفت. همانند سایر نقاط ایران، در دوره ائوسن در منطقه طرود-

هدف از بررسی زمین‌شناسی یک محدوده معدنی، مطالعه واحدهای سنگی، روابط آن‌ها، زمین‌ساخت و ارتباط هر یک از این پدیده‌ها با کانی‌سازی است. تحلیل این پدیده‌ها و ویژگی‌ها به شناخت موقعیت زمانی و مکانی کانی‌سازی و پی‌جویی آن در نقاط مشابه کمک زیادی خواهد کرد. محدوده طلای معلمان در ورقه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ طرود و ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان قرار دارد. بنابراین،

توف و آگلومرا با ترکیب شیمیایی مشابه گدازه‌ها، افزون بر ماسه‌سنگ و شیل، مهم‌ترین واحدهای سنگی دارای رخنمون در منطقه هستند. مجموعه آذرآواری-رسوبی شامل توف، توفیت، توف‌ماسه‌ای، ماسه‌سنگ توفی، سیلستون، شیل و مارن است. این واحدها از مجموعه آتشفشانی زیرین توسط یک مرز گسلی (احتمالا گسل معلمان) جدا می‌شوند. این گسل با روند کلی شمال‌خاوری- جنوب‌باختری تا خاوری-باختری و شیب نزدیک به قائم به سمت جنوب‌خاور تا جنوب امتداد دارد. روند عمومی این واحد شمال‌خاوری-جنوب‌باختری (N-50-E) با شیب کلی ۳۰ درجه به سمت جنوب‌خاور بر روی واحد آتشفشانی قرار گرفته است. گنبد‌های نفوذی اسیدی نیمه‌ژرف با ترکیب داسیت و ریولیت در بخش‌های مختلف محدوده دیده می‌شوند و در توف‌ها و توف‌ماسه‌های اتوسن نفوذ کرده‌اند. سن این گنبد‌ها جوان‌تر از توف‌ها و احتمالا به دوره الیگومیوسن یا میوپلیوسن تعلق دارند (باباخانی، ۱۳۸۶). در شکل ۳ بخش شمال‌باختر و شمال‌خاور محدوده، دو گنبد اسیدی به شکل برافراشته مشاهده می‌شود.

معلمان، در داخل یک حوضه کافتی (Rift) به طول تقریبی ۲۰۰ کیلومتر در راستای خاوری-باختری، فعالیت‌های آتشفشانی گسترده‌ای رخ داده است. حاصل این فعالیت، تشکیل نوار آتشفشانی-رسوبی طرود-چاه‌شیرین بوده که از ناحیه طرود تا چاه‌شیرین در جنوب‌خاور سمنان ادامه دارد. بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ طرود، ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان و ۱:۱۰۰۰۰۰ کلاته رشم، واحدهای سنگی در طول این نوار، محدوده سنی پالئوزویک تا سنوزویک را دربرمی‌گیرند. بر پایه مشاهدات صحرایی و آزمایشگاهی، واحدهای سنگی در محدوده طلای معلمان (با مقیاس‌های ۱:۵۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰) را می‌توان از نظر سنی و سنگ‌شناختی به ۵ گروه: ۱- مجموعه آتشفشانی-رسوبی با سن اتوسن میانی؛ ۲- مجموعه آذرآواری-رسوبی؛ ۳- توده‌های نفوذی نیمه‌ژرف؛ ۴- دایک‌های صفحه‌ای و ۵- رسوبات عهد حاضر (پوشاننده واحدهای قبلی) تقسیم کرد. مجموعه آتشفشانی-رسوبی اتوسن متشکل از گدازه‌های آتشفشانی با ترکیب سنگی بازالت، آندز-بازالت، آندزیت و سنگ‌های آذرآواری (پیروکلاستیک) از جمله توف، لیتیک کریستال



شکل ۳- موقعیت گنبد‌های نفوذی نیمه‌ژرف در محدوده طلا و فلدسپات معلمان بر روی تصویر ماهواره‌ای.

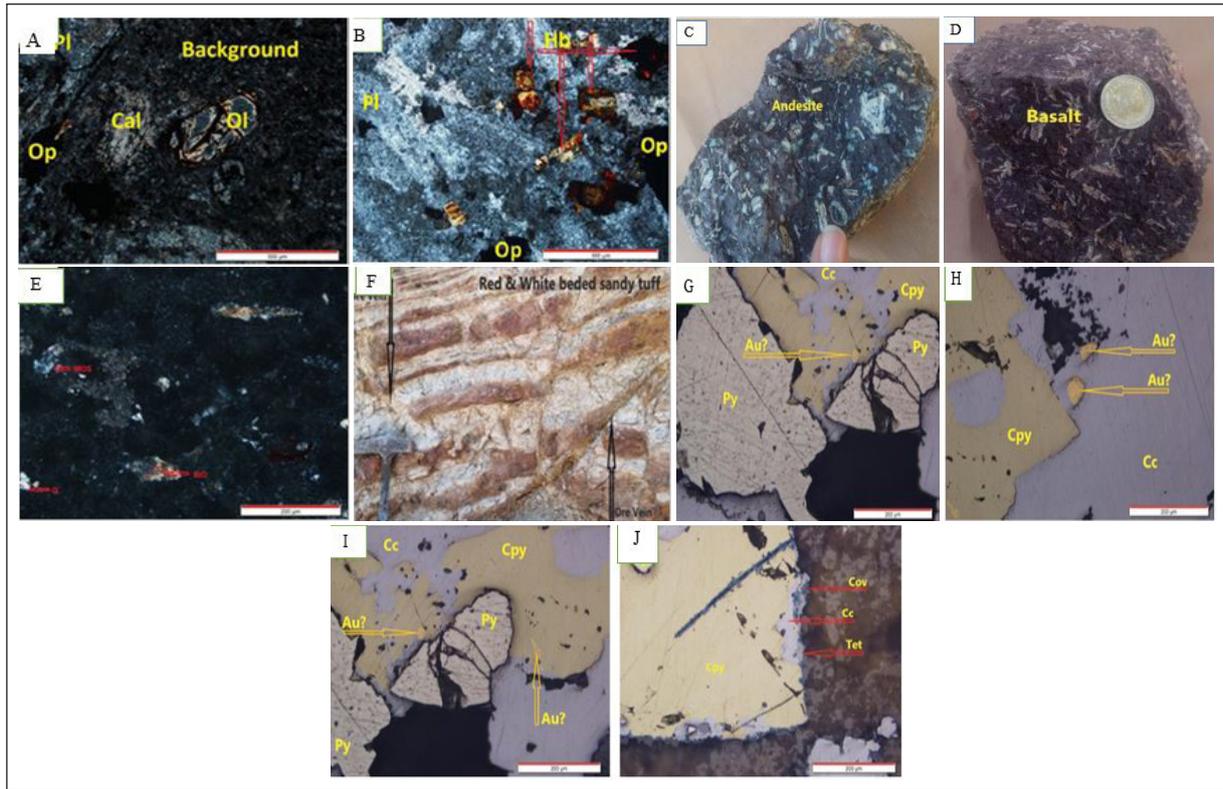
Figure 3. Location of semi-deep intrusive domes in the Moalleman gold and feldspar area on satellite images.

متغیرند و از محدوده رس تا قطعات با ابعاد چند ده سانتی‌متر را شامل می‌شوند.

۲- روش پژوهش

جهت انجام این پژوهش، پس از بازدید میدانی، عملیات صحرایی، و نمونه‌گیری، در مجموع، ۵۰ مقطع نازک، ۵۰ مقطع نازک-صیقلی و ۳۰ مقطع صیقلی آماده‌سازی شدند. همچنین، ۷ نمونه دگرسانی برای تحلیل‌های کانی‌شناسی به روش XRD و ۷ نمونه از کانسنگ و سنگ‌های میزبان برای تجزیه شیمیایی در نظر گرفته شدند. کلیه این نمونه‌ها با بهره‌گیری از میکروسکوپ دو منظوره در دانشگاه صنعتی شاهرود مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. در این مطالعه، کانی‌های سولفیدی اولیه شامل کالکوپیریت، گالن، اسفالریت، پیریت و طلای آزاد و کانی‌های ثانویه شامل مالاکیت، آزوریت، اسمیت‌زونیت، سروزیت و اکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت) در این کانسار یافت می‌شوند (شکل ۴). باریت به عنوان فراوان‌ترین کانی غیرفلزی، گاهی به شکل رگه‌های سبتر تا چند ده سانتی‌متری ظاهر می‌شود. دگرسانی آرژیلیتی یا کانولینی، گسترده‌ترین نوع دگرسانی در محدوده کانسار است و آثاری از دگرسانی سیلیسی، کربناتی، کلریتی و اکسیدهای آهن نیز در این منطقه مشاهده می‌شوند.

