Scientific Quarterly Journal of Geosciences, Vol. 36, Issue 3, Serial No. 141, Autumn 2026, pp. 25-54
www.gsjournal.ir

Original Research Paper

Geology, mineralogy, geochemistry, and genesis of Mohammadabad titanium paleoplacer deposit, Sabzevar, NE Iran

Hossien Ebrahimi[1], Masood Alipour-Asll*[1], and Habibollah Ghasemi[1]

[1] Department of Petrology and Economic Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 2026 February 03
Accepted: 2026 July 22
Available online: 2026 September 23

Keywords:
Sandstone
Eocene
Titanomagnetite
Paleoplacer
Sabzevar

ABSTRACT

The Mohammadabad titanium paleoplacer deposit is located in the Sabzevar subzone, NE Iran, south of Sabzevar. This deposit occurs as a stratiform within the ore-bearing sandstone horizon of Middle-Late Eocene marly- conglomerate- limestone- sandstone sequences. The sandstones are lithic arkose and feldspathic litharenite, and were deposited in a medium- to high-energy depositional environment. The lithofacies are including gravelly and coarse-grained (Gmm and Gcm), sandy and medium-grained (Sh and Sr), clay and fine-grained (Fl). Oxide minerals form stratiform within the sandstone unit, and observed as stratiform, lenses, and disseminated forms. The thickness of ore-bearing horizons varies from a few mm, cm to beds exceeding 1 m thick. Oxide mineral assemblages comprise titanomagnetite, ilmenite, magnetite, and hematite, with titanomagnetite being the most abundant phase. Mineral chemistry of the oxide minerals yields TiO_2 in the range of 12.87–20.75 wt.% and Fe_2O_3 from 39.99–64.68 wt.%, values, which similar to titanomagnetite composition, and show that importance of Ti- and Fe mineralization in sandstones of southern Sabzevar. Comparison of the geochemical patterns of minor and trace elements in Ti- and Fe-bearing Eocene sandstones with the same patterns in the Late Cretaceous mafic-intermediate intrusions of the region, along with the presence of significant amounts of titanomagnetite and magnetite in the mineral composition of these igneous rocks, indicates that the Late Cretaceous monzogabbro, diorite, and monzodiorite intrusions, aged 100 to 75 million years ago, are the probable source rocks of the oxide minerals in the sandstones of southern Sabzevar. These intrusive rocks are outcropped in the form of stocks, dikes, and sill (mostly sill) within the Late Cretaceous volcanic-sedimentary sequences in the southern Sabzevar region. The Mohammadabad titanium deposit is a paleoplacer that originated from the weathering and erosion of Late Cretaceous uplifted and outcropped rocks, and was deposited in the shallow fluvial and coastal environments of the foreland of the Sabzevar ocean basin during the Middle-Late Eocene.

1. Introduction

Titanium (Ti) is found in the forms of ilmenite, titanomagnetite, rutile, anatase, brookite, sphene, leucoxene, and Ti-bearing augite in the rocks of the earth's crust. Among, ilmenite and rutile are economically valuable. The crustal abundance of Ti is 5600

* Corresponding author: Masood Alipour-Asll; E-mail: masoodalipour@shahroodut.ac.ir

Citation:

Ebrahimi, H., Alipour-Asll, M., and Ghasemi, H., 2026. Geology, mineralogy, geochemistry, and genesis of Mohammadabad titanium paleoplacer deposit, Sabzevar, NE Iran. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 36(3), 141, 25-54. https://doi.org/10.22071/gsj.2026.573793.2244.

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

doi: 10.22071/gsj.2026.573793.2244 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.3.2.4

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

ppm, and titanium ores with a grade of more than 5 wt. % TiO_2 are economically valuable. Titanium forms magmatic and placer deposits. Its magmatic ore deposits are found with ultramafic-mafic rocks such as peridotites, gabbro, anorthosite, basalt, and diorite. Placer titanium deposits also include coastal, fluvial, alluvial plains, and paleoplacer deposits (Ti-bearing sandstones and conglomerates) (El-Khalloufi et al., 2021). The Kahnuj Ti (S Kerman Province) and Qarah-Aghaj Ti deposits (NW Urmia) are among the famous titanium ores in Iran (Ghorbani, 2008). In addition, the Cretaceous and Cenozoic diorite, diorite-gabbroic, and gabbroic rocks, Cenozoic sandstones (Alaminia and Golghandashti, 2011; Naeimi, 2018; Amini and Anketell, 2015) and Quaternary alluvial deposits (Kowsari et al., 1987; Moghaddasi and Yazdi, 2016; Rahimsouri et al., 2017; Hajalilou et al., 2021) are potential to titanium mineralization in most parts of Iran, especially in the West Azerbaijan, East Azerbaijan, Kurdistan, Semnan, Sistan and Baluchestan, Kerman, Yazd and Khorasan Razavi Provinces. The Mohammadabad titanium deposit is located in NE Iran, 75 km south of Sabzevar and adjacent to the Mohammadabad village (Figs. 1-a and b). A review of previous studies shows that this works was exploratory and not studied from an economic geology perspective. In this study, the Mohammadabad deposit was studied from the aspects of geology, petrology, mineralogy and geochemistry, and based on the results obtained from these studies, a model for its occurrence was presented. The achievements of this study will be of great help for continuing exploration operations and optimizing exploration, ore dressing, and mineral processing activities in this area.

2. Research methodology

In this study, field works has been done for geological surveys and sampling for petrological, mineralogy and geochemical studies on Ti- and Fe-bearing rocks and their associated rocks in surface outcrops and exploration trenches. The number of 20 thin, 25 thin-polished, and 10 polished sections of rocks and ores were prepared and microscopic petrographic and mineralogy studies were carried out on these samples. Mineralogy was carried out using X-ray diffraction (XRD) on 5 Ti- and Fe- rich ore samples at the Zarazma laboratory in Tehran. Four samples of Ti- and Fe-bearing sandstones were analyzed for major oxides, minor, trace, and rare earth elements using an inductively coupled plasma-optical emission and mass spectrometers (ICP-OES/MS) at the Zarazma laboratory in Tehran. Five thin-section and polished samples of Ti- and Fe-bearing sandstones, diorite and gabbro rocks were analyzed to study the chemistry of oxide minerals (titanomagnetite, ilmenite, magnetite and hematite) using an energy selective electron microanalysis (EPMA-EDS) device manufactured by Zeiss, Germany, Sigma 300-HV model, in the SEM laboratory of Shahrood University of Technology.

3. Results

3.1. Geology

In the Mohammadabad titanium area, Eocene sedimentary deposits are important for their titanium and iron oxide minerals rich horizons. Eocene rock units consist of thick layers of sandstone, marl, conglomerate, and limestone. This units mostly have a normal and continuous boundary, but in some places, local unconformity surfaces are observed at their boundaries, indicating the occurrences of later Alpine orogenic phases (Pyrenean and Pasadenian). Sandstone horizons in the marly-conglomerate-limestone-sandstone unit (Em,c,l,s) have economic concentrations of iron-titanium minerals. The color of the sandstone horizons varies from gray, greenish gray, dark gray to light gray. The sandstone layers thickness in the sedimentary sequences varies from about 0.5 to more than 10 m. Field observations show that iron-titanium minerals are mostly concentrated as stratiform in the sandstone horizons. Within the sandstone layers, iron-titanium minerals are observed in stratiform, lenticular, intergranular, and disseminated forms (Fig. 7). The thickness of Ti and Fe rich horizons varies from mm, cm, to layers more than 1 m thick. The length of the lenses forms of oxide minerals also varies from about 10 cm to 50 cm. Also, intrusive rocks composed of diorite, monzodiorite to monzogabbro of Late Cretaceous age are also present in the study area, which have intruded as stocks, dikes, and sill forms (mostly sill) among the early Late Cretaceous volcanic-sedimentary sequences (Fig. 2).

3.2. Lithofacies

Classification and description of the lithofacies in the studied sedimentary sequence was carried out based on the Miall method (Miall, 1996). Based on this, and by examining factors such as lithology, sedimentary structures, geometric form, bedding surfaces, associated facies, paleocurrent patterns, and fossil remains, 3 groups of gravelly and coarse-grained (Gmm and Gcm), sandy and medium-grained (Sh and Sr), and mudstone and fine-grained (Fl) lithofacies were identified.

-Gravelly lithofacies set: The thickness of this complex in the Eocene sedimentary sequences varies from about 0.5 m to a maximum of 10 m and constitutes most of the upper parts of these sedimentary sequences. The size of their components is gravel to granule, which are located in a matrix of sand and silt. This set includes Gmm and Gcm lithofacies. The Gmm lithofacies is a coarse-grained conglomerate with a matrix (sand and silt), very poorly sorted, and lacking layering (massive) and sedimentary structures (Figs. 8-a to c). The Gcm lithofacies is a microconglomerate with a matrix (sand and silt), poorly sorted, and lacking layering (massive) and sedimentary structures (Figs. 8-a to d).

-Sandy lithofacies set: This lithofacies is thicker than the gravelly and coarse-grained lithofacies in the study area. Important factors that play an important role in their formation include tensile and alternating currents (Jain et al., 2005; Friend and Dade, 2005). There are numerous sedimentary structures in this complex, including normal stratification, diagonal stratification, diagonal lamination, horizontal bedding, ripple marks, and cut-and-fill structures. This complex includes the Sh and Sr lithofacies (Figs. 9-a and d). The Sh lithofacies is the most important sandy facies. The size of its components is in the range of fine to coarse-grained sands and sometimes has disseminated gravel. Their thickness varies from about 0.5 m to layers more than 3 m thick. The size of the components of the Sr lithofacies is in the range of fine-grained sands with well sorting. Sandy facies, and especially the Sh facies, contain horizons, lenses, and disseminated grains of Ti and Fe minerals (Figs. 9-b to d). The thickness of Ti and Fe rich horizons varies from mm, cm, to layers more than 1 m thick.

-Clay and mudstone lithofacies set: This lithofacies is less thick than gravelly and sandy types. This complex includes the Fl lithofacies and is composed solely of horizontal lamination. Overall, it is interbedded with fine to medium-grained sandstones, and its thickness is several centimeters.

3.3. Sandstone petrography

Based on field observations and microscopic studies, the sandstones of this region have fine-, medium-, and coarse-grained textures. Several factors such as mineralogy, transport distance, morphology of the transport and sedimentation path, transport velocity and water flow energy control the size of sedimentary particles (Figs. 10, 11 and 12). Based on petrographic studies, the main mineralogical components of these sandstones include quartz (30 to 45%), feldspar (15 to 30%), and rock fragments (15 to 45%). Pyroxene, amphibole, chlorite, biotite, calcite, and opaque minerals are minor minerals. The matrix amount in the sandstone samples is less than 5% and their cement is mostly composed of carbonate. In terms of textural maturity, these sandstones are evaluated in the semi-mature to relatively mature category. Folk's triangular diagram (Folk, 1974) has been used to classify and naming of sandstones, which all samples are placed in the lithic arkose and feldspathic litharenite groups based on the percentages of quartz, feldspar and rock fragments (Fig. 13). Lithic arkose and feldspathic litharenite sandstones are deposited in medium to high energy depositional environments.

3.4. Ore deposit texture and mineralogy

Field geological observations and hand sample studies indicate that the stratiform ore type is the dominant texture in the sandstones of south Sabzevar. This type of texture observes in layers parallel to the bedding of sandstones. The color of the sandstone horizons varies from light gray, gray, greenish gray, dark gray to dark. The dark color of the sandstone horizons is due to the very high content of oxide minerals (Figs. 3, 9, 14). The thickness of Ti and Fe oxides rich layers usually varies from mm, cm, to layers more than 1 m thick. Titanium and iron minerals are also present in the form of lenses at the host sandstones. The lenses type ore texture is not as extensive as stratiform type and is rarely observed in sandstones. The maximum length of ore lenses reaches to 50 cm (Figs. 15-a and b). Intergranular texture is another common texture in the studied sandstones. In this type of texture, the space between quartz, feldspar, and rock fragments is filled with oxide minerals (Figs. 16-a and b). This feature indicates the concentration of minerals during the deposition and settling of the sandstone components. Titanium and iron-bearing minerals are also observed as disseminated grains and somewhat uniform particles among the sandstone components. Disseminated grain texture is easily recognizable in microscopic samples. The mineral particles size ranges from 10 to 250 microns, with the majority of grains having an average size of 150 microns (Figs. 16-c to e). Mineralogical studies have identified titanomagnetite, ilmenite, magnetite, hematite, and goethite in the samples. In addition, quartz, plagioclase (albite), rock fragments, and minor amounts of pyroxene, amphibole, biotite, chlorite, epidote, calcite, and clay minerals also accompany the oxide minerals in the sandstone composition. Titanomagnetite is the most abundant oxide mineral in these samples. Titanomagnetite grains range in size from about 10 to 300 microns, with grains of 100 to 150 microns are dominant. Ilmenite and magnetite are also present in small amount (Figs. 17-c and d). Titanomagnetite, magnetite and ilmenite are gradually replaced by hematite, goethite and limonite from the grain margins and along fractures under the weathering and surface oxidation conditions and forming a replacement texture (Figs. 17-c and d).

3.5. Geochemistry of Ti- and Fe-bearing sandstones

The concentrations of major and trace elements in 4 titanium and iron rich sandstone samples are given in Table 2. The geochemical data in Table (2) show that the TiO_2 values in these samples vary from 12.87 to 20.75 wt.% (average 15.89 wt.%), which clearly indicates that these sandstones are rich in titanium. The Fe_2O_3 value of the samples varies from 39.99 to 64.68 wt.%. The high values of titanium and iron in these samples are due to the presence of titanomagnetite, ilmenite, magnetite and hematite in their composition.

3.6. Chemistry of oxide minerals

For study of oxide minerals chemistry, 5 polished and thin-

polished sections were selected from the ore-bearing sandstones and monzodiorite to gabbro rocks. Mineralogical study shows that titanomagnetite constitutes a major part of this samples and is accompanied by a very small amount of ilmenite, magnetite and hematite. In this study, 20 points on the oxide minerals in SA-P-01 sample have been selected (Figs. 19-a and b) and at each of these points the values of O, Ti, Fe, Mg, Al, Si, and V have been analyzed (Table 3). Geochemical data shows that O, Ti, and Fe are the main composition of the oxide minerals (Figs. 19-c and d). The oxygen, titanium, and iron value vary from 24.01 to 41.29 wt.% (av. 36.56 wt.%), 13.94 to 17.87 wt.% (av. 15.41 wt.%), and 17.43 to 60.58 wt.% (av. 40.47%), respectively. To identify the oxide minerals type based on mineral chemistry, the average element concentration was compared with those of reference ilmenite, magnetite, titanomagnetite, and hematite (Table 3). In figure 20, the average composition of Mohammadabad oxide minerals is compared with those of reference ilmenite, magnetite, titanomagnetite, and hematite, and the composition of oxide minerals in the study area is most similar to the titanomagnetite composition.

4. Discussions

4.1. Possible source rocks of Ti- and Fe-oxide minerals

To investigate the source rock of Ti- and Fe-oxide minerals, some samples were taken from the Late Cretaceous intermediate-mafic intrusive rocks in the study area. These intrusions are observed as stocks, dikes and sill forms (mostly sill) within the Late Cretaceous volcanic-sedimentary sequences (Figs. 6-c to e), and according to their placement among the early Late Cretaceous sedimentary-volcanic units (100 to 90 million years ago) and age dating, they have end of Late Cretaceous age (Jafarian and Jalali, 2000; Kazemi et al., 2019a,b; Ghasemi, 2018 and 2019). Based on the petrographic studies, intrusive rocks are monzodiorite, diorite to monzogabbro. Plagioclase, amphibole and clinopyroxene are the main minerals, while chlorite, epidote, sericite, clay minerals and sometimes carbonates are the alteration and secondary minerals. A prominent mineralogical feature of these rocks is the presence of significant amounts of opaque minerals in their composition (Figs. 21-a to c). The opaque minerals in igneous rocks are mostly titanomagnetite and magnetite. To study the geochemical similarity between ore-bearing sandstones and diorite to monzogabbro rocks, the minor and trace element concentrations in selected samples of these rocks (Table 4) were normalized to their values in the composition of primitive mantle (McDonough and Sun, 1995) and chondrite (Boynton, 1984) (Figs. 22-a and b). As is clear from these diagrams, the minor, trace, and rare earth elements patterns between ore-bearing sandstones and diorite- monzogabbro rocks are completely similar, indicating that the sandstone components most likely originated from the erosion and weathering of diorite- monzogabbro rocks.