بخشی از فعالیت ماگمایی در اطراف توده‌های نفوذی به صورت دایک‌های متعدد ظاهر شده‌اند. دایک‌های روداسیتی با سبترهای متغیر از چند سانتی‌متر تا چند متر، با روند عمومی شمال‌خاوری-جنوب‌باختری در داخل بخش کانولینی شکل گرفته‌اند. بخش عمده کانی‌سازی در رخنمون‌های سطحی به حاشیه دایک‌ها محدود می‌شود. پهنه اکسیدان در افق‌های سطحی تحت تاثیر دایک‌ها و سیال‌های کانه‌دار مرتبط با آن‌ها شکل گرفته و در این محدوده به عنوان کلید اکتشافی مورد استفاده قرار می‌گیرد. گدازه‌های ریولیتی در امتداد لایه‌بندی توف‌های کانولینی نفوذ کرده و به صورت سیل‌های ریولیتی ظاهر می‌شوند. تحت تاثیر سیال کانه‌دار و مواد فرار، حالت انفجاری رخ داده و ساخت‌های برشی در دایک‌ها ایجاد شده است. رسوبات کواترنری شامل آبرفت‌های جوان و متفصل هستند که از تخریب فیزیکی و شیمیایی سنگ‌های رخنمون یافته در بالادست و انتقال قطعات آزاد شده توسط جریان آب‌های سطحی یا به صورت نقلی به مناطق پایین دست به وجود آمده‌اند. به دلیل جوان بودن و عدم مدفون شدن، این رسوبات فاقد سیمان هستند و قطعات سازنده بدون چسبندگی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. از نظر ترکیب سنگ‌شناسی و شیمیایی، این رسوبات مشابه سنگ‌های بالادست هستند و از نظر ابعاد، بسته به مسافت حمل و نقل و مقاومت فیزیکی، بسیار



شکل ۴- نمونه‌هایی از مقاطع مورد بررسی.

Figure 4. Examples of the examined sections.

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- کانه‌زایی و دگرسانی

ماگمایی الیگومیوسن، شاهد گسترش کانه‌زایی بوده است. فعال شدن آب‌های زیرزمینی و جوی تحت تاثیر حرارت توده‌های نفوذی و ایجاد چرخه گرمایی در سنگ‌های آتشفشانی، به دگرسانی در سنگ‌های اطراف انجامیده است. دگرسانی (آلتراسیون) به کلیه تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی که تحت تاثیر آب‌های ماگمایی یا گرمایی در سنگ‌های اطراف ایجاد می‌شود، گفته می‌شود (علیرضایی، ۱۳۷۸).

عوامل کنترل‌کننده تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی عبارتند از: ترکیب شیمیایی محلول گرمایی یا ماگمایی؛ ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی سنگ‌های مسیر؛ دما، ژرفا، شرایط فوگاسیته اکسیژن و گوگرد، Eh، pH محلول.

گسترش و شدت دگرسانی به عوامل مختلفی مانند حجم محلول‌های گرمایی یا ماگمایی، میزان ساختمان‌های اولیه و ثانویه، واکنش‌پذیری سنگ‌ها، دما و فشار محلول بستگی دارد. دگرسانی در کانسارهای رگه‌ای محدود به رگه است، در حالی که در کانسارهای پورفیری منطقه‌ای گسترده را در برمی‌گیرد. دگرسانی‌ها بر اساس منشأ سیال‌ها به دو بخش اصلی تقسیم می‌شوند: درون‌زاد و برون‌زاد. دگرسانی درون‌زاد توسط سیال‌های گرمایی بالارونده ایجاد می‌شود، در حالی که دگرسانی برون‌زاد در نتیجه واکنش آب‌های فرورو با سنگ‌های مسیر شکل می‌گیرد (شهاب‌پور، ۱۳۹۰). از انواع دگرسانی‌های مهم می‌توان به دگرسانی پتاسیک، پروپیلیتیک، سربستییک، آرژیلیتیک، آلونیتی، گرازن، سیلیسی، زئولیتی، فنیتیک، کلریتی، تورمالینیزه و آلپیتی اشاره کرد (کریم‌پور، ۱۳۸۴). هر نوع دگرسانی با مجموعه کانیایی خاص، موقعیت خود نسبت به ماده معدنی و حضور یا عدم حضور کانه‌زایی مشخص می‌شود. دگرسانی‌ها به دلیل گسترش زیاد نسبت به نهشته معدنی، در اکتشاف اهمیت خاصی دارند. موثرترین عوامل در کنترل واکنش‌های دگرسانی عبارتند از: دما، فشار، ترکیب شیمیایی، رفتار دینامیکی سیال و واکنش‌پذیری سنگ درون‌گیر (McMillan and Panteleyev, 1988). شناسایی مناطق دگرسانی که به احتمال، از نظر

محدوده معدنی مورد مطالعه بخشی از نوار فلززایی طرود-چاه‌شیرین است که در انتهای شمالی پهنه ساختاری-رسوبی ایران مرکزی قرار دارد. این نوار میزان ذخایر معدنی گوناگونی مانند سرب و روی، مس، نقره و طلا است که نشان‌دهنده پتانسیل بالای کانه‌زایی و اهمیت اقتصادی آن می‌باشد. به دلیل فعالیت‌های گسلی عمده مانند گسل‌های انجیلو و طرود و سایر گسل‌های فرعی وابسته، منطقه به شدت گسله شده است. شواهد نشان می‌دهند که ارتباط نزدیکی میان کانه‌زایی‌های منطقه و این گسل‌ها و شکستگی‌ها وجود دارد. کانه‌زایی طلا به همراه سرب، روی و مس در این محدوده در مجموعه آذرآواری-رسوبی با ترکیب توف‌های داسیتی و ریولیتی دگرسان، به همراه رخنمون‌هایی از ماسه‌سنگ، سیلتستون، شیل، مارن و آهک به سن ائوسن رخ داده است که در جدول ۱ توالی پاراژنتیکی کانه‌زایی‌ها رسم شده است. به نظر می‌رسد که بین سازوکار ساختارهای گسلی، سنگ‌های دربرگیرنده و کانه‌زایی ارتباط آشکاری وجود دارد. بر اساس نظر هالدال (Haldar, 2012)، ساختارهای گسلی نقش حیاتی در کنترل سیال‌های گرمایی و تمرکز مواد معدنی در مکان‌های مناسب دارند. پیمایش‌های صحرائی و مطالعات نشان می‌دهند که کانه‌زایی طلا به همراه فلزات پایه در افق‌های بالاتر به صورت رگ‌های و رگه-رگچه‌ای و در ژرفاهای بیشتر به صورت دانه‌پراکنده در داخل توف‌های دگرسان و گدازه‌های اسیدی تشکیل شده است. ساختارهای گسلی، شکستگی‌ها و درزه‌ها، که بیشتر با روند شمال‌خاوری-جنوب‌باختری هستند، فضاهای لازم را برای ورود محلول‌های کانی‌ساز فراهم کرده‌اند و محل‌های مناسبی برای نفوذ و تجمع سیال‌های کانسار ساز به شمار می‌روند (Baker, 1978). تعدادی گسل به همراه شکستگی‌ها و درزه‌های فاقد کانه‌زایی نیز وجود دارند که به احتمال جوان‌تر از کانه‌زایی‌های اصلی هستند. محدوده طلای معلمان به دلیل فعالیت‌های آتشفشانی دوره ائوسن و فعالیت‌های

شامل آرژیلی، سربستی و پروپیلیتیک شناسایی گردید (شکل ۵؛ Noori, 2019). مطالعات صحرایی، حضور انواع دگرسانی‌های آرژیلی، کلریتی، سربستی، کربناتی، سیلیسی و اکسید آهن (هماتیت و لیمونیت) را نشان داد. در مقیاس میکروسکوپی، کانی‌های ثانویه شامل کلریت، سربست، کلسیت، گوتیت و لیمونیت شناسایی شدند که هر یک نمایانگر نوع خاصی از دگرسانی هستند. برخی کانی‌های رسی، معرف دگرسانی آرژیلی، به دلیل ابعاد میکروسکوپی قابل شناسایی با میکروسکوپ نبودند و برای شناسایی آن‌ها از پراش اشعه ایکس استفاده شد.

ژنتیکی مرتبط با ذخایر معدنی باشند، گام مهمی در پی‌جویی ذخایر است و موجب تسریع در اکتشاف و کاهش هزینه‌های اکتشافی می‌شود (Yousefzadeh, 2012).

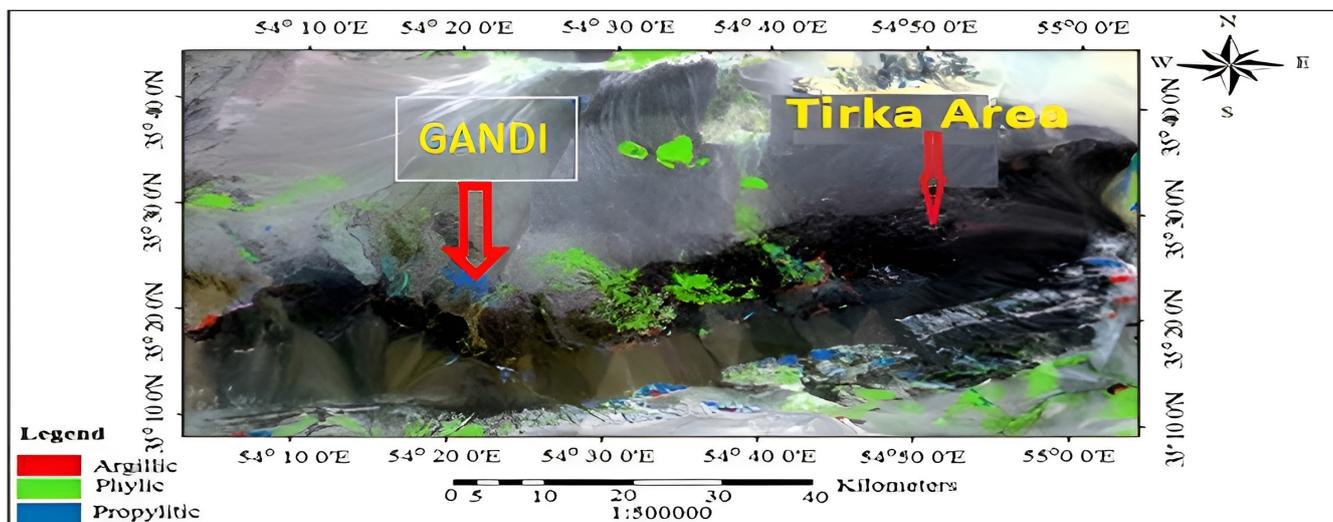
۳-۱-۱- شناسایی و توزیع دگرسانی‌ها در محدوده نوار طرود-چاه شیرین

مطالعه دگرسانی در محدوده نوار طرود-چاه شیرین در ۳ مقیاس دورسنجی، صحرایی و میکروسکوپی انجام شد. با استفاده از نقشه‌برداری زاویه‌های طیفی و تحلیل طیف‌سنجی نمونه‌ها در پس‌زمینه تصاویر RGB، سه نوع دگرسانی اصلی

جدول ۱- توالی پاراژنزی کانی‌سازی در محدوده خطوط سبتر نشان‌دهنده، کانی‌های اصلی و کانی‌های فرعی و خطوط نقطه‌چین، کانی‌های کمیاب می‌باشند.

Table 1. Paragenetic mineralization sequence. The thick lines indicate the main and minor minerals, and the dotted lines indicate the rare minerals.

	A	B
Chalcopyrite	-----	
Pyrite	-----	=====
Sphalerite		=====
Galena		=====
Gold		=====
Quartz	=====	
Calcite	=====	=====
Dolomite		=====

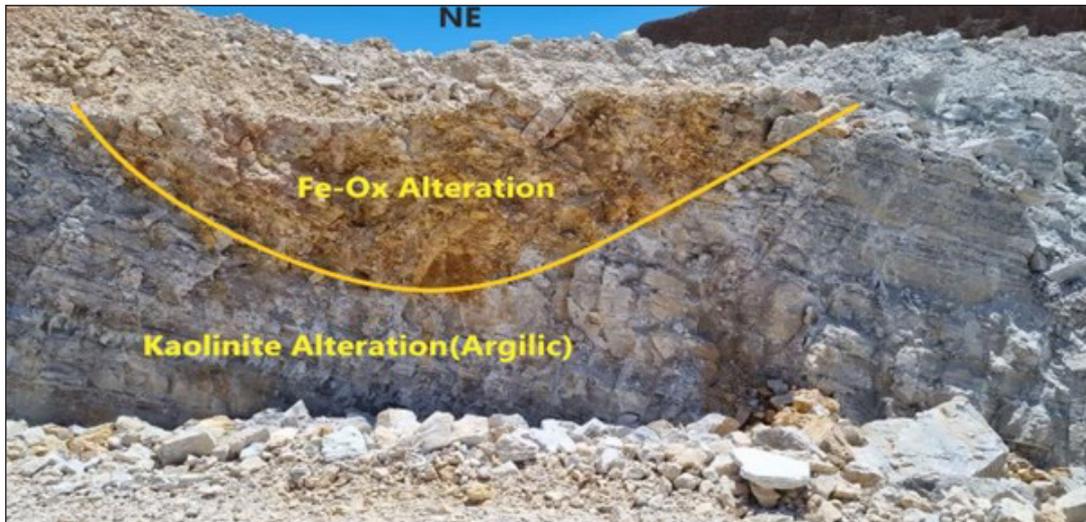


شکل ۵- نمایش دگرسانی‌های رشته‌کوه طرود-چاه شیرین به روش نقشه‌برداری زاویه طیفی با استفاده از طیف‌های حاصل از طیف‌سنجی نمونه‌ها، در زمینه‌ای از تصویر RGB=4,6,8 منطقه (Noori, 2019).

Figure 5. Display of the changes of the Toroud-Chah Shirin Mountain range using the spectral angle mapping method using spectra obtained from spectrometry of samples, in plots from the RGB=4,6,8 image of the region (Noori, 2019).

طلا، تحت تاثیر محلول‌های گرمابی و آب دریا به کائولینیت دگرسان شده‌اند و این گسترده‌ترین دگرسانی در محدوده مورد مطالعه است. افزون بر توف‌ها، توده‌های نفوذی و دایک‌های اسیدی ریوداسیتی نیز دچار دگرسانی سریسیتی و آرژیلی شده‌اند و گسترش کانی‌های رسی در منطقه به حدی است که می‌تواند به عنوان منبع معدنی کائولن مورد بهره‌برداری قرار گیرد (شکل ۶).

— **دگرسانی آرژیلی:** دگرسانی آرژیلی ناشی از هیدرولیز شدید کانی‌های سیلیکاته آلومینیم‌دار اولیه مانند فلدسپات آلکالن و پلاژیوکلاز در محیط‌های اسیدی است و به تشکیل کانی‌های رسی مانند دیکیت، کائولینیت و مونتموریونیت می‌انجامد (علیرضایی، ۱۳۷۸). این فرایند گاهی با حضور مقادیر جزئی کوارتز، سریسیت، کلسیت، ژپس و آلونیت همراه است. توف‌های ریولیتی و داسیتی میزبان کانسنگ



شکل ۶- تصویر دگرسانی کائولینیتی (آرژیلی) و اکسید آهن در محدوده مورد مطالعه.

Figure 6. Image of kaolinitic (argillaceous) and iron oxide alteration in the study area.