4.2. Genetic model

The Mohammadabad titanium deposit was deposited in the fluvial-deltaic and shallow coastal environments of the intracontinental, sedimentary-evaporitic, foreland basin with normal and strike-slip faulting activity. Geological evidence suggests that this shallow foreland basin is a remnant of the Sabzevar oceanic basin, which was closed during the Cretaceous-Paleocene period with the uplift of the Sabzevar ophiolite complex, the creation of the Cretaceous-Paleocene metamorphic belt, and the formation of the Late Cretaceous-Tertiary magmatic arc (Jafari and Ghasemi, 2023). The remnant of this sea existed as a shallow marine foreland basin throughout the Tertiary (Paleocene-Miocene) and deposited gypsiferous marl, bituminous shale, mudstone, sandstone, and conglomerate (Fig. 23). Evaporite sequences including gypsum, anhydrite, and halite are also widespread in these environments, indicating a dry climate, high evaporation, and a closed intracontinental environment suitable for the concentration of salts and metallic elements. Field geology, mineralogy, and geochemical observations indicate that the source rock of Ti- and Fe-oxide minerals in the southern Sabzevar region is most likely mafic-intermediate igneous rocks of the end Late Cretaceous with a composition of monzogabbro, monzodiorite, and diorite, which are exposed in the form of stocks, dykes and sill in the early Late Cretaceous sedimentary-volcanic sequence (Figs. 6-c to e and Figs. 21-a to i). Following the Laramide orogenic phase and uplift of Cretaceous rocks, especially the Sabzevar ophiolites and the Late Cretaceous igneous sequence of Sabzevar as the source rock of oxide minerals, these rocks have undergone weathering and erosion, and their sediments have been deposited as conglomerate, sandstone, and mudstone in the Eocene river and shallow coastal environments. Resistant oxide minerals including titanomagnetite, ilmenite, and magnetite have accumulated as heavy minerals in the sandstone sediments and formed economic horizons (Figs. 23-a and b). The stratiform, lenses, and disseminated forms of oxide minerals among the sedimentary layers indicate gradual concentration and the influence of sedimentary conditions on their formation. These alluvial placers have been folded as a result of the last phases of Alpine orogeny (Pyrenean and Pasadenian) and are now observed as folded shale-sandstone-marl-limestone sequences with concentration of titanium and iron ores. In fact, the Sabzevar titanium deposit is a stratabound paleoplacer deposit (only in the sandstone unit) with a predominant stratiform texture and is of the shallow fluvial-coastal paleoplacer type.

5. Conclusion

The Fe–Ti-bearing sandstones of the Middle–Late Eocene succession in southern Sabzevar represent a stratabound paleoplacer deposit enriched in titanomagnetite, ilmenite, magnetite, and

hematite. Petrographic and mineralogical investigations indicate that titanomagnetite is the dominant oxide phase, and the sandstone compositions correspond mainly to lithic arkose and feldspathic litharenite. Geochemical similarities between the Fe–Ti-bearing sandstones and Late Cretaceous intermediate–mafic intrusions (diorite, monzodiorite, and monzogabbro) suggest these rocks as the primary source of the ore minerals. The deposit formed in fluvial to shallow-marine environments of the Eocene foreland basin and was subsequently deformed during the final stages of the Alpine orogeny. The Sabzevar Ti deposit therefore represents an ancient alluvial paleoplacer system containing economically significant concentrations of Fe–Ti oxide minerals.

Acknowledgment

The authors are grateful to the Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, who have prepared a suitable environment for doing this research. We would like to thank to the staff of Scientific Quarterly Journal of Geosciences and some anonymous reviewers who accept handling and reviewing our manuscript.

فصلنامه علمی علوم زمین، پاییز ۱۴۰۵، دوره ۳۶، شماره ۳، پیاپی ۱۴۱، صفحه ۲۵ تا ۵۴

مقاله پژوهشی

پیوند صفحه نخست: www.gsjournal.ir

زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و الگوی تشکیل کانسار تیتانیم دیرینه پلاسری محمدآباد، سبزوار، شمال‌خاور ایران

حسین ابراهیمی[1]، مسعود علی‌پوراصل*[1] و حبیب‌الله قاسمی[1]

[1] گروه پترولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

ماسه‌سنگ

ائوسن

تیتانومگنتیت

دیرینه پلاسر

سبزوار

چکیده

کانسار تیتانیم دیرینه پلاسری محمدآباد در زیرپهنه سبزوار، شمال‌خاور ایران در جنوب سبزوار واقع است. این کانسار به صورت چینه‌کران در افق ماسه‌سنگی کانه‌دار از واحد مارنی-کنگلومرایی-آهکی-ماسه‌سنگی ائوسن میانی- پسین قرار دارد. ماسه‌سنگ‌ها از نوع لیتیک‌آرکوز و فلدسپاتیک لیت‌آرنایت بوده و در محیط رسوب‌گذاری با انرژی متوسط تا بالا نهشته شده‌اند. رخساره‌های سنگی از نوع گراولی و دانه درشت (Gmm و Gcm)، ماسه‌ای و دانه متوسط (Sh و Sr) و گلی و دانه ریز (Fl) هستند. کانی‌های اکسیدی به شکل چینه‌کران در واحد ماسه‌سنگی و به‌صورت‌های چینه‌سان (لایه‌ای)، عدسی و دانه‌پراکنده مشاهده می‌شوند. ستبرای افق‌های کانه‌زایی از حد میلی‌متر، سانتی‌متر تا لایه‌هایی به ستبرای بیش از ۱ متر متغییر است. کانی‌های اکسیدی شامل تیتانومگنتیت، ایلمنیت، مگنتیت و هماتیت هستند که تیتانومگنتیت بیشترین فراوانی را دارد. مطالعه شیمی کانی‌های اکسیدی (TiO_2 از ۱۲/۸۷ تا ۲۰/۷۵ درصد و Fe_2O_3 از ۳۹/۹۹ تا ۶۴/۶۸ درصد) نیز متوسط ترکیب آن‌ها را تیتانومگنتیت نشان می‌دهد و اهمیت کانه‌زایی تیتانیم و آهن در ماسه‌سنگ‌های جنوب سبزوار را آشکار می‌سازد. مقایسه الگوهای ژئوشیمیایی عناصر فرعی و کمیاب در ماسه‌سنگ‌های تیتانیم-آهن‌دار ائوسن با همین الگوها در توده‌های آذرین مافیک-حدواسط کرتاسه پسین در این منطقه، به همراه وجود مقادیر شایان‌توجهی از تیتانومگنتیت و مگنتیت در ترکیب کانیایی این سنگ‌های آذرین، نشان می‌دهد که توده‌های مونزوگابرویی، گابرودیوریتی و مونزودیوریتی کرتاسه پسین به سن ۱۰۰ تا ۷۵ میلیون سال پیش، سنگ مادر احتمالی کانی‌های اکسیدی در ماسه‌سنگ‌های جنوب سبزوار هستند. این سنگ‌های نفوذی به شکل‌های استوک، دایک و سیل (بیشتر سیل) در میان توالی‌های آتشفشانی-رسوبی کرتاسه پسین در منطقه جنوب سبزوار برون‌زد دارند. کانسار تیتانیم محمدآباد، یک کانسار دیرینه پلاسری است که از هوازدگی و فرسایش سنگ‌های برخاسته و رخنمون یافته کرتاسه پسین در محیط‌های رودخانه‌ای و ساحلی کم‌ژرفای دریای پیش‌بوم (فورلند) حوضه اقیانوسی سبزوار در زمان ائوسن میانی- پسین نهشته شده است.

۱- پیش‌نوشتار

تیتانیم یک عنصر شیمیایی با نماد Ti و عدد اتمی ۲۲ با چگالی پایین و مقاومت بالا است. این عنصر به‌عنوان فلزی راهبردی، کاربردهای زیادی در صنایع هوا فضا، ماشین‌سازی، الکترونیک و رنگ‌سازی دارد. این عنصر در ترکیب با عناصر دیگر و به‌صورت‌های ایلمنیت، تیتانومگنتیت، روتیل، آناتاز، بروکیت، اسفن، لوکوکسن و اوژیت تیتانیم‌دار در سنگ‌های پوسته زمین یافت می‌شود. در این میان، ایلمنیت و روتیل از نظر اقتصادی با ارزش هستند. فراوانی پوسته‌ای تیتانیم ۵۶۰۰ گرم در تن است و کانسنگ‌های تیتانیم‌دار با داشتن عیار بیش از ۵ درصد TiO_2 ارزش معدنی پیدا می‌کنند. عیار معدن‌کاری در کانسارهای پلاسری ایلمنیت‌دار ۱ تا ۱۰ درصد ایلمنیت آزاد و در پلاسرهای روتیل‌دار ۵ درصد روتیل آزاد است (Subasinghe and Ratnayake, 2022). تیتانیم به صورت‌های ماگمایی، پلاسری و به‌ندرت دگرگونی کانسار تشکیل می‌دهد. کانسارهای ماگمایی آن به همراه سنگ‌های فرامافیک-مافیک مانند پریدوتیت‌ها، گابروها، آنورتوزیت، نوریت و بازالت یافت می‌شود. کانسارهای تیتانیم پلاسری نیز شامل پلاسرهای ساحلی، رودخانه‌ای، دشت‌های آبرفتی و دیرینه پلاسرها (کنگلومرا و ماسه‌سنگ‌های تیتانیم‌دار) هستند (El-Khalloufi et al., 2021). کاوش‌های زمین‌شناسی و اکتشافی نظام‌مند به شناسایی آثار معدنی و کانسارهای تیتانیم در کشور انجامیده است. کانسارهای تیتانیم کهنوج (جنوب استان کرمان) و قره‌آغاج (سرو- ارومیه) از کانسنگ‌های معروف تیتانیم در ایران هستند (قربانی، ۱۳۸۷). افزون بر این، سنگ‌های دیوریت-گابرویی و گابرویی کرتاسه و سنوزوییک،

* نویسنده مسئول: مسعود علی‌پوراصل؛ E-mail: masoodalipour@shahroodut.ac.ir

ماخذنگاری:

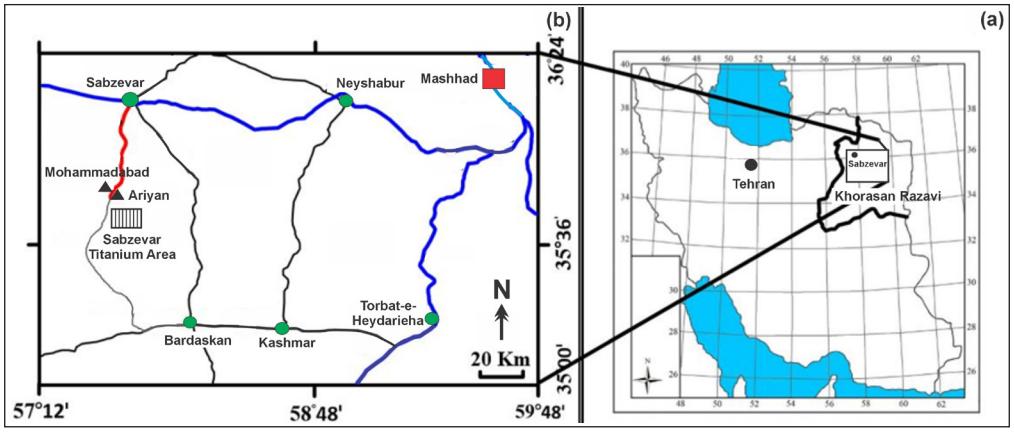
ابراهیمی، ح.، علی‌پوراصل، م. و قاسمی، ح.، ۱۴۰۵، زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و الگوی تشکیل کانسار تیتانیم دیرینه پلاسری محمدآباد، سبزوار، شمال‌خاور ایران. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۶(۳)، ۱۴۱، ۲۵-۵۴. https://doi.org/10.22071/gsj.2026.573793.2244.

doi: 10.22071/gsj.2026.573793.2244 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.3.2.4

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/)

ماسه‌سنگ‌های سنوزوییک (اعلمی‌نیا و گل قندشتی، ۱۳۹۰؛ نعیمی، ۱۳۹۷؛ Amini and Anketell, 2015) و آبرفت‌های عهد حاضر (کوثری و همکاران، ۱۳۶۶؛ مقدسی و یزدی، ۱۳۹۴؛ رحیم‌سوری و همکاران، ۱۳۹۶؛ حاج‌علیلو و همکاران، ۱۴۰۰) در بیشتر نقاط ایران به ویژه در استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، کردستان، سمنان، سیستان و بلوچستان، کرمان، یزد و خراسان رضوی مستعد کانه‌زایی تیتانیم هستند. محدوده مورد مطالعه در شمال‌خاور ایران، استان خراسان رضوی، ۷۵ کیلومتری جنوب سبزوار و در مجاورت روستاهای محمدآباد و آریان قرار دارد (شکل‌های ۱-a و b). بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که کارهای انجام شده بر روی کانه‌زایی تیتانیم محمدآباد در جنوب سبزوار جنبه اکتشافی داشته و از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی مطالعه نشده است. در این پژوهش، کانسار تیتانیم محمدآباد از جنبه‌های زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی مطالعه شده و بر پایه نتایج به‌دست آمده از این مطالعات، الگویی برای پیدایش آن ارائه شده است. دستاوردهای این پژوهش برای ادامه عملیات اکتشافی و بهینه‌سازی فعالیت‌های اکتشافی، کانه‌آرایی و فرآوری در این محدوده کمک شایانی خواهد بود.



شکل ۱- a) موقعیت جغرافیایی کانسار تیتانیم محمدآباد سبزوار در ایران و استان خراسان رضوی. b) راه‌های دسترسی به محدوده کانسار.

Figure 1-a) The geographical location of Mohammad Abad titanium deposit in Iran and Khorasan Razavi province. b) Access ways to the Mohammad Abad titanium deposit.

۲- روش پژوهش

در این پژوهش بازدیدهای صحرایی برای بررسی‌ها و برداشت‌های زمین‌شناسی صورت گرفت و نمونه‌های لازم برای مطالعات سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی از سنگ‌های تیتانیم و آهن‌دار و سنگ‌های همراه آن‌ها در رخنمون‌های سطحی، ترانشه‌های اکتشافی و استخراجی صورت گرفت. تعداد ۲۰ عدد برش نازک، ۲۵ عدد برش نازک-صیقلی و ۱۰ عدد برش صیقلی از سنگ‌ها و کانسنگ‌ها تهیه و مطالعات میکروسکوپی سنگ‌نگاری، کانی‌شناسی و ساخت و بافت ماده معدنی روی آن‌ها انجام شد. برای مطالعه کانی‌شناسی نمونه‌های کانسنگ، تعداد ۵ نمونه نیز با استفاده از روش پراش‌سنجی پرتو ایکس (XRD) در آزمایشگاه مطالعات مواد معدنی زرآزما در تهران بررسی شده است. تعداد ۴ نمونه از ماسه‌سنگ‌های تیتانیم و آهن‌دار برای بررسی‌های زمین‌شیمی انتخاب شده است. نمونه‌برداری از سنگ‌ها به روش قطعه‌ای انجام شده است، بدین‌ترتیب که در هر ایستگاه حدود ۵۰ قطعه کوچک سنگ با مقطع عرضی ۳ تا ۴ سانتی‌متر مربع برداشت شده است. وزن کلی هر نمونه سنگ‌ژئوشیمی در حدود ۲ کیلوگرم بوده است. نمونه‌های سنگ به ترتیب مراحل خردایش و آسیاب را پشت‌سر گذاشته است. تعداد ۴ نمونه ماسه‌سنگ تیتانیم و آهن‌دار و ۲ نمونه سنگ آذرین نفوذی طی فرایند ذوب قلیایی در حضور مواد کمک ذوب در بوته‌های پلاتینی ذوب شده، سپس نمونه مذاب به کمک محلول اسیدی هضم شده و مقادیر اکسید عناصر اصلی با استفاده از طیف‌سنج پلاسمای جفت شده القایی- نشر نوری (ICP-OES) در آزمایشگاه مطالعات مواد معدنی زرآزما در تهران تجزیه شده است. مقادیر غلظت عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی در این ۶ نمونه سنگ‌ژئوشیمی نیز به روش انحلال در مخلوط چهار اسید و با استفاده از طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) در همان آزمایشگاه تجزیه شده است. بر اساس شواهد زمین‌شناسی صحرایی و مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی، تعداد ۵ نمونه برش نازک-صیقلی و صیقلی از ماسه‌سنگ‌های تیتانیم و آهن‌دار و سیل‌های مونزودیوریتی و گابرویی برای مطالعه شیمی کانی‌های اکسیدی (تیتانومگنتیت، ایلمنیت، مگنتیت و هماتیت) با استفاده از دستگاه ریزکاونده الکترونی نوع انتخابگر انرژی (EPMA-EDS) ساخت شرکت زایس کشور آلمان مدل Sigma 300-HV در آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی (SEM) دانشگاه صنعتی شاهرود به صورت نقطه‌ای آنالیز شده است. در مجموع، در این ۵ نمونه تعداد ۹۰ نقطه بر روی کانی‌های اکسیدی تجزیه شده است.

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- زمین‌شناسی

بر پایه مشاهدات زمین‌شناسی صحرایی، مطالعات سنگ‌شناسی و اطلاعات چهارگوش‌های زمین‌شناسی کاشمر (Eftekhar-Nezhad et al., 1976) و ششتمد (جعفریان و جلالی، ۱۳۷۹) واحدهای سنگ-چینه‌ای در محدوده تیتانیم محمدآباد سبزوار از قدیم به جدید شامل:

- واحدهای سنگی کرتاسه پیشین با تناوبی از واحدهای مارنی ($k_1^{m,s}$)، رسوبی-آتشفشانی ($k_1^{v,l,m}$) و آهکی ($k_1^{l,m}$).
- واحدهای سنگی کرتاسه پسین با تناوبی از واحدهای توفی-گدازه‌ای ($K_2^{t,v}$)، مارنی-آهکی ($K_2^{m,l}$)، آندزیتی (V^{an})، شیلی-ماسه‌سنگی ($k_2^{sh,s,t}$)، آهکی (k_2^{l})،

مارنی-توفی ($k_2^{m,tm}$) و برش آتشفشانی (ولکانیکی)-توفی ($V^{b,tb}$).

- واحدهای سنگی پالئوسن-ائوسن با توالی از واحد مارنی-آهکی ($PE^{s,m}$)، مارنی ($PE^{m,l}$) و مارنی-ماسه‌سنگی ($PE^{m,s}$).