اطراف رگه‌های کانه‌دار و در امتداد گسل‌ها و شکستگی‌ها، گویای دگرسانی اکسید آهن هستند و به عنوان شاخص اکتشافی برای پی‌جویی رگه‌های کانه‌دار مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۶).

— **دگرسانی کلریتی:** این نوع دگرسانی با حضور کانی ثانویه کلریت و رنگ سبز مشخص می‌شود. تحت تاثیر محلول‌های گرمابی غنی از آهن و منیزیم، کانی‌های فرومنیزین به کلریت تبدیل می‌شوند (Corbett and Leach, 1998). دگرسانی کلریتی به‌طور عمده در دایک‌ها، سیل‌ها و گدازه‌های بازیک مشاهده می‌شود.

۳-۲- سنگ‌شناسی

سنگ‌شناسی یا پتروگرافی در محدوده مورد مطالعه بیشتر شامل توف‌ها و دایک‌ها می‌باشد که در ادامه به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

— **دگرسانی سریسیتی:** دگرسانی سریسیتی (فیلیک) ناشی از شستشوی سدیم، کلسیم و منیزیم از سنگ‌های سیلیکاته آلومینیم است. فلدسپات آلکالن و پلاژیوکلاز در حضور محلول‌های غنی از پتاسیم دگرسان می‌شوند. این دگرسانی، با گسترش متوسط در منطقه، بیشتر به رنگ خاکستری تا سفید دیده می‌شود.

— **واحد توف‌های داسیتی-ریولیتی:** این واحد به‌طور عمده از توف‌های داسیتی تا ریولیتی تشکیل شده است که در آن‌ها کانی اورتوکلاز به دلیل دگرسانی به کائولینیت تبدیل گردیده است. این مجموعه به‌صورت نسبتاً پیوسته و هم‌شیب بر روی واحدهای قدیمی‌تر قرار گرفته و روند عمومی آن شمال‌خاوری-جنوب‌باختری (N50E) با شیب متوسط حدود ۳۰ درجه به سمت جنوب‌خاوری می‌باشد. تغییرات امتداد و شیب لایه‌ها به‌طور عمده تحت تاثیر گسل‌های امتدادلغز فرعی مشاهده می‌شود. از نظر رنگ، لایه‌های سطحی این واحد به رنگ زرد آجری و قرمز و در ژرفاهای بیشتر به رنگ سفید و خاکستری دیده می‌شوند. کانه‌زایی اصلی درون همین واحد متمرکز است و رنگ‌های قرمز و زرد در بخش‌های بالایی، حاصل اکسیداسیون رگه‌های کانه‌دار می‌باشد. هماتیت، گوتیت و لیمونیت به‌عنوان محصولات تجزیه پیریت و کالکوپیریت، عامل ایجاد رنگ‌های زرد، قرمز و قهوه‌ای در شرایط اکسیدان هستند. افزون بر این، بخشی از رنگ قرمز-قهوه‌ای می‌تواند ناشی از حضور اسمیت‌زونیت به‌عنوان کانی ثانویه روی در محیط‌های اکسیدان باشد. ستبرای افق اکسیدان در این واحد بین چند ده سانتی‌متر تا حدود ۳۰ متر متغیر بوده و در مجاورت گسل‌های اصلی افزایش می‌یابد (شکل ۸).

— **دگرسانی سیلیسی:** دگرسانی سیلیسی ناشی از تمرکز و رسوب سیلیس آزاد حاصل از تجزیه کانی‌های سیلیکاته اولیه است و به شکل رگه‌ها و رگچه‌های کوارتز، کلسدونی، عقیق و ژاسپر مشاهده می‌شود. این دگرسانی به‌طور معمول در مناطق کانه‌زایی طلا وجود دارد و در محدوده مطالعاتی نیز آشکار است (شکل ۷).

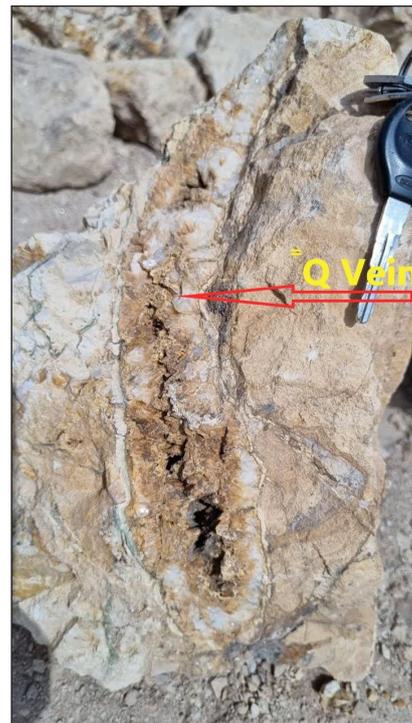
— **دگرسانی کربناتی:** دگرسانی کربناتی با حضور کانی‌های کلسیت، ژپس و دولومیت شناخته می‌شود و بیشتر به صورت رگه-رگچه‌ای در سنگ‌ها مشاهده می‌شود.

— **دگرسانی اکسید آهن:** گسترش اکسیدهای آهن در افق‌های سطحی کانسار شاخص است. کانی‌های سولفیدی مانند کالکوپیریت، بورنیت و پیریت در شرایط اکسیداسیون تجزیه شده و آهن آزاد شده به اکسیدهای آب‌دار و هیدروکسیدهای بی‌شکل (آمورف) آهن تبدیل می‌شود. رنگ‌های زرد، قرمز، قهوه‌ای و سیاه در



شکل ۸- تصویر صحرایی از افق اکسیدان به رنگ زرد، قرمز، قهوه‌ای و سیاه متشکل از اکسیدهای آهن و منگنز به همراه اسمیت‌زونیت و ژیپس

Figure 8. Field image of the oxidant horizon in yellow, red, brown and black colors consisting of iron and manganese oxides along with smithsonite and gypsum.



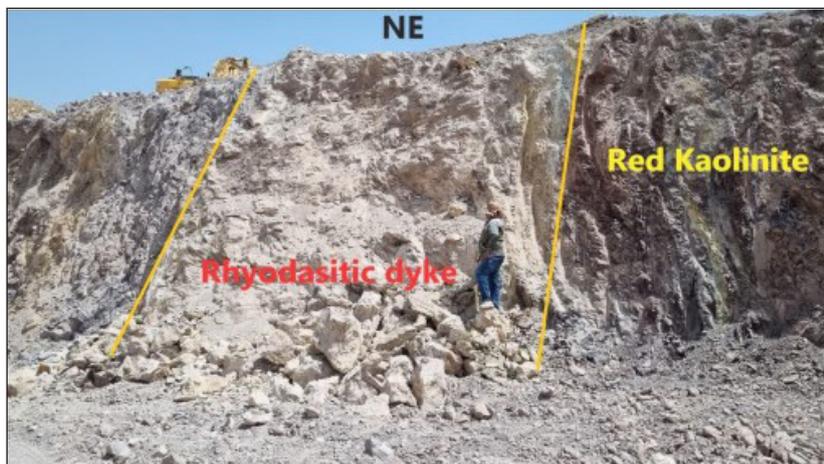
شکل ۷- تصویری از رگه کوارتز در محدوده مورد مطالعه.

Figure 7. Image of quartz vein in the study area.

رخمون‌های سطحی بیشتر در حاشیه این دایک‌ها متمرکز است. پهنه اکسیدان در افق‌های سطحی، تحت تاثیر دایک‌ها و سیال‌های کانه‌دار مرتبط با آن‌ها تشکیل شده و به‌عنوان شاخص اکتشافی مهم در نظر گرفته می‌شود. در برخی موارد، گدازه‌های ریولیتی در امتداد لایه‌بندی توف‌های کائولینیتی نفوذ کرده و به صورت سیل ظاهر شده‌اند. نفوذ سیال‌های کانه‌دار همراه با گازها و مواد فرار، سبب ایجاد حالت انفجاری در این دایک‌ها و شکل‌گیری بافت‌های برشی گردیده است. کانه‌زایی در اطراف و داخل دایک‌ها و سیل‌های ریوداسیتی به دو صورت اصلی مشاهده می‌شود: (۱) پرشدگی شکاف‌ها به شکل رگه و رگچه و (۲) پیدایش بافت دانه‌پراکنده و کانه‌زایی هم‌زاد (سین‌ژنتیک) در متن سنگ (شکل‌های ۹ و ۱۰).

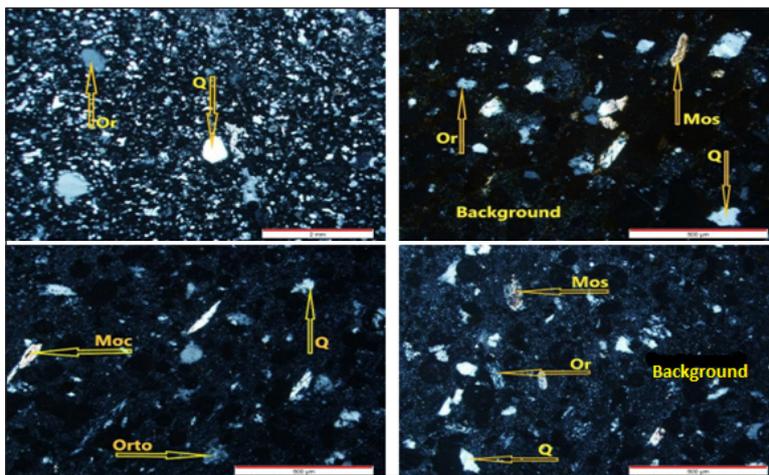
– **دایک‌های اسیدی و بازیک:** در محدوده مورد مطالعه، دایک‌های صفحه‌ای گوناگونی شناسایی شده‌اند که در امتداد نوار طرود-چاه‌شیرین گسترش دارند. این دایک‌ها به ۲ گروه اصلی تقسیم می‌شوند: (۱) دایک‌های اسیدی با ترکیب ریولیت و داسیت، و (۲) دایک‌های بازیک با ترکیب گابرو و بازالت.

– **دایک‌های اسیدی (ریوداسیتی-داسیتی):** بخشی از فعالیت ماگمایی در اطراف توده‌های نفوذی به صورت دایک‌های صفحه‌ای ظاهر شده است. دایک‌های ریوداسیتی با ستبرای متغیر از چند سانتی‌متر تا چند متر و با روند عمومی شمال‌خاوری – جنوب‌باختری، عمدتاً در بخش‌های کائولینیتی منطقه نفوذ کرده‌اند. کانه‌زایی در



شکل ۹- دایک ریوداسیتی به ستبرای حدود ۸ متر در دیواره خاوری، در داخل توف‌های کائولینی شده قرمز تا ارغوانی.

Figure 9. Rhyodacite dike about 8 meters thick on the eastern wall, within red to purple kaolinized tuffs.

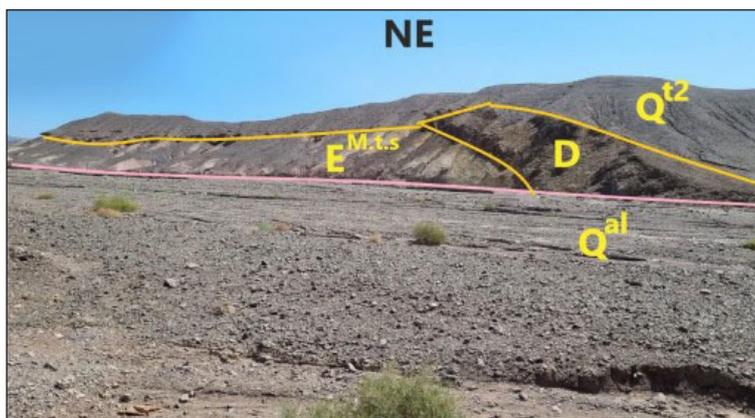


شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپی نمونه‌های ریولیتی مربوط به دایک‌های منطقه.

Figure 10. Microscopic image of rhyolite samples from the dykes in the region.

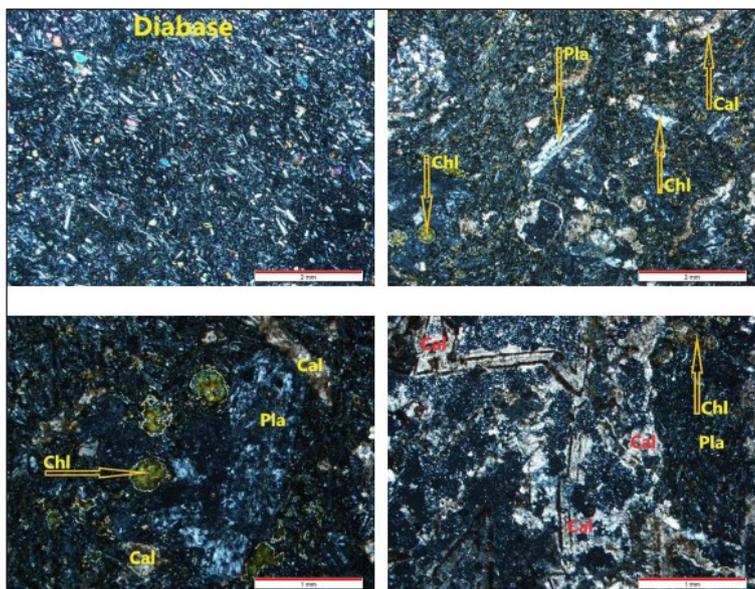
کانی‌های ثانویه‌ای مانند کلریت، کلسیت و کوارتز در نتیجه دگرسانی کانی‌های اولیه شکل گرفته‌اند. در برخی بخش‌ها، گدازه‌های بازیک به صورت هم‌شیب با لایه‌بندی مشاهده شده‌اند که به احتمال، بیانگر ماهیت گدازه‌های زیردریایی یا سیل می‌باشند. تصاویر صحرایی و مقاطع میکروسکوپی این دایک‌ها در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده‌اند.

– **دایک‌های بازیک (دیابازی):** دایک‌های با ترکیب بازیک در چند نقطه از محدوده مورد مطالعه رخمون دارند. این دایک‌ها عموماً به رنگ سبز تیره و با بافت آمیگدالوئیدی مشخص می‌شوند که در آن حفرات توسط کلریت، کلسیت و کوارتز پر شده‌اند. کانی‌های اولیه این سنگ شامل الیون، پلاژیوکلاز و پیروکسن بوده و



شکل ۱۱- تصویر صحرایی از دایک، سیل یا گدازه بازیک در بخش خاوری محدوده.

Figure 11. Field image of a dike, flood or basalt lava in the eastern part of the range.



شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های دایک، سیل یا گدازه بازیک رخمون یافته در داخل محدوده.

Figure 12. Microscopic images of dyke, flood or basic lava samples exposed within the area.

۴- بحث

۴-۱- ژئوشیمی

فرایندهای کانه‌زایی در منطقه مشخص کرد (Pierce, 1946). تفسیر این داده‌ها اهمیت زیادی دارد و می‌تواند به درک بهتر ساختار ماده معدنی و فرایندهای اکتشافی کمک شایانی نماید (Yermakian, 1965).

با توجه به داده‌های جدول ۲ و نمودارهای ژئوشیمیایی، می‌توان به تحلیل نحوه رفتار و توزیع عناصر اصلی و فرعی پرداخت و نقش آن‌ها را در ترکیب کلی ماگما و

جدول ۲ - آنالیزهای شیمیایی XRF-ICPMS.

Table 2. XRF and ICPMS chemical analyses.