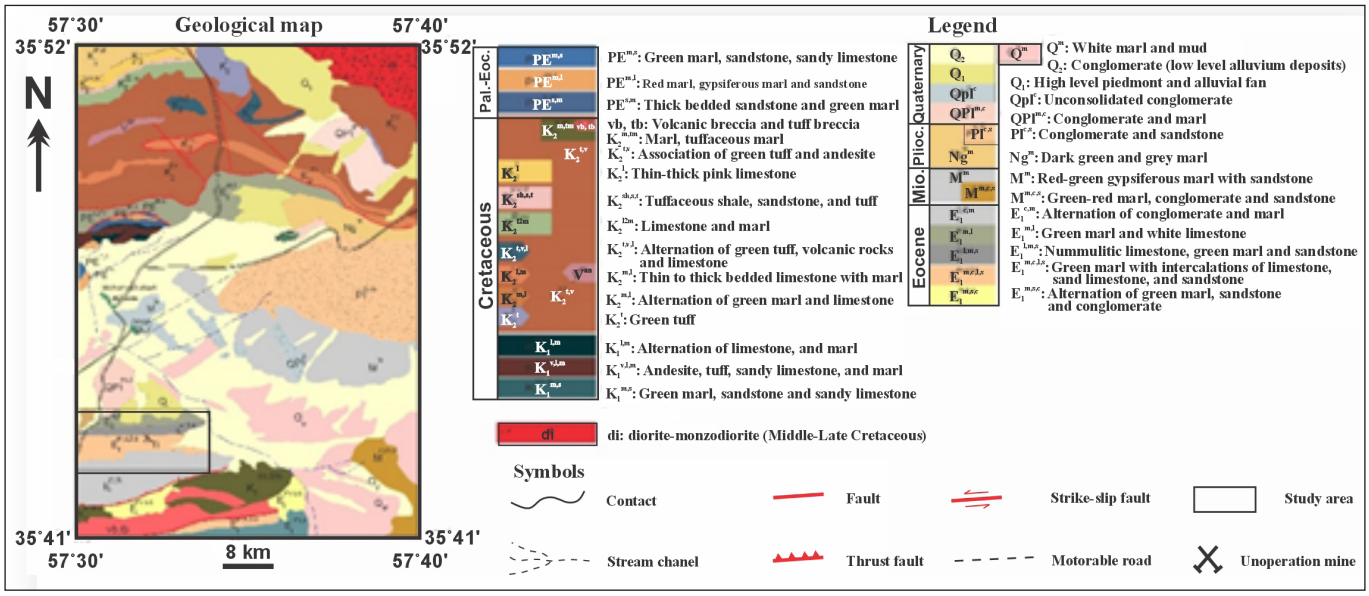
- واحدهای سنگی ائوسن با تناوبی از ماسه‌سنگ، ماسه‌سنگ‌های دارای لامینه‌هایی از اکسیدهای تیتانیم و آهن، مارن، کنگلومراء و سنگ‌آهک.

- واحدهای سنگی میوسن با ترکیبی از مارن و مارن‌های گچ‌دار (M^m) و واحد کنگلومرایی-مارنی-ماسه‌سنگی ($M^{c,m,S}$).

- واحدهای سنگی میوپلیوسن با مارن‌های خاکستری و سبز تیره (Ng^m) و آبرفت‌های کواترنری است.

- همچنین، سنگ‌های نفوذی با ترکیب دیوریت، مونزودیوریت تا مونزوگابرو به سن اواخر کرتاسه پسین نیز در این منطقه رخنمون دارند که به شکل‌های استوک، دایک و سیل (بیشتر به شکل سیل) در میان توالی‌های آتشفشانی-رسوبی اوایل کرتاسه پسین نفوذ کرده‌اند (شکل ۲).

در محدوده مورد مطالعه، نهشته‌های رسوبی ائوسن به‌سبب دارا بودن افق‌های غنی از کانی‌های اکسیدی تیتانیم و آهن مهم بوده و بیشتر مطالعه شده است. در این منطقه، به‌دلیل شرایط زمین‌ساختی و زمین‌ریخت‌شناسی، مرزهای پایینی و بالایی واحدهای سنگی ائوسن به‌خوبی مشخص نیست. نهشته‌های ائوسن در برخی نقاط به‌صورت پیش‌رونده بر روی واحدهای سنگی پالئوسن قرار گرفته است. مرز بالایی نهشته‌های ائوسن توسط مارن‌های میوسن و حتی جوان‌تر از آن به صورت دگرشیب پوشیده می‌شود. در مجموع، واحدهای سنگی ائوسن از لایه‌های ستبر ماسه‌سنگ، مارن، کنگلومرا و سنگ آهک تشکیل شده است و به مقدار کم افق‌هایی از سنگ گچ نیز در بخش‌های بالایی نهشته‌های ائوسن به چشم می‌خورد. در این مجموعه رسوبی، ستبرای واحدها در جهت جانبی تغییرات زیادی دارد که نشانگر وجود یک محیط دریایی پیش‌بوم با ژرفای متغیر و با عملکرد گسل‌های عادی (نرمال) است. واحدهای سنگی ائوسن بیشتر دارای مرز عادی و پیوسته می‌باشند، اما در برخی نقاط به طور محلی سطوح دگرشیبی در مرز آن‌ها مشاهده می‌شود که نشانگر عملکرد فازهای کوهزاد آلپی بعدی (پیرنه و پاسادنین) است. در ادامه، واحدهای سنگ-چینه‌ای ائوسن شرح داده می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده کانسار تیتانیم محمدآباد، جنوب سبزوار (با تغییر و اقتباس از جعفریان و جلالی، ۱۳۷۹).

Figure 2. Geologic map of the Mohammad Abad titanium deposit, south of Sabzevar (modified after Jafarian and Jalali, 2000).

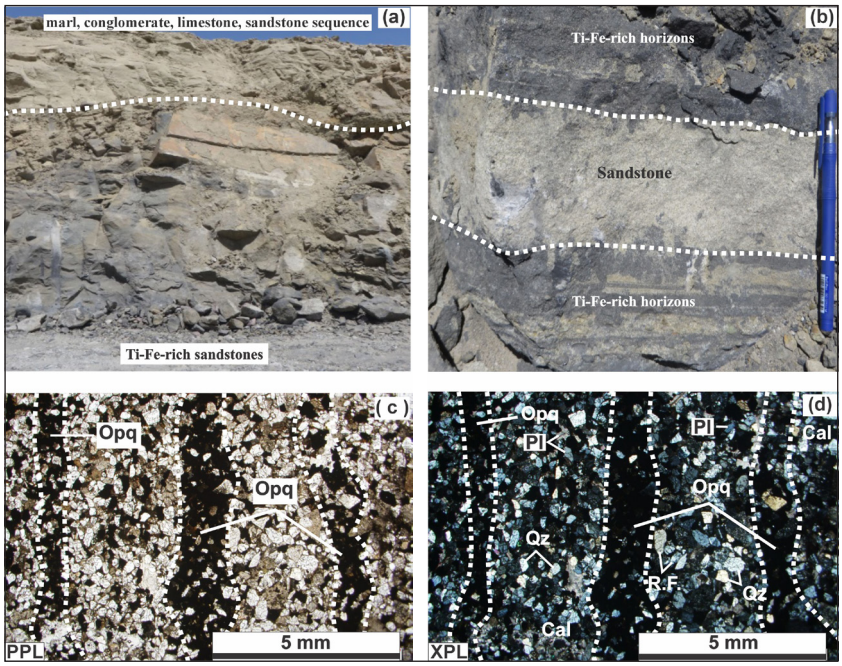
۳-۱-۱- واحدهای سنگ-چینه‌ای

واحدهای سنگ-چینه‌ای تفکیک شده در توالی رسوبی ائوسن در محدوده مورد مطالعه از قدیم به جدید به‌صورت زیر می‌باشند:

- واحد کنگلومرایی-ماسه‌سنگی ($E^{c,s}$): این واحد رسوبی تخریبی با ۴۰۰ متر ستبرا از کنگلومرای قرمز و تقریبا یکنواخت با میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ آهکی قرمز تشکیل شده است. واحد کنگلومرایی-ماسه‌سنگی، بخش قاعده‌ای نهشته‌های ائوسن میانی به‌شمار می‌رود و در برخی نقاط به‌طور جانبی بخش کم‌ستبرایی از مارن سبز نیز در این واحد قابل مشاهده است. این واحد به مقدار خیلی کم در بردارنده افق‌ها و دانه‌های پراکنده‌ای از اکسیدهای آهن و تیتانیم‌دار است.

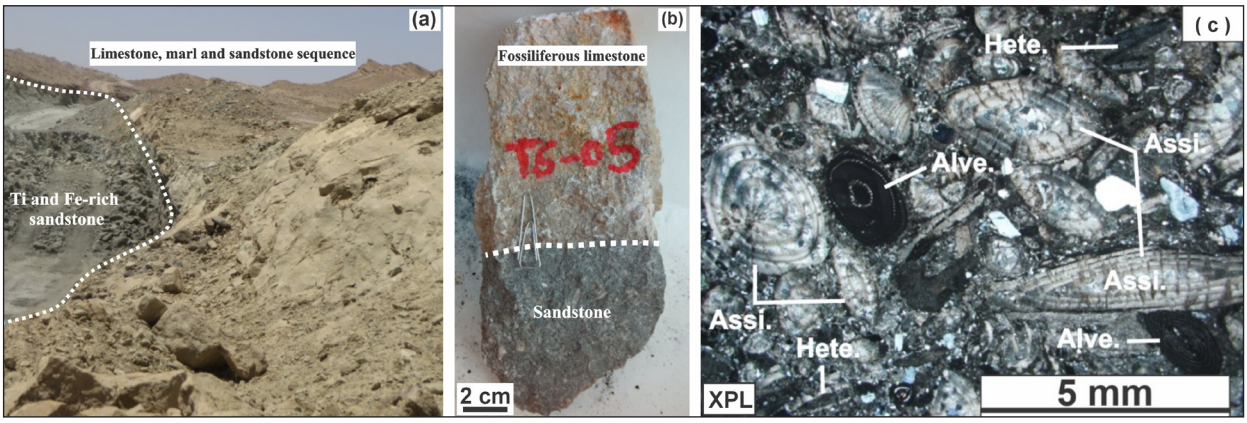
- واحد مارنی-کنگلومرایی-آهکی-ماسه‌سنگی ($E^{m,c,l,S}$): این واحد از مارن سبز با میان‌لایه‌هایی از ماسه‌سنگ، میکروکنگلومرا، سنگ آهک و سنگ آهک ماسه‌ای تشکیل شده است. ستبرای این واحد رسوبی-تخریبی در منطقه مورد مطالعه در حدود ۳۵ متر است. مرز پایینی و بالایی این واحد با واحدهای رسوبی دیگر عادی و پیوسته است. امتداد عمومی این واحد چینه‌شناختی خاوری-باختری است و در حدود ۲۵ درجه به‌سمت شمال شیب دارد. از ویژگی‌های شاخص معدنی این واحد رسوبی، وجود کانی‌های تیتانیم و آهن‌دار (تیتانومگنتیت، ایلمنیت و مگنتیت) در افق‌های ماسه‌سنگی آن است (شکل‌های ۳-a تا d).

- واحد آهکی-مارنی-ماسه‌سنگی ($E^{l,m,S}$): این واحد از سنگ آهک نومولیت‌دار، مارن سبز، کنگلومرا و ماسه‌سنگ گریوکی ترکیب یافته است (شکل‌های۴-a تا c). ستبرای این واحد رسوبی در منطقه مورد مطالعه در حدود ۴۰ متر می‌باشد. مرز پایینی و بالایی این واحد با واحدهای رسوبی دیگر عادی و پیوسته است. روند ساختاری این واحد عموما خاوری-باختری است و در حدود ۲۵ درجه به‌سمت شمال شیب دارد.



شکل ۳- تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از ماسه‌سنگ‌های دارای کانی‌های تیتانیم و آهن‌دار. a) افق ماسه‌سنگی غنی از کانی‌های تیتانیم و آهن‌دار در توالی‌هایی مارنی-کنگلومرایی-ماسه‌سنگی-آهکی ائوسن میانی-پسین (دید به‌سمت شمال). b) تصویری از نمونه دستی ماسه‌سنگ‌های تیتانیم‌دار. c، d) تصاویر میکروسکوپی از ماسه‌سنگ‌های غنی از تیتانیم و آهن در نور عبوری تخت (PPL) و نور عبوری عمود بر هم (XPL)، که دارای پلاژیوکلاز، کوارتز، قطعات سنگی و کانی‌های تیره است.

Figure 3. Field and microscopic photo of titanium- and iron-bearing sandstone. a) Ti- and Fe-riched sandstone horizone into the middle-late Eocene marl-conglomerate-sandstone-limestone sequences (view to N). b) Hand sample photo of titanium-rich sandstone. c, d) Photomicrograph of Ti- and Fe-rich sandstone on normal light (PPL) and cross polarized light (XPL) with plagioclase, quartz, rock fragments, and opaque minerals. Pl: Plagioclase; Qz: Quartz; R.F.: Rock fragments; Opq: Opaque minerals. (Abbreviations for names of minerals from Whitney and Evans (2010)).

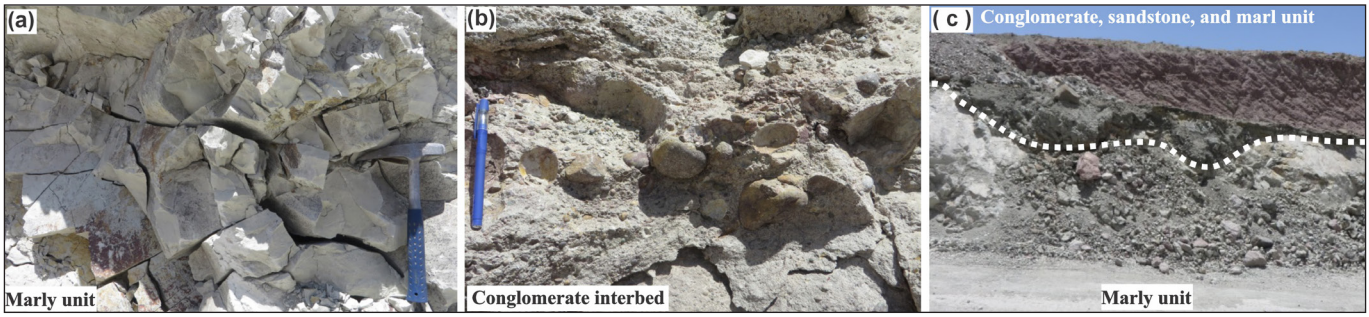


شکل ۴- a) تصویر صحرایی از واحد آهکی-مارنی-ماسه‌سنگی که به صورت هم‌شیب بر روی واحد ماسه‌سنگی غنی از کانی‌های تیتانیم و آهن‌دار قرار گرفته است (دید به‌سمت باختر). b) تصویر نمونه دستی از سنگ آهک فسیل‌دار و ماسه‌سنگ. c) تصویر میکروسکوپی از سنگ‌آهک ماسه‌ای سرشار از فسیل‌های Assilina (Assi.)، Alveolina (Alve.) و Heterostegina (Hete.) که شاخص زمان ائوسن میانی-پسین هستند.

Figure 4- a) Field photograph of limston-marl-sandston unit located conformably on titanium- and iron-bearing sandstone (view to W). b) hand-samle photograph of fossiliferous limestone and sandstone. c) Photomicrograph of fossiliferous sandy limestone with Assilina (Assi.), Alveolina (Alve.), and Heterostegina (Hete.) fossil fragments, which is characteristics of the middle-late Eocene age.

– **واحد مارنی ($E^{m,l}$):** واحد مارنی گسترش زیادی در محدوده مورد مطالعه دارد و ستبرای آن به بیش از ۱۵۰متر می‌رسد و بیشتر به رنگ سبز می‌باشد (شکل ۵-a). این واحد مارنی سبزرنگ دارای میان‌لایه‌هایی از سنگ‌آهک، کنگلومرا، سنگ‌آهک ماسه‌ای و ماسه‌سنگ است (شکل ۵-b). بخش‌های آهکی این واحد دارای فسیل‌های نومولیت است. در برخی نقاط واحد مارنی به صورت دگرشیب با توالی از مارن، ماسه‌سنگ و میکروکنگلومرای قرمز رنگ میوسن پوشیده می‌شود (شکل ۵-c).

– **واحد مارنی–ماسه‌سنگی–کنگلومرایی ($E^{m,s,C}$):** این واحد بیشتر از تناوب مارن، ماسه‌سنگ و کنگلومراء تشکیل شده است که به‌طور محلی دارای میان‌لایه‌هایی از سنگ‌آهک است (شکل ۵-c).



شکل ۵- a) واحد مارنی به رنگ سبز روشن در توالی رسوبی ائوسن. b) میان‌لایه کنگلومرایی در داخل واحد مارنی–ماسه‌سنگی. c) واحد مارنی به رنگ سبز روشن که به صورت دگرشیب با توالی از مارن، ماسه‌سنگ و میکروکنگلومرای قرمز رنگ میوسن پوشیده می‌شود (دید به‌سمت جنوب).

Figure 5- a) Light green-colored marl unit into the Eocene sedimentary sequence. b) Interlayer of conglomerate into the marl-sandestone unit. c) Light green-colored marl unit is disconformably covered by the red-colored marl, sandstone, and micro-conglomerate sequences (view to S).