Sample	MGD-1	MGD -2	MGD -3	MGD -4	MGD -5	MGD -6	MGD -7
ICP-MS							
Ag	<5	<5	<5	<5	<5	<5	6
Al	67450	60709	79258	80920	59867	142215	66754
As	103	48	71	36	134	18	287
Ba	1186	1004	3933	572	570	2269	4783
Be	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Bi	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Ca	26058	5875	17253	27389	160355	7477	15752
Cd	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Co	21	<5	<5	10	6	7	36
Cr	65	61	88	81	67	206	80
Cu	83	42	186	65	36	589	233
Fe	9355	4443	5005	34924	18429	4581	16518
Ga	13	10	12	17	12	22	13
K	14492	50795	29719	21932	4387	50539	13660
La	17	17	22	16	15	16	11
Li	68	40	62	39	45	100	64
Mg	7123	595	517	9467	6720	771	6432
Mn	1152	67	349	2089	1502	164	1530
Mo	9	<5	<5	<5	<5	7	<5
Na	3362	4795	3525	4195	3004	4865	3259
Ni	34	<5	<5	30	22	19	44
P	579	99	787	551	669	2085	647
Pb	220	218	62	112	89	800	868
S	3222	637	1193	556	8979	499	7965
Sb	17	438	27	<5	9	40	39
Sc	5	<5	<5	7	7	10	<5
Se	<5	<5	<5	<5	<5	6	<5
Sr	299	141	281	200	160	172	635
Ti	1298	544	2259	1249	1375	3900	479
V	42	6	38	73	57	210	46
Y	12	6	10	8	22	12	7
Zn	50	99	<5	58	39	2196	37
Zr	100	59	70	80	76	47	35
Rb	41.45	119.49	77.82	122.13	12.39	121.69	49.38
Nb	6.39	7.40	5.20	5.54	3.34	9.42	1.06
In	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Sn	1.46	1.50	1.22	1.41	1.04	0.92	0.94
Te	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cs	1.06	1.21	0.64	5.42	0.84	0.80	1.61
Ce	83.72	30.33	93.11	85.21	152.91	38.87	83.72
Pr	3.84	3.00	4.85	4.27	5.52	4.70	3.32
Nd	15.30	10.22	20.84	13.52	24.08	19.58	13.05

ادامه جدول ۲ - آنالیزهای شیمیایی XRF-ICPMS.

Continued from Table 2. XRF and ICPMS chemical analyses.

Sample	MGD-1	MGD -2	MGD -3	MGD -4	MGD -5	MGD -6	MGD -7
ICP-MS							
Sm	2.29	1.66	4.03	2.37	4.76	4.04	3.53
Eu	0.57	<0.5	1.15	<0.5	1.17	1.00	1.03
Gd	3.29	1.78	3.88	3.20	7.07	3.91	3.49
Tb	0.37	0.17	0.36	0.34	0.74	0.54	0.31
Dy	2.35	0.96	1.85	2.02	4.62	2.80	2.07
Ho	0.42	0.19	0.33	0.35	0.82	0.50	0.31
Er	1.71	0.65	1.42	1.01	3.56	1.60	1.48
Tm	0.18	0.12	0.12	0.13	0.21	0.20	<0.1
Yb	1.43	0.79	0.66	1.05	1.82	1.33	0.83
Lu	0.19	<0.1	<0.1	0.10	0.22	0.16	0.10
Hf	2.33	1.80	1.58	1.81	1.47	1.36	1.21
Ta	1.00	1.25	3.14	1.34	1.98	6.47	1.89
W	<1	4.62	1.74	<1	<1	1.32	<1
Th	5.78	7.25	2.77	5.07	2.07	1.66	2.94
U	7.20	1.39	0.98	1.74	0.71	0.81	0.83

Sample	MGD-1	MGD -2	MGD -3	MGD -4	MGD -5	MGD -6	MGD -7
XRF							
SrO	0.82	0.07	0.22	0.03	0.04	0.05	0.14
Fe₂O₃	1.56	5.35	8.42	0.70	0.67	7.72	1.06
MnO	0.18	0.40	0.84	< DL	0.07	0.54	0.03
CaO	2.43	20.01	3.12	0.51	2.60	5.03	1.15
K₂O	4.59	1.54	5.39	14.16	7.49	5.59	10.54
SO₃	0.50	0.62	0.94	0.04	0.08	0.07	0.10
P₂O₅	0.50	0.44	0.40	0.05	0.48	0.36	1.62
SiO₂	67.52	34.39	53.87	69.24	65.74	52.60	49.34
Al₂O₃	14.01	12.41	13.64	12.83	15.28	14.65	22.50
MgO	0.46	1.11	1.25	0.02	0.07	1.75	0.12
Na₂O	0.04	0.02	0.06	0.21	0.05	0.11	0.17
TiO₂	0.77	1.06	0.76	0.19	1.25	0.74	3.23
ZnO	0.01	0.01	0.01	< DL	< DL	0.02	0.73
Cl	0.02	0.02	0.12	0.14	0.03	0.20	0.41
PbO	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	0.42
BaO	< DL	< DL	1.40	0.04	0.16	< DL	0.27
ZrO₂	0.08	0.02	0.06	0.01	0.06	0.04	0.06
Rb₂O	0.01	< DL	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
CuO	0.01	0.01	0.03	0.06	0.01	0.01	0.34
Cr₂O₃	0.05	0.05	0.05	< DL	0.05	0.03	0.09
LOI	6.44	22.46	9.41	1.76	5.86	10.47	7.64

اکسیدهای اصلی و ICP-OES در تعیین ماهیت ژئوشیمیایی، جایگاه زمین ساختی و سری ماگمایی سنگ‌های میزبان استفاده شد. یکی از روش‌های مفید برای طبقه‌بندی سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری استفاده از نمودارهای قلیایی-سیلیس است. سیلیس به عنوان اکسید اصلی در سنگ‌های ماگمایی، نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های فیزیکی و ساختمانی مذاب دارد (یوسفی، ۱۳۹۶). همچنین مقادیر $Na_2O + K_2O$ در ترکیب با

برای درک بهتر فرایندهای کانه‌زایی و ویژگی‌های سنگ‌های منطقه، به منظور تحلیل دقیق ژئوشیمیایی و توزیع عناصر در سنگ‌ها، طی بازدیدهای صحرایی، اقدام به جمع‌آوری ۷ نمونه برای آنالیز شیمیایی به روش فلورسانس پرتو ایکس (XRF)، ۷ نمونه برای آنالیز شیمیایی به روش ICP-MS مورد مطالعه قرار گرفت. پس از مطالعه میکروسکوپی نمونه‌های سنگی و تعیین نام آن‌ها، نتایج آنالیز XRF برای بررسی

– **تفاوت بین دو نمودار TAS:** در نمودار ATS لو باس (Le Bas et al., 1986) نام‌گذاری دقیق‌تری برای سنگ‌ها وجود دارد و مرزهای بین فیله‌های مختلف (مانند بازالت قلیایی، تراکی-بازالت) آشکارتر است. همچنین، محدوده نمودار در محور SiO_2 گسترده‌تر است.

– **نمودار Nb/Y در برابر Zr/Ti:** این نمودار برای تشخیص نوع سنگ‌های آتشفشانی بر اساس عناصر کمیاب استفاده می‌شود. این نمودار به ویژه برای نمونه‌هایی که تغییرات ثانویه (مانند دگرسانی) داشته‌اند، مفید است، زیرا عناصر کمیاب نسبت به اکسیدها کمتر تحت تاثیر این تغییرات قرار می‌گیرند.

– **نمودار Nb/Y در برابر Zr/Ti:** نقاط سبز در این نمودار در محدوده بازالت قلیایی، آندزیت و تراکی آندزیت قرار می‌گیرند. نقاط قرمز در محدوده ریولیت/داسیت و تراکی قرار می‌گیرند، که با نتایج نمودارهای TAS همخوانی دارد.

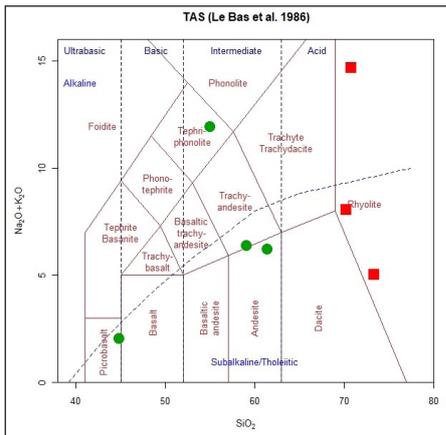
– **همخوانی بین نمودارها:** به طور کلی، نتایج حاصل از هر ۳ نمودار با یکدیگر همخوانی دارند. نمونه‌هایی که در نمودارهای TAS به عنوان سنگ‌های بازیک تا حدواسط شناسایی شده‌اند، در نمودار پیرس (Pearec, 1996) نیز در محدوده‌های مشابه قرار دارند. به همین ترتیب، نمونه‌های اسیدی در هر سه نمودار به درستی دسته‌بندی شده‌اند.