۳-۱-۲- سنگ‌های آذرین نفوذی

در چهارگوش زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ ششتمد، سنگ‌های نفوذی دارای ترکیب دیوریت تا مونزودیوریت (di) با سن کرتاسه پسین، میکروگرانیت تا گرانیت (mgr) با سن کرتاسه پسین، گرانیت (gr) اواخر کرتاسه پسین (شکل ۶-a) و دایک‌های داسیت آندزیتی و میکرودیوریتی می‌باشند (Eftekhar-Nezhad et al., 1976؛ جعفریان و جلالی، ۱۳۷۹). در محدوده تیتانیم جنوب سبزوار، سنگ‌های نفوذی با ترکیب مونزوگابرو، دیوریت و مونزودیوریت وجود دارند که به شکل‌های استوک، دایک و سیل (بیشتر به شکل سیل) در میان توالی‌های آتشفشانی–رسوبی کرتاسه پسین نفوذ کرده‌اند (شکل‌های ۶-b تا e). سنگ‌های دیوریتی تا مونزودیوریتی در بخش شمال‌خاور محدوده مورد مطالعه رخنمون گسترده‌ای دارند و با توجه به جایگیری آن‌ها در میان واحدهای رسوبی–آتشفشانی کرتاسه پسین، سن احتمالی آن‌ها به دوره کرتاسه پسین و پس از پالئوسن نسبت داده شده است (جعفریان و جلالی، ۱۳۷۹). کاظمی و همکاران (۱۳۹۸؛ Kazemi et al., 2019b) و قاسمی و همکاران (۱۳۹۷ و ۱۳۹۸) با مطالعه دقیق سنگ‌های آذرین کرتاسه پسین منطقه و با روش دقیق سن‌سنجی U-Pb برروی زیرکن سن ۷۵ تا ۱۰۲ میلیون سال را برای این سنگ‌ها به دست آورده‌اند (جدول ۱). بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، ترکیب سنگ‌شناسی آن‌ها از مونزوگابرو، دیوریت تا مونزودیوریت تغییر می‌کند. پلاژیوکلاز و آمفیبول کانی‌های سازنده اصلی سنگ‌های نفوذی دیوریتی را تشکیل می‌دهند و با تمایل ترکیب آن‌ها به سمت مونزودیوریت، فلدسپات‌های آلکالن و کوارتز نیز به ترکیب کانی‌شناسی سنگ اضافه می‌شود. با گرایش ترکیب سنگ‌های نفوذی از دیوریت به گابرو، پیروکسن نیز به ترکیب سنگ اضافه شده و پلاژیوکلازها غنی از کلسیم می‌شوند. برای آگاهی بیشتر از شیمی کانی‌های این سنگ‌ها به قاسمی و همکاران (۱۳۹۷ و ۱۳۹۸) و کاظمی و همکاران (۱۳۹۸ و ۲۰۱۹) رجوع کنید. کانی‌های فلزی (اکسیدهای تیتانیم و آهن‌دار) نیز در ترکیب کانی‌شناسی آن‌ها وجود دارد. کلریت، اپیدوت، سریسیت، کانی‌های رسی و گاهی کربنات‌ها از کانی‌های دگرسانی و ثانویه این سنگ‌ها هستند. از بافت‌های چیره این سنگ‌ها می‌توان به اینترسرتال، اینترگرانولار و گرانولار اشاره نمود.

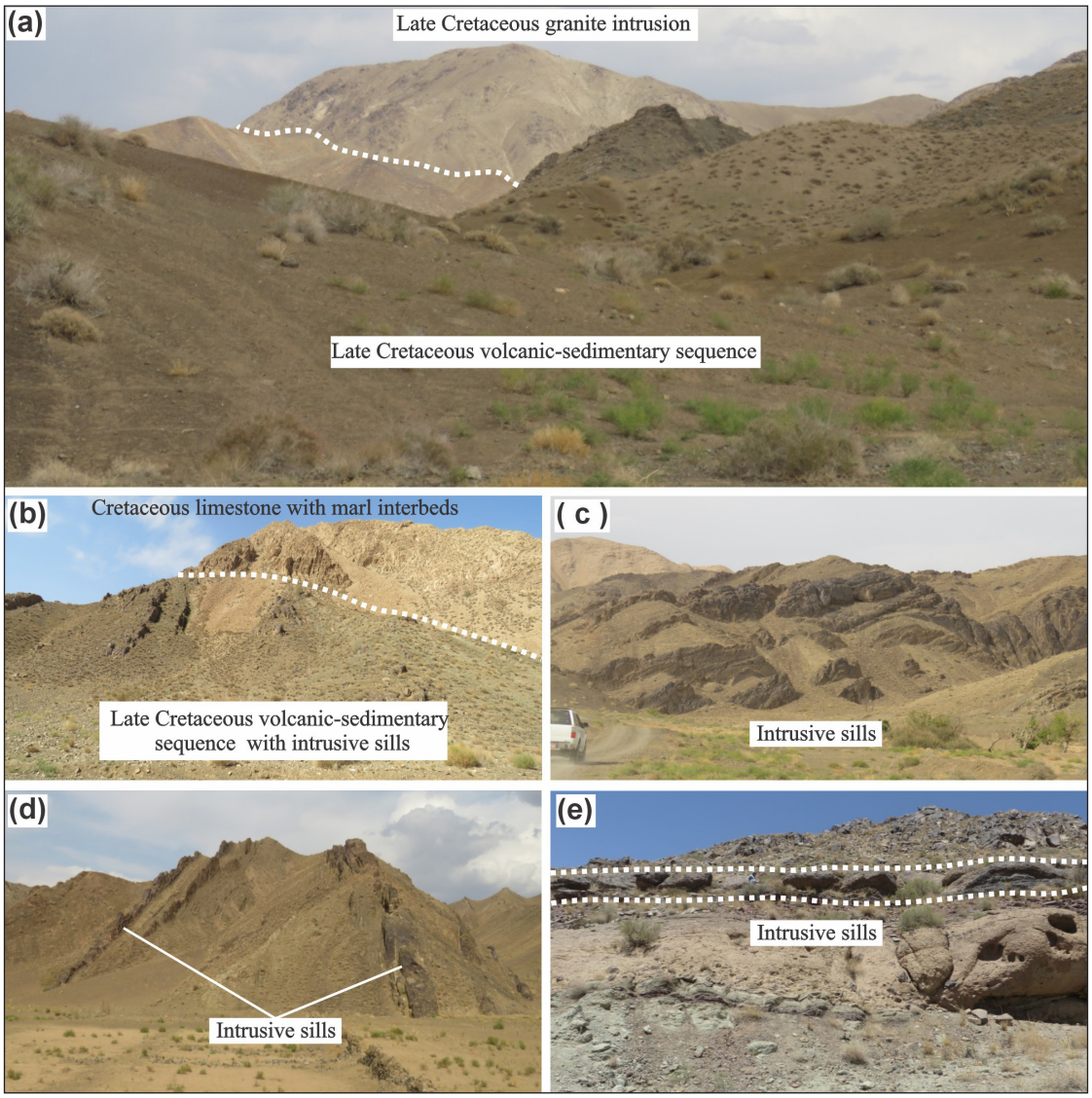
۳-۲- زمین‌شناسی، سنگ‌رخساره‌ها، سنگ‌نگاری و طبقه‌بندی ماسه‌سنگ‌های میزبان کانی‌های آهن–تیتانیم‌دار

۳-۲-۱- زمین‌شناسی ماسه‌سنگ‌ها

افق‌های ماسه‌سنگی موجود در واحد مارنی–کنگلومرایی–آهکی–ماسه‌سنگی ($E^{m,c,l,S}$) و واحد آهکی–مارنی–ماسه‌سنگی ($E^{l,m,S}$) دارای تمرکزهای اقتصادی از کانی‌های آهن–تیتانیم‌دار (تیتانومگنتیت، ایلمنیت، مگنتیت و هماتیت) هستند. در این میان، ستبرا و گسترش جانبی افق‌های حاوی کانی‌های اکسیدی در ماسه‌سنگ‌های واحد $E^{m,c,l,S}$ قابل‌ملاحظه است. مشاهدات صحرایی نشان می‌دهند که در واحد مارنی–کنگلومرایی–آهکی–ماسه‌سنگی، کانی‌های آهن–تیتانیم‌دار به صورت چینه‌کران بیشتر در افق‌های ماسه‌سنگی این واحد تمرکز دارد (شکل ۷). رنگ افق‌های ماسه‌سنگی از خاکستری، خاکستری مایل به سبز، خاکستری تیره تا روشن تغییر می‌کند. ستبرای لایه‌های ماسه‌سنگی در توالی‌های رسوبی، از حدود ۰/۵ تا بیش از ۱۰ متر تغییر می‌کند. در داخل طبقات و افق‌های ماسه‌سنگی، کانی‌های آهن–تیتانیم‌دار به صورت‌های لایه‌ای (چینه‌سان)، عدسی شکل و دانه‌پراکنده مشاهده می‌شوند (شکل ۷). ستبرای افق‌های غنی از کانی‌های آهن–تیتانیم‌دار از حد میلی‌متر، سانتی‌متر تا لایه‌هایی به ستبرای بیش از ۱ متر تغییر می‌کند. طول عدسی‌های محتوی کانی‌های اکسیدی نیز از حدود ۱۰سانتی متر تا ۵۰ سانتی متر تغییر می‌کند. در طبقات ماسه‌سنگی این توالی، ساختمان‌های رسوبی مانند دانه‌بندی تدریجی و لایه‌بندی متقاطع دیده می‌شود.

لایه‌های متناوب کنگلومرا، ماسه‌سنگ، مارن و سنگ‌آهک در واحدهای رسوبی منطقه مورد مطالعه، نشان‌دهنده تغییرات متوالی شرایط محیط رسوب‌گذاری از پرانرژی به کم‌انرژی در طول زمان است. وجود لایه‌های کنگلومرایی و میکروکنگلومرایی با دانه‌های گرد و زاویه‌دار در این توالی رسوبی، بیانگر محیط‌هایی

با انرژی بالا مانند کانال‌های رودخانه‌ای و یا محیط‌های دلتایی می‌باشند. ستبرای لایه‌های کنگلومرائی از حدود ۰/۵ متر تا بیشنه ۱۰ متر تغییر می‌کند. وجود لایه‌های مارن و سنگ آهک در توالی‌های رسوبی نشان از رسوب‌گذاری آرام در محیط‌های کم‌انرژی و به نسبت ژرف است.



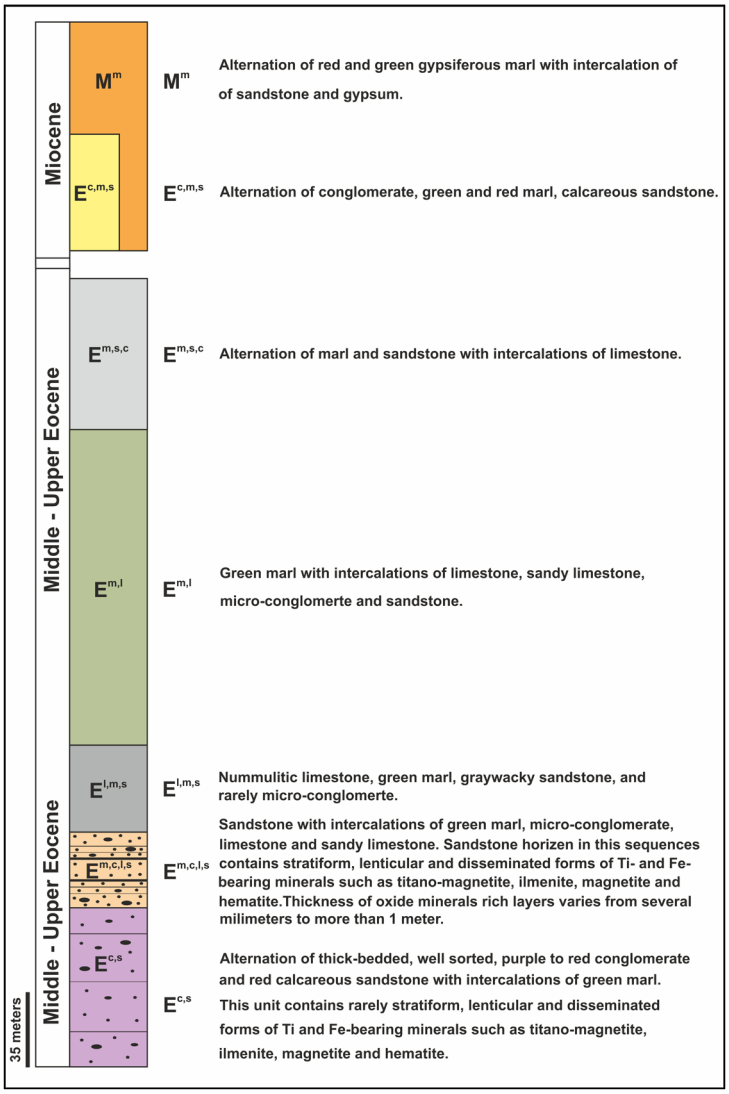
شکل ۶- a) توده گرانیتی به سن اواخر کرتاسه پسین (gr) که در توالی‌های آتشفشانی-رسوبی به سن اوایل کرتاسه پسین تزریق شده است. b) توالی‌های آتشفشانی-رسوبی اوایل کرتاسه پسین با سیل‌های دیوریتی تا مونزوگابرویی اواخر کرتاسه پسین در همبری با سنگ‌های آهکی و مارنی کرتاسه پسین. c، d، e) سیل‌های دیوریتی، مونزودیوریتی تا مونزوگابرویی اواخر کرتاسه پسین که در توالی آتشفشانی-رسوبی اوایل کرتاسه پسین نفوذ کرده است و به احتمال بسیار زیاد سنگ منشا کانی‌های تیتانیم و آهن‌دار هستند.

Figure 6- a) Late Cretaceous granitic body intruded into the Early Late Cretaceous volcanic-sedimentary sequences. b) Early Late Cretaceous volcanic-sedimentary sequences with Late Cretaceous diorite to monzo-gabbro sills in adjacent with Late Cretaceous limestones and marls. c, d, e) Late Cretaceous diorite, monzodiorite, and monzogabbro sills intruded into the Early Late Cretaceous volcanic-sedimentary sequences, and are probably the source rocks of Ti- and Fe-bearing minerals.

جدول ۱- برخی از نتایج سن‌سنجی ایزوتوپی بر روی توده‌های آذرین کرتاسه پسین در منطقه سبزوار.

Table 1. Some isotopic age dating results on the Late Cretaceous igneous bodies in the Sabzevar area.

Rock type	Age (Ma)	Area	Reference
Quartz diorite	92.8 ± 1.3	Arghash area (NE Iran)	Alaminia et al., 2013
Granite Granite Granite Diorite Rhyolite	101.1 100 98 75 99.2	South of Sabzevar	Kazemi et al., 2019b
Diorite	88 - 84	South of Sabzevar	Baroz et al., 1984
Basalt	81 - 77	South of Sabzevar	Lensch and Davoudzadeh, 1982
Plagiogranitic melts within granulite Plagiogranitic melts within granulite	107.2 105.2	Metamorphic rocks (North of Sabzevar)	Rossetti et al., 2010
Gabbro Plagiogranite Gabbro–norite	96.7±1 98±1 94±1	Sabzevar ophiolites	Nasrabady et al., 2023
Tonalite dike Plagiogranite (Torbat-e Heydarieh) Plagiogranite Plagiogranite	99.9 98.4 90.2 77.8	Ophiolite (North of Sabzevar)	Shafaii Moghadam et al., 2014



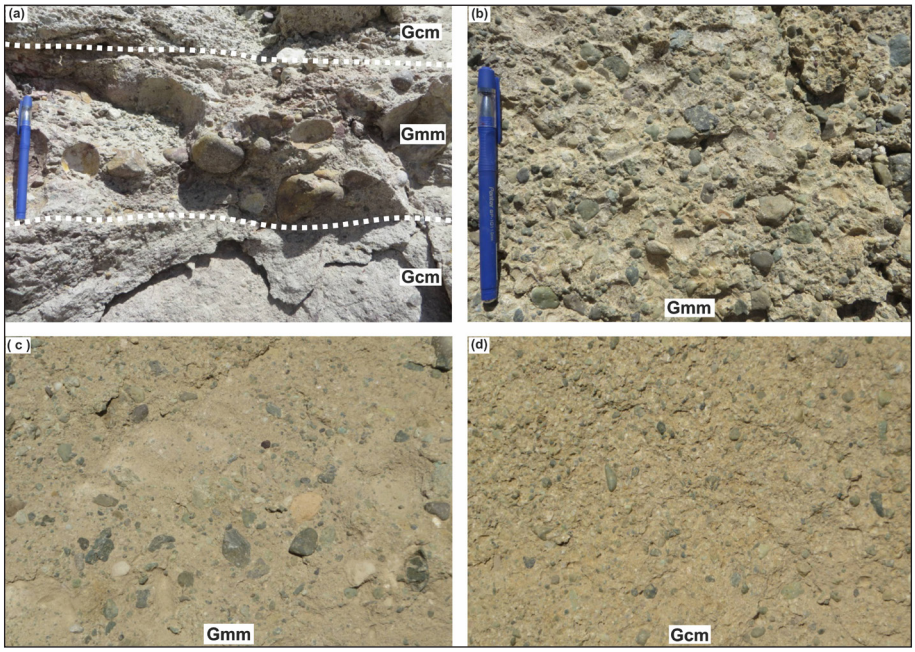
شکل ۷- ستون چینه‌شناسی واحدهای سنگی ائوسن میانی-پسین و وجود کانی‌های تیتانیم-آهن‌دار در واحدهای کنگلومرایی-ماسه‌سنگی ($E^{c,S}$) و مارنی-کنگلومرایی-آهکی-ماسه‌سنگی ($E^{m,c,l,S}$).