سیلیس، در تقسیم‌بندی سنگ‌های آذرین به دسته‌های ساب‌آلکالن و آلکالن بر اساس درجه اشباع‌شدگی از سیلیس، بسیار کاربردی هستند. مقدار SiO_2 و $Na_2O + K_2O$ معمولاً گویای مقدار و نوع کانی‌های فلیسیک در سنگ است (Middlemost, 1994).

بر اساس نمودار TAS، سنگ‌ها بر اساس مقدار سیلیس به گروه‌های فوق‌بازی، بازی، حدواسط و اسیدی تقسیم می‌شوند. استفاده از نمودارهای لو باس و همکاران (Le Bas et al., 1986) و کاکس و همکاران (Cox, 2013) که بر اساس درصد وزنی آلکالن ($Na_2O + K_2O$) در برابر درصد وزنی سیلیس (SiO_2) عمل می‌کند، نشان می‌دهد که سنگ‌های میزبان به‌طور عمده در محدوده آندزیت، آندزیت-بازالت، بازالت، ریولیتی، داسیتی و به میزان کمتر تراکی آندزیت قرار دارند.

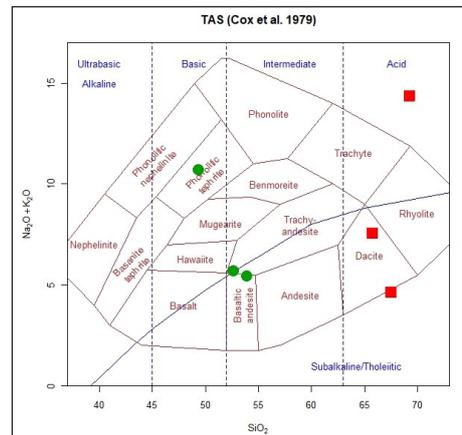
۲-۴- نام‌گذاری سنگ‌ها بر اساس نمودارها (Cox, 2013; Le Bas et al., 1986; Modified by Pearce, 1996)

شکل‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵ نشان‌دهنده نام‌های سنگ‌های محدوده مورد نظر می‌باشند. بر اساس این شکل‌ها، می‌توان این نمودارها را به این صورت تحلیل کرد: نمودارهای TAS از کاکس (Cox, 2013) و لو باس و همکاران (Le Bas et al., 1986) این نمودارها برای نام‌گذاری سنگ‌های آتشفشانی بر اساس محتوای اکسیدهای قلیایی ($Na_2O + K_2O$) و سیلیس (SiO_2) استفاده می‌شوند. نقاط سبز نشان‌دهنده سنگ‌های با ترکیب بازیک تا حدواسط (مانند بازالت، آندزیت)، نقاط قرمز نشان‌دهنده سنگ‌های با ترکیب اسیدی (مانند داسیت، ریولیت) هستند.



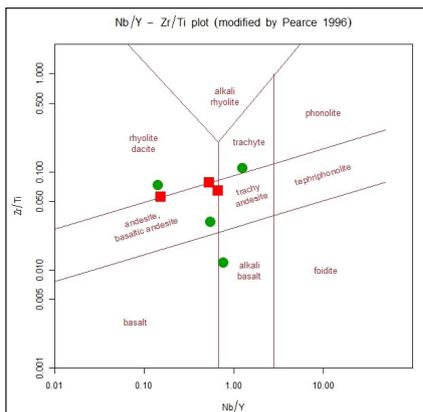
شکل ۱۴- نمودار TAS برای نام‌گذاری سنگ‌های محدوده مورد مطالعه (Le Bas et al., 1986).

Figure 14. TAS diagram for naming rocks in the study area (Le Bas et al., 1986).



شکل ۱۳- نمودار TAS برای نام‌گذاری سنگ‌های محدوده مورد مطالعه (Cox, 2013).

Figure 13. TAS diagram for naming rocks in the study area (Cox, 2013).



شکل ۱۵- نمودار Nb/Y در برابر Zr/Ti برای نام‌گذاری سنگ‌های محدوده مورد مطالعه (Modified by Pearce, 1996).

Figure 15. Nb/Y versus Zr/Ti diagram for naming rocks in the study area (Modified by Pearce, 1996).

۳-۴- ضریب همبستگی

می‌توان از سرب به عنوان یک نشانگر اکتشافی برای طلا در این منطقه بهره برد. عناصر مس (Cu) و نقره (Ag) در رتبه‌های بعدی اهمیت قرار دارند. این دو عنصر، همبستگی شایان توجهی با آرسنیک (As) در نمونه‌های برداشت شده از سطح زمین نشان می‌دهند و خود این عناصر (مس و نقره) نیز با یکدیگر، همبستگی به نسبت مطلوبی دارند. در نمونه‌های ژرفی، قوی‌ترین همبستگی بین عناصر سرب و روی (Zn) مشاهده می‌گردد؛ این الگو در نمونه‌های سطحی نیز دیده می‌شود، اما شدت آن کمتر است. ضریب همبستگی خطی، سنج‌ای از میزان گرایش دو متغیر به برقراری یک رابطه خطی است و ممکن است تمامی ابعاد همبستگی بین دو متغیر را منعکس نکند. بنابراین، برای تفسیر دقیق‌تر ضریب همبستگی، توصیه می‌شود که نمودار پراکنش مربوط به آن نیز مورد ارزیابی قرار گیرد که در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ قابل مشاهده می‌باشد.

در بررسی‌های ژئوشیمیایی، اندازه‌گیری همزمان چند عنصر در یک سری نمونه امری متداول است. در این نوع مطالعات، آگاهی از روابط و پیوندهای ژنتیکی بین عناصر گوناگون می‌تواند به درک دقیق‌تر دگرگونی‌های حاکم بر محیط‌های ژئوشیمیایی کمک شایانی نماید. افزون بر این، انباشت هم‌زاد برخی عناصر می‌تواند به عنوان یک شاخص راهنما در تشخیص نوع کانی‌سازی احتمالی موجود در منطقه مورد مطالعه به کار رود. همبستگی، نمایانگر میزان پیوستگی بین متغیرهای مختلف است. در ناحیه تحت بررسی، عنصر باریم (Ba) ارتباطی بسیار ناچیز یا منفی با سایر عناصر از خود نشان می‌دهد (جدول‌های ۳ و ۴). در مقابل، طلا (Au) در نمونه‌های سطحی و ژرفی، بیشترین میزان همبستگی را با عنصر سرب (Pb) داراست که این موضوع، گویای هم‌پوشانی مناسب این دو عنصر بوده و

جدول ۳- ضریب همبستگی عناصر ژرفی با هم.

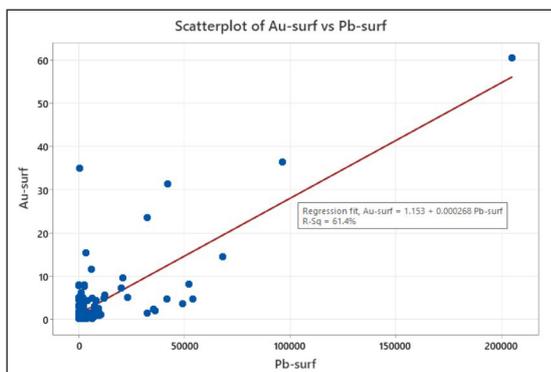
Table 3. Correlation coefficient of depth elements with each other.

	Au	Cu	Pb	Ag	Zn	Ba
Au	-					
Cu	0.21	-				
Pb	0.37	0.1	-			
Ag	0.23	0.36	0.1	-		
Zn	0.23	0.12	0.57	0.1	-	
Ba	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-

جدول ۴- ضریب همبستگی عناصر سطحی با هم.

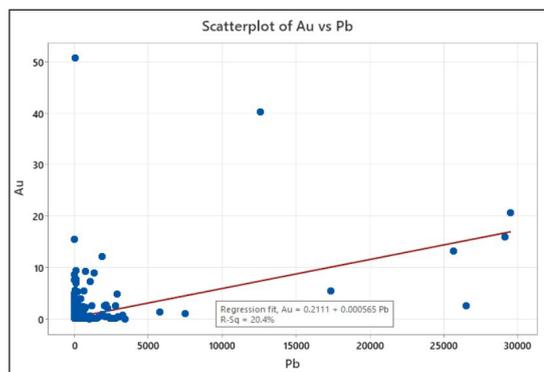
Table 4. Correlation coefficient of surface elements with each other.