Figure 7. Stratigraphic column of middle-late Eocene rock units and existence of Ti- and Fe- bearing minerals into the conglomerate-sandstone ($E^{c,s}$) and marl-conglomerate-limestone-sandstone ($E^{m,c,l,s}$) units.

۳-۲-۲- سنگ‌رخساره‌ها

در مطالعات صحرایی، بیشتر عامل‌های سنگ‌شناسی، ساخت‌های رسوبی، طرح جریان‌های دیرینه، شکل هندسی، سطوح اصلی لایه‌بندی، رخساره‌های همراه و محتوای فسیلی بررسی می‌شود. مطالعه این موارد به شناسایی انواع سنگ‌رخساره‌ها (لیتوفاسیس‌ها) می‌انجامد. برای تفکیک سنگ‌رخساره‌ها می‌توان از منابع اطلاعاتی متفاوتی مثل لاگ‌های الکتریکی، مغزه‌ها، خرده‌های حاصل از حفاری و مطالعه رخنمون‌ها استفاده نمود که در این مطالعه، تکیه اصلی بر مطالعه رخنمون‌ها و نمونه‌های برداشت شده از آن بوده است. طبقه‌بندی و توصیف سنگ‌رخساره‌ها در توالی رسوبی مورد مطالعه بر اساس روش میال (Miall, 1996) صورت گرفته است، که بر این اساس و با بررسی مواردی چون سنگ‌شناسی، ساخت‌های رسوبی، شکل هندسی، سطوح لایه‌بندی، رخساره‌های همراه، طرح جریان‌های دیرینه و آثار فسیلی، تعداد ۳ گروه سنگ‌رخساره گراولی و دانه درشت (Gmm و Gcm)، سنگ‌رخساره ماسه‌ای و دانه متوسط (Sh و Sr) و سنگ‌رخساره گلی و دانه ریز (Fl) به شرح ذیل تشخیص داده شده است:

– **مجموعه سنگ‌رخساره گراولی:** ستبرای این مجموعه در توالی‌های رسوبی $E^{c,S}$ و $E^{m,c,l,S}$، از حدود ۰/۵ متر تا بیشینه ۱۰ متر تغییر می‌کند و بیشتر بخش‌های بالایی این توالی‌های رسوبی را تشکیل می‌دهد. اندازه قطعات سازنده آن‌ها در حد گراول تا گرانول است که در ماتریکسی از ماسه و سیلت قرار گرفته‌اند. جنس قطعات سازنده این مجموعه سنگ‌رخساره‌ای از سنگ‌های رسوبی (ماسه‌سنگ، شیل، سنگ آهک و قطعات فسیلی)، سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی (آندزیت، بازالت، دیوریت، گابرو و ...) و سنگ‌های دگرگونی (شیست، اسلیت و فیلیت) ترکیب یافته است. این مجموعه، شامل سنگ‌رخساره‌های Gmm و Gcm است. سنگ‌رخساره Gmm کنگلومرای درشت دانه، دارای ماتریکس (ماسه و سیلت)، جورشدگی خیلی ضعیف و فاقد لایه‌بندی (توده‌ای) و ساخت‌های رسوبی است (شکل‌های ۸-a تا c). سنگ‌رخساره Gcm میکروکنگلومراء، دارای ماتریکس (ماسه و سیلت)، جورشدگی ضعیف و فاقد لایه‌بندی (توده‌ای) و ساخت‌های رسوبی است (شکل‌های ۸-a تا d). این سنگ‌رخساره‌ها توسط جریان‌های خرده‌دار با نرخ رسوب‌گذاری بالا در نواحی نزدیک به منشا در سامانه‌های رودخانه‌ای بریده بریده تشکیل شده‌اند و از نظر شکل هندسی اغلب پهن و به شکل ورقه‌ای هستند (فرخ نژاد و همکاران، ۱۳۹۵؛ Miall, 1996; Martinson et al., 1999).



شکل ۸- تصاویری از سنگ‌رخساره‌های گراولی و دانه درشت در منطقه مورد مطالعه. a) تناوبی از سنگ‌رخساره‌های کنگلومرایی (Gmm) و میکروکنگلومرایی(Gcm). b، c) تصاویری نزدیک از سنگ‌رخساره Gmm با جورشدگی خیلی‌ضعیف. d) تصویری نزدیک از سنگ‌رخساره Gcm با جورشدگی ضعیف.

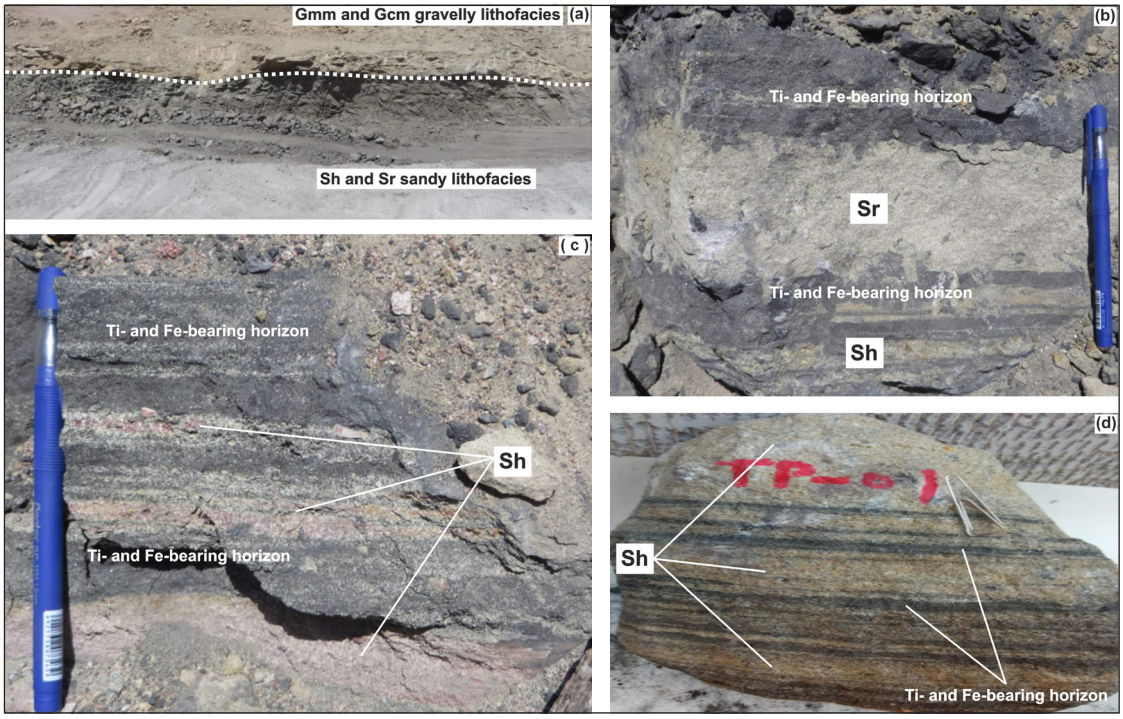
Figure 8. Photograhs of gravel and coarse-graind lithofacieses in the study area. a) Intercalations of conglomeratic (Gmm) and microconglomeratic (Gcm) lithofacieses. b, c) Close photograph from Gmm lithofacies with very poorly sorting. d) Close photograph from Gcm lithofacies with poorly sorting.

–**مجموعه سنگ‌رخساره ماسه‌ای:** ستبرای این مجموعه در توالی‌های رسوبی $E^{c,S}$ و $E^{m,c,l,S}$، از حدود ۰/۵ متر تا لایه‌های به ستبرای بیش از ۳ متر تغییر می‌کند و بیشتر بخش‌های تحتانی این توالی‌های رسوبی را تشکیل می‌دهد. جنس قطعات سازنده این مجموعه سنگ‌رخساره‌ای از قطعات سنگی (رسوبی، آتشفشانی و دگرگونی)، فلدسپارها، کوارتز و میکا ترکیب یافته است. از عوامل مهمی که در تشکیل آن‌ها نقش موثری دارند، می‌توان به جریان‌های کشندی و متناوب اشاره نمود (Jain et al., 2005; Friend and Dade, 2005). در این مجموعه ساخت‌های رسوبی فراوان و متعددی وجود دارد که می‌توان به چینه‌بندی عادی، طبقه‌بندی مورب، لامیناسیون مورب، لایه‌بندی افقی، موج‌نقش (ریپل‌مارک) و ساخت‌های کنده شده و پر شده اشاره کرد. این مجموعه، شامل سنگ‌رخساره‌های Sh و Sr است

(شکل‌های ۹-a و d). سنگ‌رخساره Sh مهم‌ترین رخساره ماسه‌ای در منطقه مورد مطالعه است. اندازه قطعات سازنده آن‌ها در حد ماسه‌های ریز تا درشت دانه است و گاهی به‌طور پراکنده دارای گراول هستند. ستبرای آن‌ها از حدود ۰/۵ متر تا لایه‌هایی به ستبرای بیش از ۳ متر تغییر می‌کند.

مهم‌ترین ساختمان‌های رسوبی شامل لامیناسیون و لایه‌بندی افقی است. سنگ‌رخساره Sr مهم‌ترین رخساره‌ی ماسه‌ای در منطقه مورد مطالعه است. اندازه قطعات سازنده آن‌ها در حد ماسه‌های ریز دانه با جورشدگی خوب است. از ویژگی‌های این سنگ‌رخساره می‌توان به وجود لامیناسیون‌های مورب ریپلی اشاره کرد. این سنگ‌رخساره به صورت متناوب با سنگ‌رخساره Sh مشاهده می‌شود، که گاهی اوقات ستبرای آن‌ها به بیش از ۱ متر می‌رسد. سنگ‌رخساره‌های ماسه‌ای، از نظر شکل هندسی به حالت صفحه‌ای و گوه‌ای شکل است و در زمانی که نرخ رسوب‌گذاری متوسط بوده است در سامانه‌های رودخانه‌ای بریده بریده ماسه‌ای بر جای گذاشته شده اند. معمولا در رژیم‌های جریانی پایین و بالا تشکیل شده‌اند و ممکن است رسوبات پرکننده کانال را تشکیل دهند (موسوی حرمی و همکاران، ۱۳۸۵؛ Harms and Fahnestock, 1965). سنگ‌رخساره‌های ماسه‌ای و به‌ویژه سنگ‌رخساره Sh دربردارنده افق‌ها، عدسی‌ها و دانه‌های پراکنده از کانی‌های آهن-تیتانیم‌دار هستند (شکل‌های ۹-b تا d). ستبرای افق‌های غنی از کانی‌های آهن-تیتانیم‌دار از حد میلی‌متر، سانتی‌متر تا لایه‌هایی به ستبرای بیش از ۱ متر تغییر می‌کند.

– **مجموعه سنگ‌رخساره گلی:** در منطقه مورد مطالعه، این سنگ‌رخساره از ستبرای کمتری در مقایسه با انواع گراولی و ماسه‌ای برخوردار است. این مجموعه، شامل سنگ‌رخساره Fl است و تنها از لامیناسیون افقی تشکیل شده است و در مجموع به شکل بین‌لایه‌ای با ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز تا متوسط قرار داشته و ستبرای آن در حد چندین سانتی‌متر است. این رخساره سنگی از اهمیت چندانی در واحدهای سنگ-چینه‌ای $E^{c,S}$ و $E^{m,c,l,S}$ برخوردار نمی‌باشد. از آن جا که ستبرای این رخساره‌سنگی (لیتوفاسیس) بسیار کم است و در بین رسوبات دانه درشت به شکل شاخصی قرار دارند می توان از آن برای انطباق و شناسایی دسته رخساره‌ها در ارتباط با چینه‌نگاری سکانسی استفاده نمود (موسوی حرمی و همکاران، ۱۳۸۵).



شکل ۹- a) تصویری از موقعیت چینه‌ای سنگ‌رخساره‌های گراولی و ماسه‌ای در منطقه مورد مطالعه. b، c، d) تناوبی از سنگ‌رخساره ماسه‌ای نوع Sh و Sr و افق‌های غنی از اکسیدهای آهن-تیتانیم.

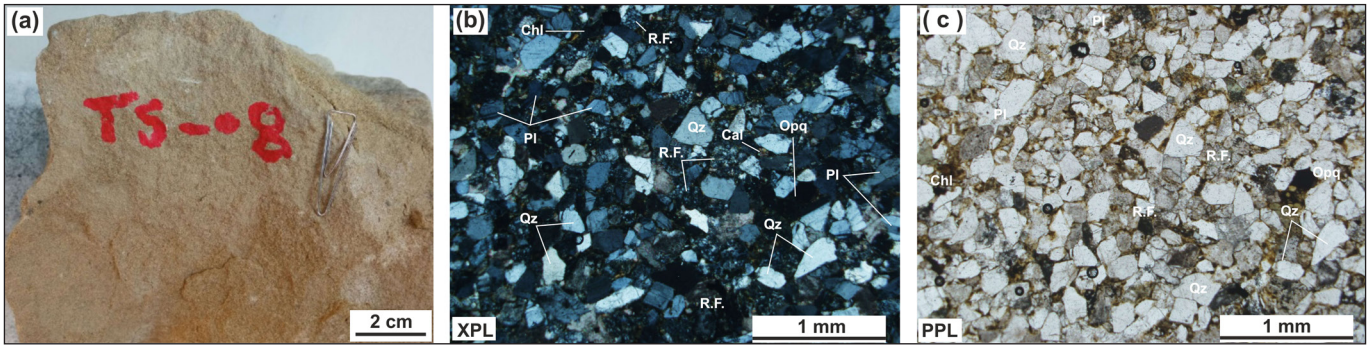
Figure 9- a) Photograh of stratigraphic location of gravel and sandy lithofacies in the study area. b, c, d) Succession of Sh and Sr sandy lithofacies, and Ti- and Fe-oxides rich horizons.

۳-۲-۳- سنگ‌نگاری ماسه‌سنگ‌ها

به منظور تکمیل مطالعات صحرایی، بررسی دقیق‌تر واحدهای مختلف و در نهایت، شناسایی و تفکیک واحدهای سنگی، تعداد ۲۰ عدد مقطع نازک و ۲۵ مقطع نازک-صیقلی تهیه شد و در آزمایشگاه با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان عبوری- انعکاسی مورد مطالعه قرار گرفت. با تکیه بر ترکیب کانی‌شناسی اجزای تشکیل دهنده چهارچوب سنگ و اجزای فرعی، بلوغ بافتی و کانی‌شناسی، میزان ماتریکس، سیمان و نوع آن و سایر عوارض دیاژنتیکی، نمونه‌های برداشت شده بر اساس طبقه‌بندی فولک (Folk, 1974) نام‌گذاری شدند. بر اساس مشاهدات صحرایی و مطالعه نمونه‌های دستی و میکروسکوپی، ماسه‌سنگ‌های این منطقه دارای بافت‌های ریزدانه، متوسط‌دانه و درشت‌دانه می‌باشند. تفاوت در ابعاد ذرات سازنده ماسه‌سنگ‌ها در کنار ویژگی‌هایی مانند رنگ و جنس سبب ایجاد لایه‌بندی می‌شود. عوامل گوناگونی مانند کانی‌شناسی ذرات، فاصله حمل و نقل، ریخت‌شناسی مسیر انتقال و ته‌نشست، سرعت حمل، انرژی جریان آب و ... اندازه ذرات رسوبی را کنترل می‌کنند. بنابراین بررسی ابعاد ذرات سازنده ماسه‌سنگ‌ها همراه با ویژگی‌های دیگر در بازسازی محیط‌های رسوبی دیرینه با اهمیت است. دامنه اندازه ذرات در ماسه‌سنگ‌ها از ۷۰ میکرون تا ۴ میلی‌متر تغییر می‌کند. اگر اندازه ذرات از ۴ میلی‌متر

بزرگ‌تر باشد، ماسه‌سنگ به میکروکنگلومرا و کنگلومرا تغییر می‌کند. اگر اندازه ذرات کوچک‌تر از ۷۰ میکرون باشد، ماسه‌سنگ به سیلتستون متمایل می‌شود. در ادامه، ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافتی نمونه‌های انتخابی از هر یک از ماسه‌سنگ‌های ریز، متوسط و درشت دانه به‌طور جداگانه توصیف می‌شود.

– **ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز:** بر اساس مشاهدات صحرایی و مطالعه نمونه‌های دستی و میکروسکوپی، برخی از واحدهای ماسه‌سنگی در منطقه مورد مطالعه از اجزای دانه‌ریز تشکیل شده است. در ماسه‌سنگ‌های ریز دانه، اندازه ذرات سازنده از حدود ۷۰ میکرون تا ۵۰۰ میکرون تغییر می‌کند که اندازه متوسط ابعاد ذرات در حدود ۲۵۰ میکرون است. این دسته از ماسه‌سنگ‌ها بیشتر از دانه‌های زاویه‌دار، نیمه‌زاویه‌دار تا نیمه‌گرد شده ترکیب یافته‌اند که نشان دهنده فرایندهای انتقال کوتاه تا متوسط و تا حدودی نزدیک به محل منشا می‌باشد. به‌طور کلی، این سنگ‌ها دارای جورشدگی متوسط تا خوب هستند (شکل‌های ۱۰-a تا c). درجه جورشدگی رسوب می‌تواند انرژی، سرعت یا مدت نهشته‌گذاری و نیز فرایند موثر در انتقال رسوب (رود، جریان واریزه، فرایندهای بادی، یخچال طبیعی و...) را نشان دهد. جورشدگی رسوبات پس از نهشته‌گذاری نیز می‌تواند تحت تاثیر فعالیت مجدد مواد قرار گیرد. سنگ‌های حاصل از رسوبات با جورشدگی خوب، معمولا متخلخل و نفوذپذیر هستند، در حالی که سنگ‌های با جورشدگی ضعیف، به‌ویژه وقتی دانه‌ریز باشند، تخلخل و نفوذپذیری پایینی دارند. ترکیب کانی‌شناسی اصلی این ماسه‌سنگ‌ها شامل کوارتز، فلدسپار و قطعات سنگی است که متوسط فراوانی آن‌ها به‌ترتیب ۳۵، ۳۰ و ۱۵ درصد حجمی است. کانی‌های فرعی این سنگ‌ها شامل پیروکسن، آمفیبول، کلریت، بیوتیت، مگنتیت و کلسیت است. ترکیب کانی‌شناسی ماسه‌سنگ‌های منطقه مورد مطالعه، چند منشایی بودن آن‌ها را نشان می‌دهد و ذرات سازنده آن‌ها از منابع مختلف آذرین، دگرگونی و رسوبی تامین شده است. میزان ماتریکس آن‌ها کمتر از ۵ درصد است. سیمان این ماسه‌سنگ‌ها بیشتر از کربنات تشکیل شده است. سیمان به‌عنوان یک ماده چسبنده عمل کرده و به حفظ یکپارچگی سنگ کمک می‌کند. افزون بر سیمان کربناته، در برخی از نمونه‌ها سیمان‌های رسی، اکسید آهنی و سیلیکاتی نیز مشاهده می‌شود. از نظر بلوغ بافتی، این ماسه‌سنگ‌ها نیمه‌بالغ ارزیابی می‌شوند، زیرا ذرات فلدسپار و برخی کانی‌های نامقاوم دیگر به مقدار زیاد در ترکیب سنگ حضور دارند (شکل‌های ۱۰-a تا c).



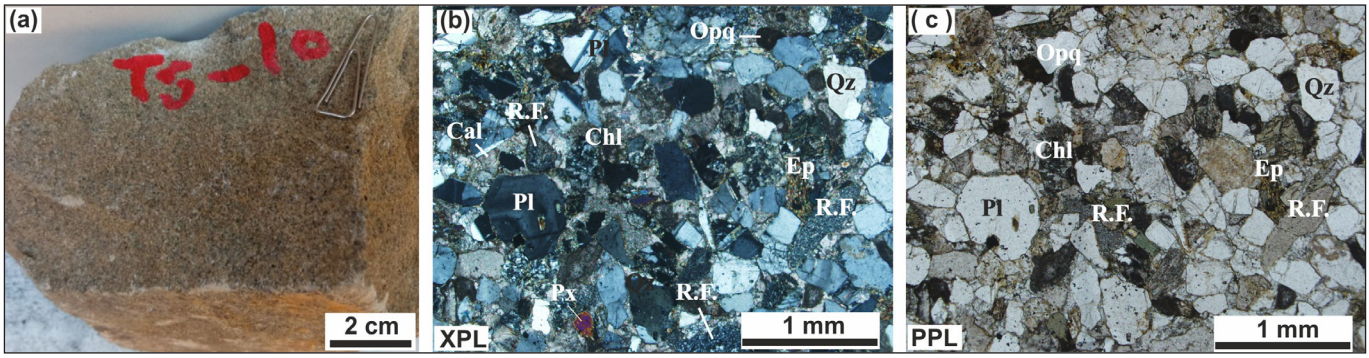
شکل ۱۰- a) تصویر نمونه دستی ماسه‌سنگ ریز دانه. b، c) تصاویر میکروسکوپی از ماسه‌سنگ ریز دانه در نورهای XPL و PPL که کوارتز، پلاژیوکلاز و قطعات سنگی بخش عمده ترکیب این نمونه را تشکیل می‌دهند و میزان ماتریکس کمتر از ۵ درصد است.

Figure 10- a) Hand sample photograh of fine-grained sandstone. b, c) Photomicrographs of fine grain sandstone under XPL and PPL lights, which quartz, plagioclase, and rock fragments form the major components of this sample, and matrix content is less than 5 percent. Cal: Calcite; Chl: Chlorite; Opq: Opaque mineral; Pl: Plagioclase; Qz: Quartz; R.F.: Rock fragment. (Abbreviations for names of minerals from Whitney and Evans (2010)).

– **ماسه‌سنگ‌های دانه متوسط:** بر اساس مشاهدات صحرایی و مطالعه نمونه‌های دستی و میکروسکوپی، برخی از واحدهای ماسه‌سنگی در منطقه مورد مطالعه از اجزای دانه متوسط تشکیل شده است. در ماسه‌سنگ‌های متوسط دانه، اندازه ذرات سازنده از حدود ۱۲۰ میکرون تا ۷۰۰ میکرون تغییر می‌کند که اندازه متوسط ابعاد ذرات در حدود ۴۰۰ میکرون است (شکل‌های ۱۱-a تا c). این دسته از ماسه‌سنگ‌ها بیشتر از دانه‌های زاویه‌دار، نیمه‌زاویه‌دار تا نیمه‌گرد شده ترکیب یافته‌اند که نشان دهنده فرایندهای انتقال کوتاه تا متوسط و تا حدودی نزدیک به محل منشا می‌باشد. به‌طور کلی، این سنگ‌ها دارای جورشدگی متوسط تا خوب هستند. ترکیب کانی‌شناسی اصلی این ماسه‌سنگ‌ها شامل کوارتز، پلاژیوکلاز و قطعات سنگی است که متوسط فراوانی آن‌ها به‌ترتیب ۴۵، ۲۰ و ۲۰ درصد حجمی است. کانی‌های فرعی این سنگ‌ها شامل پیروکسن، آمفیبول، کلریت، بیوتیت، مگنتیت و کلسیت است که در مجموع حدود ۱۰ درصد ترکیب سنگ را به خود اختصاص می‌دهند. میزان ماتریکس آن‌ها کمتر از ۵ درصد است. ترکیب کانی‌شناسی ماسه‌سنگ‌های منطقه مورد مطالعه، چند منشایی بودن آن‌ها را نشان می‌دهد و ذرات سازنده آن‌ها از منابع مختلف آذرین، دگرگونی و رسوبی تامین شده است. سیمان این ماسه‌سنگ‌ها بیشتر از کربنات تشکیل شده است. افزون بر سیمان کربناته، در برخی از نمونه‌ها سیمان‌های رسی، اکسید آهنی و سیلیکاتی نیز مشاهده می‌شود. از نظر بلوغ بافتی، این ماسه‌سنگ‌ها به‌نسبت بالغ ارزیابی می‌شوند، زیرا ذرات فلدسپار و برخی کانی‌های نامقاوم دیگر در مقایسه با ماسه‌سنگ‌های ریز دانه کمتر است (شکل‌های ۱۱-a تا c).

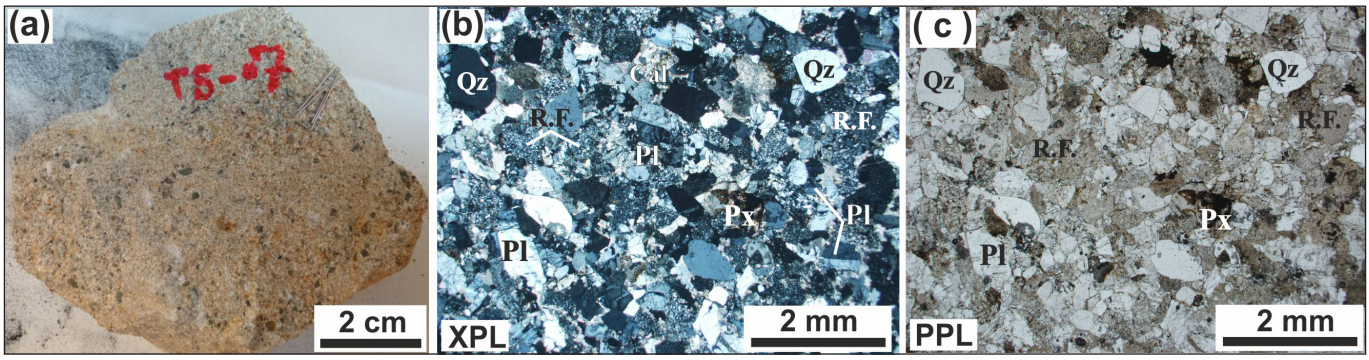
– **ماسه‌سنگ‌های دانه‌درشت:** بر اساس مشاهدات صحرایی و مطالعه نمونه‌های دستی و میکروسکوپی، برخی از واحدهای ماسه‌سنگی در منطقه مورد مطالعه از اجزای دانه‌درشت تشکیل شده است. در ماسه‌سنگ‌های درشت‌دانه، اندازه ذرات سازنده از حدود ۲۰۰ میکرون تا ۱۰۰۰ میکرون تغییر می‌کند که اندازه متوسط ابعاد ذرات در حدود ۶۰۰ میکرون است (شکل‌های ۱۲-a تا c). این دسته از ماسه‌سنگ‌ها بیشتر از دانه‌های زاویه‌دار، نیمه‌زاویه‌دار تا نیمه‌گرد شده ترکیب یافته‌اند که نشان دهنده

فرایندهای انتقال کوتاه تا متوسط و تا حدودی نزدیک به محل منشا می‌باشد. به‌طور کلی، این سنگ‌ها دارای جورشدگی ضعیف تا متوسط هستند. ترکیب کانی‌شناسی اصلی این ماسه‌سنگ‌ها شامل کوارتز، فلدسپار و قطعات سنگی است که متوسط فراوانی آن‌ها به‌ترتیب ۳۰، ۱۵ و ۴۵ درصد حجمی است. کانی‌های فرعی این سنگ‌ها شامل پیروکسن، آمفیبول، کلریت، بیوتیت، مگنتیت و کلسیت است که در مجموع حدود ۵ درصد ترکیب سنگ را به خود اختصاص می‌دهند. میزان ماتریکس آن‌ها کمتر از ۵ درصد است. ترکیب کانی‌شناسی ماسه‌سنگ‌های منطقه مورد مطالعه، چند منشایی بودن آن‌ها را نشان می‌دهد و ذرات سازنده آن‌ها از منابع مختلف آذرین، دگرگونی و رسوبی تامین شده است. سیمان این ماسه‌سنگ‌ها بیشتر از کربنات تشکیل شده است. افزون بر سیمان کربناته، در برخی از نمونه‌ها سیمان‌های رسی، اکسید آهنی و سیلیکاتی نیز مشاهده می‌شود. از نظر بلوغ بافتی، این ماسه‌سنگ‌ها دارای بلوغ بافتی بیشتر از انواع دانه ریز و دانه متوسط است، زیرا ذرات فلدسپار و برخی کانی‌های نامقاوم دیگر در مقایسه با ماسه‌سنگ‌های ریز دانه و متوسط دانه کمتر است (شکل‌های ۱۲-a تا c).



شکل ۱۱- a) تصویر نمونه دستی ماسه‌سنگ متوسط دانه. b، c) تصاویر میکروسکوپی از ماسه‌سنگ متوسط دانه در نورهای XPL و PPL که کوارتز، پلاژیوکلاز و قطعات سنگی بخش عمده ترکیب این نمونه را تشکیل می‌دهند و میزان ماتریکس کمتر از ۵ درصد است.

Figure 11- a) Hand sample photograh of medium-grained sandstone. b, c) Photomicrographs of medium grain sandstone under XPL and PPL lights, which quartz, plagioclase, and rock fragments form the major components of this sample, and matrix content is less than 5 percent. Cal: Calcite; Chl: Chlorite; Ep: Epidote; Opq: Opaque mineral; Pl: Plagioclase; Px: Pyroxene; Qz: Quartz; R.F.: Rock fragment. (Abbreviations for names of minerals from Whitney and Evans (2010)).



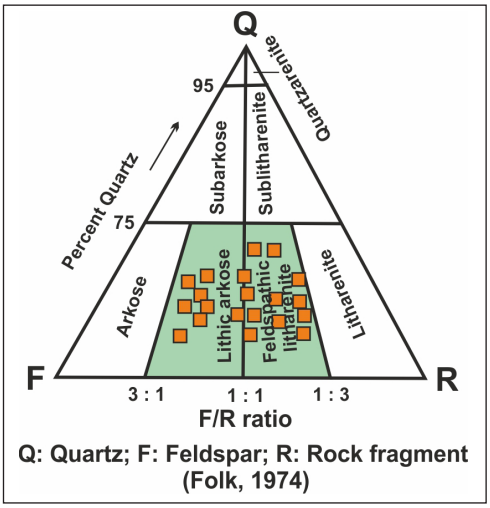
شکل ۱۲- a) تصویر نمونه دستی ماسه‌سنگ درشت دانه. b، c) تصاویر میکروسکوپی از ماسه‌سنگ درشت دانه در نورهای XPL و PPL که کوارتز، پلاژیوکلاز و قطعات سنگی بخش عمده ترکیب این نمونه را تشکیل می‌دهند و میزان ماتریکس کمتر از ۵ درصد است.

Figure 12- a) Hand sample photograh of coarse-grained sandstone. b, c) Photomicrographs of coarse grain sandstone under XPL and PPL lights, which quartz, plagioclase, and rock fragments form the major components of this sample, and matrix content is less than 5 percent. Cal: Calcite; Chl: Chlorite; Ep: Epidote; Opq: Opaque mineral; Pl: Plagioclase; Px: Pyroxene; Qz: Quartz; R.F.: Rock fragment. (Abbreviations for names of minerals from Whitney and Evans (2010)).

۳-۲-۴- طبقه‌بندی ماسه‌سنگ‌ها

تقسیم‌بندی ماسه‌سنگ‌ها بر پایه بافت آن‌ها به ۲ دسته انجام می‌شود. دسته نخست، ماسه‌سنگ‌هایی هستند که ذرات ماسه موجود در آن‌ها زیاد است و کم‌تر از ۱۵ درصد ماتریکس در آن‌ها دیده می‌شود. دسته دوم، ماسه‌سنگ‌هایی می‌باشند که بیش از ۱۵ درصد ماتریکس در بافت خود دارند. برای طبقه‌بندی ماسه‌سنگ‌های دارای ماتریکس کم از نمودار مثلثی استفاده می‌شود که رئوس آن از کوارتز، فلدسپات و خرده‌سنگ تشکیل شده است. بر این اساس، ماسه‌سنگ‌ها به انواع کوارتزآرنایت، ساب‌آرکوز، ساب‌لیتارنایت، آرکوزیک‌آرنایت، لیتیک‌آرنایت و فلدسپاتیک

لیتیک‌آرنایت تقسیم می‌شوند (Pettijohn et al., 1973; Folk, 1974). دسته دوم، ماسه‌سنگ‌های حاوی ماتریکس زیادی هستند، به‌طوری که میزان ماتریکس موجود در سنگ از ۱۵ درصد بیش‌تر است. برای نام‌گذاری این سنگ‌ها واژه وک به‌کار می‌رود. در این رده‌بندی نیز از نمودار مثلثی استفاده می‌شود که در رئوس آن کوارتز ، فلدسپات و خرده سنگ قرار دارد و بر اساس مقادیر این سازنده‌ها، ماسه‌سنگ‌ها به انواع فلدسپاتیک گری‌وک، لیتیک گری‌وک و کوارتز وک دسته‌بندی می‌شوند (Pettijohn et al., 1973; Folk, 1974). به‌طوری که در بخش سنگ‌نگاری ماسه‌سنگ‌ها گفته شد، ترکیب کانی‌شناسی اصلی این ماسه‌سنگ‌ها شامل کوارتز، فلدسپار و قطعات سنگی است. درصد فراوانی کوارتز در انواع ماسه‌سنگ‌های این منطقه از ۳۰ تا ۴۵ درصد تغییر می‌کند. مقدار فلدسپار در نمونه‌های ماسه‌سنگ از ۱۵ تا ۳۰ درصد و مقدار قطعات سنگی از ۱۵ تا ۴۵ درصد در نوسان است. کانی‌های فرعی این سنگ‌ها شامل پیروکسن، آمفیبول، کلریت، بیوتیت، کانی‌های تیره و کلسیت است. درصد ماتریکس در نمونه‌های ماسه‌سنگ مورد مطالعه کمتر از ۵ درصد می‌باشد و سیمان آن‌ها بیش‌تر از کربنات تشکیل شده است. از نظر بلوغ بافتی، این ماسه‌سنگ‌ها در دسته نیمه‌بالغ تا به‌نسبت بالغ ارزیابی می‌شوند. برای طبقه‌بندی و نام‌گذاری ماسه‌سنگ‌های منطقه مورد مطالعه از نمودار مثلثی فولک (Folk, 1974) استفاده شده است و ماسه‌سنگ‌ها بر اساس درصدهای کوارتز (۳۰ تا ۴۵ درصد)، فلدسپار (۱۵ تا ۳۰ درصد) و قطعات سنگی (۱۵ تا ۴۵ درصد) در گروه لیتیک آرکوز و فلدسپاتیک لیتارنایت قرار می‌گیرند (شکل ۱۳). ماسه‌سنگ‌های ساب‌آرکوز و لیتیک آرکوز در محیط‌های رسوب‌گذاری با انرژی متوسط تشکیل می‌شوند، در حالی که ماسه‌سنگ‌های ساب‌لیتارنایت، فلدسپاتیک لیتارنایت و لیتیک‌آرنایت معمولا در محیط‌های پرانرژی مانند رودخانه‌های پرشتاب و سواحل تشکیل می‌شوند (Pettijohn et al., 1973; Folk, 1974). ماسه‌سنگ‌های منطقه مورد مطالعه با توجه به ترکیب سنگ‌شناسی آن‌ها (لیتیک‌آرکوز و فلدسپاتیک لیتارنایت) در محیط رسوب‌گذاری با انرژی متوسط تا بالا نهشته شده‌اند.