	Au-surf	Cu-surf	Pb-surf	Ag-surf	Zn-surf	Ba-surf	As-surf
Au-surf	-						
Cu-surf	0.1	-					
Pb-surf	0.7	0.09	-				
Ag-surf	0.11	0.29	0.12	-			
Zn-surf	0.2	0.09	0.3	0.05	-		
Ba-surf	0.1	0.08	0.07	0.08	0.06	-	
As-surf	0.1	0.58	0	0.7	0.0	0.0	-



شکل ۱۷- نمودار پراکنش عناصر طلا و سرب در نمونه‌های خام سطحی.

Figure 17. Distribution diagram of gold and lead elements in surface raw samples.



شکل ۱۶- نمودار پراکنش عناصر طلا و سرب در نمونه‌های خام ژرفی.

Figure 16. Distribution diagram of gold and lead elements in deep raw samples.

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف بررسی جامع و سامان‌مند ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌شناسی، دگرسانی و ژئوشیمی کانسار طلای اپی‌ترمال معلمان در کمر بند آتشفشانی-رسوبی طرود-چاه‌شیرین انجام شد. داده‌های میدانی و نمونه‌برداری‌های انجام شده نشان داد که محدوده مورد مطالعه تحت تاثیر فرایندهای زمین‌ساختی پیچیده قرار دارد و حضور گسل‌ها و شکستگی‌ها نقش کلیدی در هدایت سیال‌های گرمایی و تمرکز عناصر معدنی ایفا می‌کند. تحلیل سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی سنگ‌های میزبان، شامل بازالت، آندزیت، ریولیت و داسیت، نشان داد که دگرسانی‌های گرمایی شاخص، از جمله آرژیلی، سیلیسی و سربستی، به همراه تمرکز کانه‌های فلزات ارزشمند، بیانگر فعالیت‌های گرمایی با دمای متوسط تا پایین هستند. آنالیزهای ژئوشیمیایی عناصر اصلی و کمیاب، الگوهای پراکنش و همبستگی عناصر را آشکار ساخت و منشا گرمایی کانسار و ارتباط آن با فعالیت‌های ماگمایی منطقه‌ای را تایید کرد. همچنین، داده‌های

جمع‌آوری شده نشان دادند که ترکیب فرایندهای زمین‌ساختی و گرمایی، شرایط مناسبی برای تمرکز طلا و دیگر فلزات پایه ایجاد کرده است. مدل‌های مکان‌یابی و همپوشانی داده‌های زمین‌شناسی، دگرسانی و ژئوشیمی، شاخص‌های کلیدی اکتشافی را شناسایی کرده و چارچوبی علمی برای تعیین مناطق پتانسیل‌دار فراهم می‌کنند. به طور کلی، نتایج این پژوهش نه تنها به شناخت دقیق‌تر فرایندهای کانه‌زایی در پهنه‌های مشابه کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به توسعه راهبردهای اکتشافی هدفمند و بهینه‌سازی روش‌های استخراج و ارزیابی اقتصادی کانسارهای اپی‌ترمال در ایران و سایر مناطق مشابه بینجامد. همچنین، شناسایی روابط بین ویژگی‌های زمین‌ساختی، دگرسانی‌های گرمایی و الگوهای ژئوشیمیایی، ارزش علمی بالایی در مطالعات زمین‌شناسی کاربردی و مدل‌سازی کانسارها دارد و زمینه را برای تحقیقات تکمیلی در زمینه فرایندهای کانه‌زایی و طراحی مدل‌های پیش‌بینی فراهم می‌سازد.

کتابنگاری

- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
 باباخانی، ع.، ۱۳۸۶، گزارش پایان عملیات اکتشافی محدوده طلای معلمان.
 شهاب‌پور، ج.، ۱۳۹۰، زمین‌شناسی اقتصادی. انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان.
 علیرضایی، س.، ۱۳۷۸، زمین‌شناسی کانسارها. ترجمه کتاب زمین‌شناسی کانسارها گیلبرت و پارک، نشر دانش امروز، موسسه انتشارات امیر کبیر تهران.
 کریم‌پور، م.، سعادت س.، ۱۳۸۴، زمین‌شناسی اقتصادی کاربردی. انتشارات ارسلان، مشهد، صفحه ۵۵-۷۲.
 یوسفی، ف.، ۱۳۹۶، پروژنر و زمین‌شناسی ایزوتوبی سنگ‌های آذرین نفوذی، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.

References

- Aghabanati, A., 2004. *Geology of Iran. Geological and Mineral Exploration Organization of the Country. (In Persian)*.
- Alirezadeh, S., 1999. *Geology of Deposits, Translated from Guilbert and Park, (1999). Danesh Emroz Publishing House, Amir Kabir Publishing House, Tehran. (In Persian)*.
- Babakhani, A., 2007. *Report on the End of Exploration Operations of the Moalleman Gold Area. (In Persian)*.
- Baker, W., 1978. The role of humic acid in the transport of gold. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(6), 645-649. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90009-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90009-1).
- Corbett, G. J., and Leach, T. M., 1998. Southwest Pacific rim gold-copper systems: Structure, alteration, and mineralization. *Society of Economic Geologists, Special Publication 6*.
- Cox, K. G., 2013. *The Interpretation of Igneous Rocks. Springer Netherlands. https://books.google.com/books?id=OA3sCAAQAQBAJ*.
- Haldar, S. K., 2012. *Mineral Exploration: Principles and Applications. Newnes*.
- Hedenquist, J. W., Arribas, A., and Gonzalez-Urien, E., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. <https://doi.org/https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>.
- Karimpour, M., and Saadat, S., 2005. *Applied Economic Geology. Arsalan Publications, Mashhad, pp. 55-72. (In Persian)*.
- Le Bas, M., Le Maitre, R., Streckeisen, A., and Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, 27(3), 745-750. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>.
- Noori, L., Pour, A. B., Askari, G., Taghipour, N., Pradhan, B., Lee, C. W., and Honarmand, M., 2019. Comparison of different algorithms to map hydrothermal alteration zones using ASTER remote sensing data for polymetallic vein-type ore exploration: Toroud-Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran. *Remote Sensing*, 11(5), 495. <https://doi.org/10.3390/rs11050495>.
- McMillan, W., and Panteleyev, A., 1988. Porphyry copper deposits. *Ore deposit models. Geoscience Canada reprint series*, 3, 45-58.
- Middlemost, E. A., 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-science reviews*, 37(3-4), 215-224. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9).
- Pearce, J. A., 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams. In D. A. Wyman (Ed.), *Trace element geochemistry of volcanic rocks* (pp. 79-113). *Geological Association of Canada*.
- Pierce, W. H., 1946. "The distribution of trace elements in igneous rocks and their implications for ore deposits." *Economic Geology*, 41(4), 274-291.
- Richards, J. P., Wilkinson, D., and Ullrich, T., 2006. Geology of the Sari Gunay epithermal gold deposit, northwest Iran. *Economic geology*, 101(8), 1455-1496. <https://doi.org/https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.8.1455>.
- Shahabpour, J., 2011. *Economic Geology. Shahid Bahonar University of Kerman Publications. (In Persian)*.
- Simmons, S. F., White, N. C., and John, D. A., 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. <https://doi.org/https://doi.org/10.5382/AV100.16>.
- White, N. C., and Hedenquist, J. W., 1995. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG newsletter*(23), 1-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.5382/SEGnews.1995-23.fea>.
- Yermakian, J., 1965. "Fluid inclusion studies in the formation of hydrothermal ore deposits: Evidence from the Canadian Shield." *Journal of Geochemical Exploration*, 4(1), 27-41.
- Yousefi, F., 2017. *Petrogenesis and isotopic petrology of intrusive igneous rocks. Ph.D. thesis, Shahrood University of Technology. (In Persian)*.
- Yousefzadeh, S. M., 2012. "Fluid inclusion studies and their significance for understanding the formation of hydrothermal ore deposits in Iran." *Economic Geology*, 107(6), 1155-1170.