شکل ۱۳- طبقه‌بندی ماسه‌سنگ‌ها بر اساس نمودار مثلثی فولک (Folk, 1974)، که تمامی نمونه‌ها در محدوده لیتیک آرکوز و فلدسپاتیک لیتارنایت قرار گرفته‌اند.

Figure 13. Classification of sandstones based on the Folk ternary diagram (Folk, 1974), which all samples located within lithic arkose and feldspathic litharenite area.

۳-۳- بافت و کانی‌شناسی کانسار

یکی از کارهای مهم و اساسی در بررسی مواد معدنی، مطالعه بافت و کانی‌شناسی است. با مطالعه کانی‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از روش‌های ماکروسکوپی، میکروسکوپی، پراش‌سنجی پرتو ایکس و ریزکاوش الکترونی می‌توان انواع کانی‌ها، ترکیب شیمیایی، تغییرات ترکیب شیمیایی در ساختار کانی‌ها، میانبارهای کانیایی و انواع بافت‌ها را مطالعه نمود.

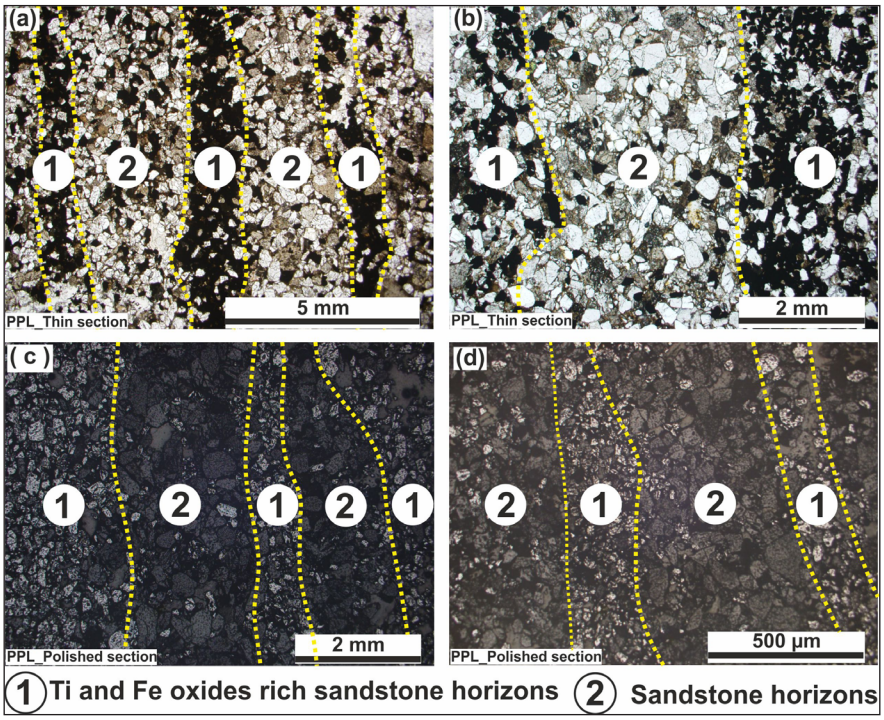
۳-۳-۱- بافت کانی‌های معدنی

به‌طوری که در بخش زمین‌شناسی ماسه‌سنگ‌ها شرح داده شد، افق‌های ماسه‌سنگی در واحد مارنی-کنگلومرایی-آهکی-ماسه‌سنگی ($E^{m,c,l,S}$)، در بر دارنده مقادیر شایان توجهی از اکسیدهای آهن-تیتانیم‌دار است. ستبرای افق‌های ماسه‌سنگی در توالی‌های رسوبی، از حدود ۰/۵ متر تا لایه‌هایی به ستبرای بیش از ۱۰ متر تغییر می‌کند. در داخل طبقات ماسه‌سنگی، کانی‌های آهن-تیتانیم‌دار به صورت‌های لایه‌ای (چینه‌سان)، عدسی شکل، میان‌دانه‌ای و دانه‌پراکنده مشاهده می‌شود.

– **بافت چینه‌سان:** مشاهدات زمین‌شناسی صحرایی و مطالعه نمونه‌های دستی نشان می‌دهد که شکل چینه‌سان (لایه‌ای)، بافت چیره ماده معدنی در ماسه‌سنگ‌های جنوب سبزوار است. این نوع بافت به‌صورت لایه‌هایی به‌موازات لایه‌بندی ماسه‌سنگ‌ها دیده می‌شود. رنگ افق‌های ماسه‌سنگی از خاکستری روشن، خاکستری، خاکستری مایل به سبز، خاکستری تیره تا تیره تغییر می‌کند. رنگ تیره افق‌های ماسه‌سنگی به‌دلیل درصد بسیار زیاد اکسیدهای تیتانیم و آهن است (شکل‌های ۳، ۹، ۱۴). ستبرای لایه‌های غنی از کانی‌های تیتانیم و آهن‌دار معمولا از حد میلی‌متر، سانتی‌متر تا لایه‌هایی به ستبرای بیش از ۱ متر تغییر می‌کند. از نظر مطالعات سنگ‌رخساره‌ای، کانی‌های تیتانیم و آهن‌دار در سنگ‌رخساره ماسه‌ای و در ماسه‌سنگ‌های با دانه‌بندی ریز تا متوسط تمرکز دارند (شکل ۹). تشکیل بافت چینه‌سان، بیشتر در محیط‌های رسوبی آرام، مانند دشت‌های سیلابی یا حوضه‌های بسته صورت می‌گیرد و کانه‌ها هم‌زمان با سایز اجزای سازنده سنگ میزبان نهشته می‌شود. این محیط‌ها اجازه می‌دهند که مواد معدنی به‌صورت یکنواخت در طول لایه‌بندی ته‌نشین شوند. وجود آب‌های غنی از ذرات آواری تیتانومگنتیت، ایلمنیت و مگنتیت از عوامل اصلی در تشکیل افق‌های غنی از کانی‌های تیتانیم و آهن‌دار است. وجود سیمان کربناتی و گاه سیلیسی، رسی و اکسید آهنی، نقش مهمی در تثبیت و حفظ کانی‌ها و کانه‌ها داشته است، چرا که حضور سیمان سبب افزایش سختی و انسجام لایه‌های رسوبی شده و آن‌ها را در برابر تغییرات پس از رسوب‌گذاری محافظت می‌کند.

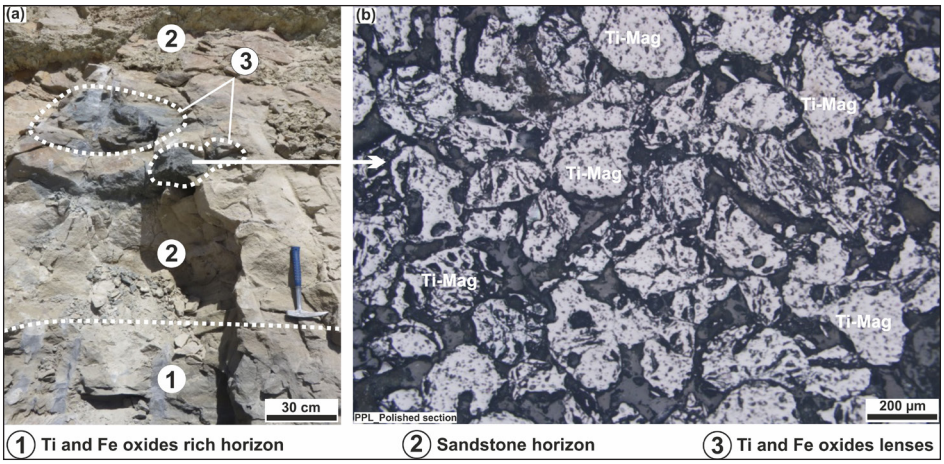
– **بافت عدسی شکل:** مشاهدات زمین‌شناسی صحرایی نشان می‌دهد که کانی‌های

تیتانیم و آهن‌دار به شکل‌های عدسی نیز در ماسه‌سنگ‌های میزبان وجود دارند. بافت عدسی کانه‌ها در ماسه‌سنگ‌های منطقه مورد مطالعه به گستردگی بافت لایه‌ای نیست و به‌ندرت مشاهده می‌شود. طول عدسی‌های محتوی کانی‌های تیتانیم و آهن‌دار نیز از حدود چند سانتی‌متر تا ۵۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند (شکل‌های ۱۵-a و b). بافت عدسی نیز در سنگ‌رخساره ماسه‌ای و در ماسه‌سنگ‌های با دانه‌بندی ریز تا متوسط تشکیل شده است.



شکل ۱۴- تصاویر میکروسکوپی از بافت چینه‌سان که تناوب افق‌های ماسه‌سنگ و افق‌های غنی از کانی‌های تیتانیم و آهن‌دار را در بر دارد. a، b) تصاویر میکروسکوپی از مقاطع نازک که افق‌های غنی از کانی‌های کدر را نشان می‌دهد. c، d) تصاویر میکروسکوپی از مقاطع صیقلی که افق‌های غنی از اکسیدهای تیتانیم و آهن را نشان می‌دهد.

Figure 14. Photomicrograph of stratiform texture contain successions of sandstone and Ti- and Fe-rich horizons. a, b) Photomicrographs of thin sections show that opaque minerals-rich horizons. c, d) Photomicrographs of polished-sections show that Ti and Fe oxides-rich horizons.



شکل ۱۵- a) تصویر صحرایی از بافت عدسی از کانی‌های تیتانیم-آهن‌دار در داخل افق ماسه‌سنگی. b) تصویر میکروسکوپی از مقاطع صیقلی از بافت عدسی کانسار که تمرکز توده‌ای از اکسیدهای تیتانیم و آهن (بیشتر تیتانومگنتیت) را نشان می‌دهد.

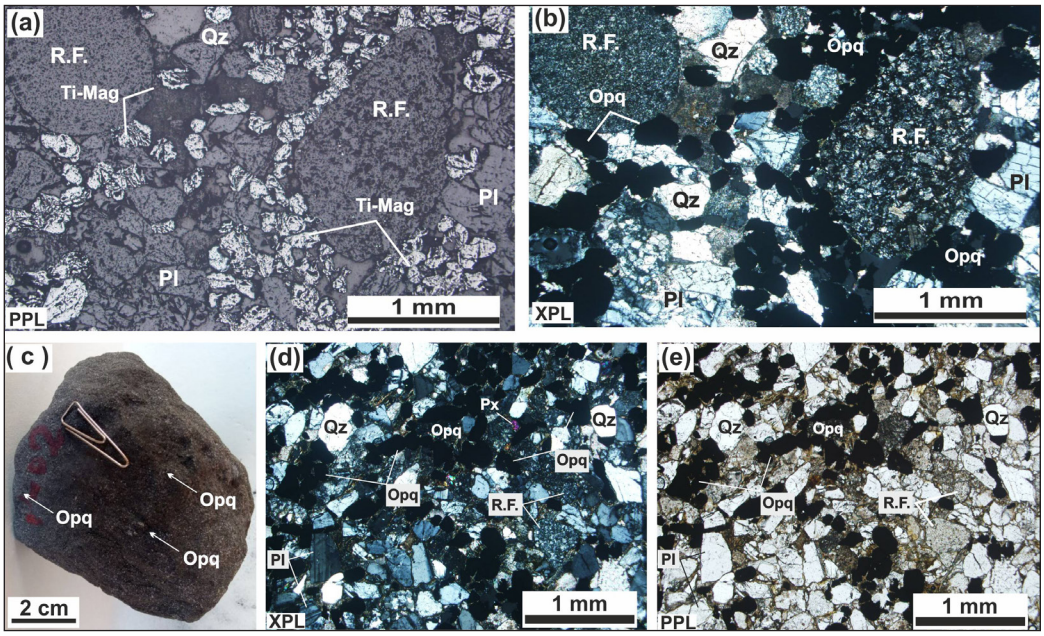
Figure 15- a) Field photograph of lenticular texture of Ti- and Fe-bearing minerals into the sandstone horizon. b) Photomicrograph of polished-section from lenticular texture show that massive concentration of Ti and Fe oxides (mostly titano-magnetite).

– **بافت میان‌دانه‌ای:** بافت میان‌دانه‌ای یکی دیگر از بافت‌های متداول در ماسه‌سنگ‌های جنوب سبزوار است. در این نوع بافت، فضای میان دانه‌های کوارتز، فلدسپار و قطعه‌سنگ‌ها توسط کانی‌های اکسیدی تیتانیم و آهن پر شده است (شکل‌های ۱۶-a و b). این ویژگی نشان‌دهنده تمرکز مواد معدنی در طول رسوب‌گذاری و ته‌نشست اجزای سازنده ماسه‌سنگ‌ها است.

– **بافت دانه‌پراکنده:** در این نوع بافت، کانی‌های تیتانیم و آهن‌دار به‌صورت ذرات پراکنده و تا حدودی یکنواخت در میان اجزای سازنده ماسه‌سنگ‌ها مشاهده می‌شود. بافت دانه‌پراکنده در مقیاس صحرایی و رخنمون‌ها قابل مشاهده نیست و در نمونه‌های دستی نیز به‌دلیل ریز بودن کانی‌های آهن و تیتانیم‌دار به‌سختی با عدسی قابل مشاهده است، اما در نمونه‌های میکروسکوپی به‌سادگی قابل تشخیص است ذرات کانه‌ها از ۱۰ میکرون تا ۲۵۰ میکرون متغیر است که در این میان بیشتر دانه‌ها دارای اندازه متوسط ۱۵۰ میکرون هستند (شکل‌های ۱۶-c تا e). پراکندگی ذرات معدنی نشان‌دهنده کاهش انرژی محیط رسوب‌گذاری و نبود فرایندهای تمرکز مکانیکی قوی در زمان تشکیل است.

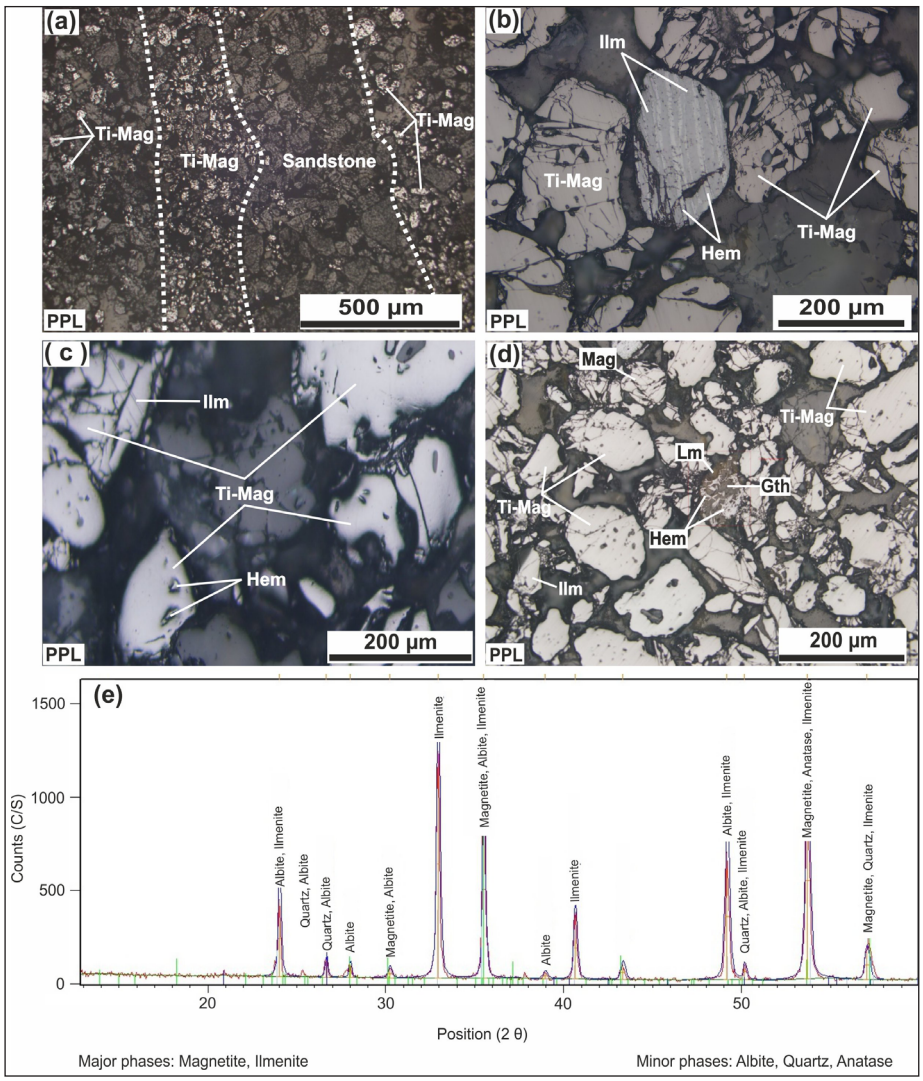
۳-۳-۲- کانی‌شناسی کانسار

کانی‌شناسی میکروسکوپی یکی از روش‌های کلیدی در مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی است، که برای شناسایی کانی‌ها و تعیین بافت آن‌ها استفاده می‌شود. مطالعات کانی‌شناسی به شناسایی تیتانومگنتیت، ایلمنیت، مگنتیت، هماتیت و گوتیت در نمونه‌ها انجامیده است. افزون بر این، کوارتز، پلاژیوکلاز (آلبیت)، قطعات سنگ‌های رسوبی، آذرین و دگرگونی و به مقدار کم پیروکسن، آمفیبول، بیوتیت، کلریت، اپیدوت، کلسیت و کانی‌های رسی نیز کانی‌های اکسیدی را در ترکیب ماسه‌سنگ‌ها همراهی می‌کنند. تیتانومگنتیت، فراوان‌ترین کانی اکسیدی در این نمونه‌ها است. این کانی محتوی اکسیدهای تیتانیم و آهن با فرمول عمومی $Fe^{2+}(Fe^{3+},Ti)_2O_4$ است. در حقیقت، تیتانومگنتیت محلول جامد حدواسط میان کانی تیتانیم‌دار (ایلمنیت، $FeTiO_3$) و کانی آهن‌دار (مگنتیت، Fe_3O_4) است. از این رو، ترکیب شیمیایی و خواص نوری تیتانومگنتیت در دامنه کانی‌های ایلمنیت و مگنتیت قرار دارد. این ویژگی ترکیبی، شناسایی تیتانومگنتیت را با روش‌های نوری و پراش‌سنجی پرتو ایکس دشوار می‌سازد و شناسایی دقیق آن‌ها مستلزم مطالعه شیمی این کانی‌ها با استفاده از روش‌های ریزکاوش الکترونی است. در نمونه‌های مورد مطالعه، بیش از ۸۰ درصد دانه‌های سازنده کانی‌های اکسیدی دارای ویژگی‌های نوری و مغناطیسی حد بین ایلمنیت و مگنتیت هستند و تیتانومگنتیت نام‌گذاری شده‌اند (شکل‌های ۱۷-a تا d). نتایج نمونه‌های شیمی سنگ کل، شیمی کانی‌های اکسیدی و پراش‌سنجی پرتو ایکس نیز نتایج مطالعات کانه‌نگاری را تایید می‌کنند. تیتانومگنتیت گاه دارای تیغه‌های برون‌رستی (اکسلوشنی) از ایلمنیت، هماتیت و روتیل است (شکل‌های ۱۷-b و c). دانه‌های تیتانومگنتیت به‌صورت‌های نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل و به‌ندرت شکل‌دار و از نظر درجه گردشدگی، نیمه‌زاویه‌دار، نیمه‌گرد شده تا به‌نسبت گرد شده هستند. اندازه دانه‌های تیتانومگنتیت از حدود ۱۰ میکرون تا ذراتی به اندازه ۳۰۰ میکرون وجود دارد که در این میان دانه‌های با ابعاد ۱۰۰ تا ۱۵۰ میکرون چیره هستند. در این نمونه‌ها، ایلمنیت و مگنتیت نیز با فراوانی اندک حضور دارند (شکل‌های ۱۷-b و d). کانی‌هایی مانند تیتانومگنتیت، مگنتیت و ایلمنیت تحت شرایط هوازدگی و اکسیداسیون سطحی، از حاشیه دانه‌ها و امتداد شکستگی‌های به‌تدریج توسط کانی‌هایی مانند هماتیت، گوئتیت و لیمونیت جایگزین شده و بافت جانشینی را تشکیل می‌دهند (شکل ۱۷-d). در این مطالعه، تعداد ۵ نمونه از ماسه‌سنگ‌های تیتانیم و آهن‌دار به روش پراش‌سنجی پرتو ایکس نیز مطالعه شده است و فازهای اصلی کانی‌شناسی شامل مگنتیت و ایلمنیت و فازهای فرعی شامل آلبیت، کوارتز و آناتاز می‌باشد، که در انطباق کامل با نتایج مطالعات کانی‌شناسی نوری و شیمی کانی‌ها است (شکل ۱۷-e).



شکل ۱۶-a، b) تصاویر میکروسکوپی از بافت بین‌دانه‌ای اکسیدهای تیتانیم و آهن (بیشتر تیتانومگنتیت) در فضای بین کوارتز، پلاژیوکلاز و قطعات سنگی در مقاطع صیقلی و نازک. c) تصویر نمونه دستی از دانه‌های پراکنده کانی‌های کدر در ماسه‌سنگ. d و e) تصاویر میکروسکوپی مقطع نازک که بافت دانه‌پراکنده‌ای از کانی‌های کدر (اکسیدهای تیتانیم و آهن) را نشان می‌دهد.

Figure 16- a, b) Photomicrograph of inter-granular texture of Ti and Fe oxides (mostly titano-magnetite) between quartz, plagioclase, and rock fragments in thin and polished sections. c) Hand sample photograph from disseminated texture of opaque minerals in sandstone. d, e) Photomicrograph of thin section show that disseminated texture of opaque minerals (Ti and Fe oxides). Opq: Opaque mineral; Pl: Plagioclase; Px: Pyroxene; Qz: Quartz; R.F.: Rock fragment; Ti-mag: Titanomagnetite. (Abbreviations for names of minerals from Whitney and Evans (2010)).



شکل ۱۷- a) تصویر میکروسکوپی از بافت چینه‌سان که تناوب افق‌های ماسه‌سنگی و افق‌های غنی از تیتانومگنتیت را نشان می‌دهند. b) بلورهای تیتانومگنتیت و سوزن‌های برون‌رست (اکسلوشن) هماتیت در ایلمنیت. c) بلورهای تیتانومگنتیت و تیغه‌های برون‌رست (اکسلوشن) ایلمنیت در داخل تیتانومگنتیت. d) انباشته‌ای از تیتانومگنتیت به‌همراه مقادیر اندکی مگنتیت، و دانه تیتانومگنتیت که در حال تبدیل به هماتیت، گوئتیت و لیمونیت است. e) نمودار پراش‌سنجی پرتو ایکس نمونه کانسنگ تیتانیم‌دار.

Figure 17- a) Photomicrograph of stratiform texture which contain successions of sandstone and titanomagnetite horizons. b) Titanomagntit crystals and exsolution of hematite needles in ilmenite. c) Titanomagntit crystals and exsolution of ilmenite needles in titanomagnetite. d) Massive titanomagnetite with less magnetite, and titanomagnetite grain replaced by hematite, goethite, and limonite. X-ray diffractometry graph of Ti-bearing ore sample. Gth: Goethite; Hem: Hematite; Ilm: Ilmenite; Lm: Limonite; Mag: Magnetite; Ti-mag: Titanomagnetite. (Abbreviations for names of minerals from Whitney and Evans (2010)).

۳-۴- ژئوشیمی

هدف از مطالعات ژئوشیمیایی، تعیین ترکیب شیمیایی سنگ‌ها، کانسنگ‌ها و کانی‌ها، شناسایی نوع سنگ‌ها و کانی‌ها، شناخت ویژگی‌های ژئوشیمیایی، تعیین عناصر اصلی و جانبی کانسنگ‌ها و بررسی نقش فرایندهای زمین‌شناسی در تشکیل سنگ‌ها و کانسنگ‌ها است.

۳-۴-۱- ژئوشیمی ماسه‌سنگ‌های تیتانیم و آهن‌دار

مقادیر غلظت عناصر اصلی و کمیاب تعداد ۴ نمونه کانسنگ تیتانیم و آهن‌دار در جدول ۲ آورده شده است. این نمونه‌ها از افق‌های غنی از کانی‌های تیتانیم-آهن‌دار در این محدوده برداشت شده‌اند. ترکیب شیمیایی این نمونه‌ها اطلاعات مهمی درباره ویژگی‌های زمین‌شناسی، شرایط رسوب‌گذاری، منشا و ارزیابی اقتصادی آن‌ها ارائه می‌دهد. داده‌های ژئوشیمیایی جدول ۲ نشان می‌دهد که مقادیر TiO_2 در این نمونه‌ها از ۱۲/۸۷ درصد وزنی تا ۲۰/۷۵ درصد وزنی (میانگین ۱۵/۸۹ درصد) در تغییر است که به‌خوبی نشان دهنده سرشار بودن این ماسه‌سنگ‌ها از تیتانیم می‌باشد. مقدار Fe_2O_3 نمونه‌ها از ۳۹/۹۹ درصد تا ۶۴/۶۸ درصد تغییر می‌کند. مقادیر بالای تیتانیم و آهن در این نمونه‌ها به‌دلیل وجود تیتانومگنتیت، ایلمنیت، مگنتیت و هماتیت در ترکیب آن‌ها است.

در این پژوهش، برای مطالعه همبستگی ژئوشیمیایی میان عناصر از روش تحلیل خوشه‌ای و بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی بهنجار (نرمال) استفاده شده است. در نمودار تحلیل خوشه‌ای، عناصر در ۳ خوشه مجزا قرار گرفته‌اند (شکل ۱۸).

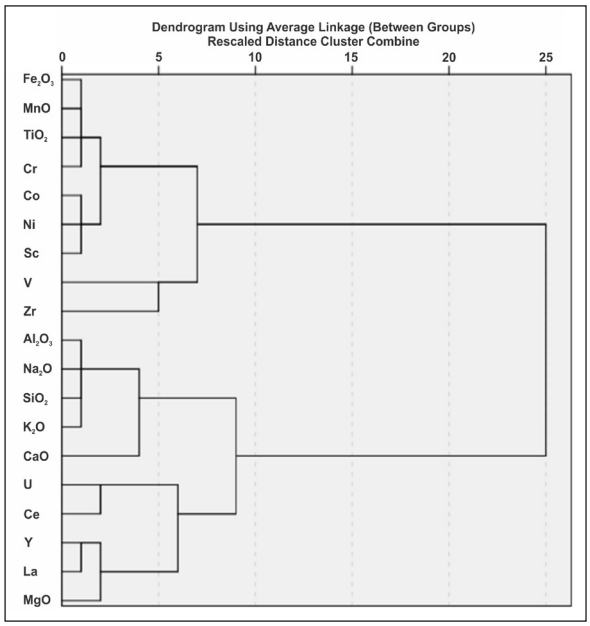
-خوشه یک: در این خوشه عناصر تیتانیم، آهن، منگنز، وانادیم، کروم، کبالت، اسکاندیم و زیرکنیم قرار گرفته‌اند. همه آن‌ها از عناصر گروه آهن هستند و از نظر ژئوشیمیایی بیشتر در سنگ‌های آذرین مافیک و فرامافیک (اولترامافیک) و کانسارهای وابسته به آن‌ها تمرکز دارند. هم‌یافتی ژئوشیمیایی این عناصر در منطقه مورد مطالعه با وجود ماسه‌سنگ‌های تیتانیم‌دار توجیه می‌شود. وجود کانی‌های تیتانیم و آهن‌دار با درصد بالا در ماسه‌سنگ‌های این منطقه سبب این هم‌یافتی شده‌اند. زیرکنیم از نظر ژئوشیمیایی قرابت زایشی با عناصر گروه آهن ندارد و کانی‌های تمرکز دهنده آن (زیرکن، توریت و ...) اغلب در سنگ‌های آذرین فلسیک تشکیل

می‌شوند، ولی از آن جایی که زیرکن، ایلمنیت و مگنتیت در دسته کانی‌های سنگین هستند در محیط‌های رسوبی ثانوی مانند محیط‌های آبرفتی، ساحلی و دریایی به دلیل پایداری فیزیکی و شیمیایی و وزن مخصوص بالا گرد هم آمده و با هم تمرکز می‌یابند. با توجه به حضور توده‌های گابرویی، دیوریتی و گرانیتی کرتاسه پسین در منطقه به عنوان خاستگاه کانه‌های آهن-تیتانیم، هم‌یافتی زیرکن به عنوان یک کانی سنگین با آن‌ها کاملا قابل توجیه است.

جدول۲- مقادیر غلظت سنگ کل اکسید عناصر اصلی (درصد وزنی)، عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی (گرم در تن) در ۴ نمونه از ماسه‌سنگ‌های تیتانیم و آهن‌دار در محدوده تیتانیم سبزوار.

Table 2. Concentration of whole-rock major oxides (wt. %), minor, trace and rare earth elements (ppm) in 4 Ti- and Fe-bearing sandstone samples in the Sabzevar titanium area.

Element	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	L.O.I.
SA-OG-01	23.1	5.29	4.62	45.94	0.2	1.42	0.11	1.3	0.11	15.11	2.44
SA-OG-02	28.18	6.32	5.63	39.99	0.25	1.28	0.1	1.65	0.09	12.87	3.36
SA-OG-03	8.04	2.28	1.77	64.68	0.09	1.29	0.14	0.47	0.14	20.75	-0.14
SA-OG-04	19.32	5.04	6.77	46.41	0.17	1.34	0.11	1.21	0.11	14.84	4.34
Element	**Ag**	**Ba**	**Be**	**Co**	**Cr**	**Cs**	**Cu**	**Li**	**Nb**	**Ni**	**Rb**
SA-OG-01	0.4	103	0.5	37.3	408	0.7	24	7	4.5	67	6
SA-OG-02	0.4	62	0.5	29.8	356	0.7	10	6	7.3	56	6
SA-OG-03	1.1	22	0.5	39.9	495	0.7	6	0.75	16.5	75	5
SA-OG-04	0.4	47	0.6	34.8	408	0.7	34	6	14.2	65	5
Element	**Sc**	**Sn**	**Sr**	**Ta**	**Th**	**Tl**	**U**	**V**	**Y**	**Zn**	**Zr**
SA-OG-01	15.4	0.9	303.5	0.3	1.1	0.1	0.7	320	3.4	85	45
SA-OG-02	13.6	0.9	365.3	0.2	1.1	0.2	0.5	289	3	90	31
SA-OG-03	16.5	0.9	105.5	0.7	1	0.1	0.5	380	2.1	108	44
SA-OG-04	14.5	1	310.3	0.3	0.9	0.1	0.4	427	3	119	46
Element	**La**	**Ce**	**Pr**	**Nd**	**Sm**	**Eu**	**Gd**	**Tb**	**Dy**	**Er**	**Tm**
SA-OG-01	7	10	0.92	4.5	0.3	0.075	1.25	0.3	1.9	0.6	0.075
SA-OG-02	6	9	0.81	3.7	0.2	0.075	1.21	0.2	1.7	0.5	0.075
SA-OG-03	5	8	0.67	3.7	0.2	0.075	1.15	0.2	1.6	0.4	0.075
SA-OG-04	6	8	0.73	4.3	0.3	0.075	1.23	0.2	1.8	0.5	0.075
Element	**Yb**	**Lu**									
SA-OG-01	0.44	0.075									
SA-OG-02	0.35	0.075									
SA-OG-03	0.32	0.075									
SA-OG-04	0.38	0.075									



شکل ۱۸- نمودار خوشه‌ای بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی بهنجار شده در ماسه‌سنگ‌های محدوده تیتانیم سبزوار.

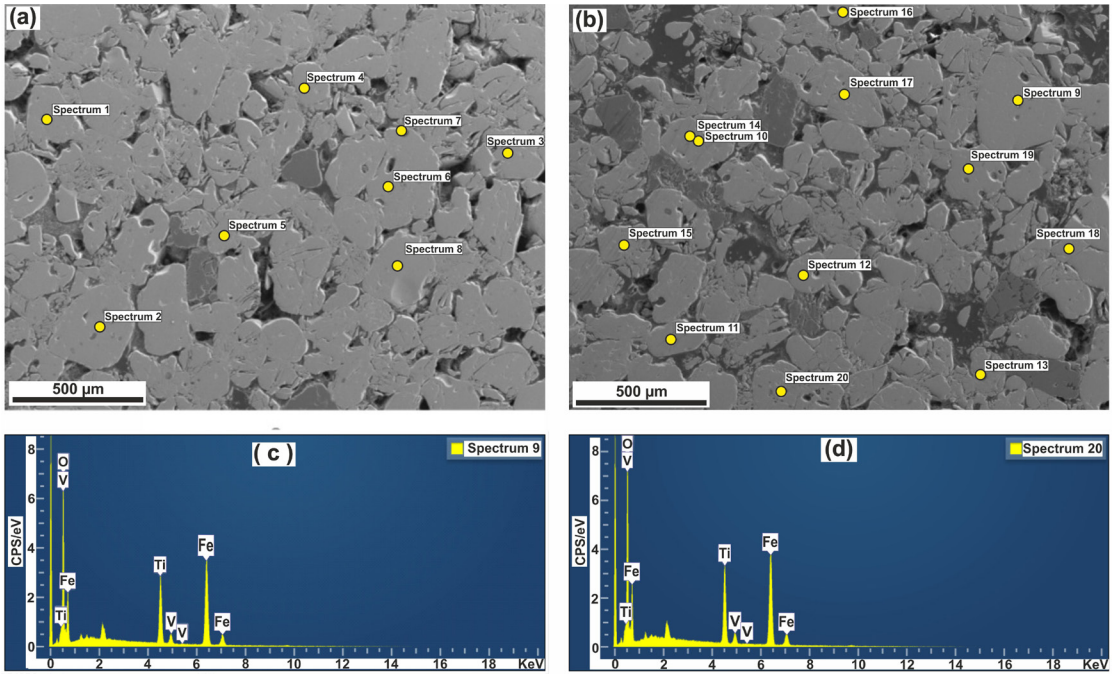
Figure 18. Cluster diagram based on normalized geochemical data in sandstones of Sabzevar titanium area.

– **خوشه دو:** در این خوشه عناصر آلومینیم، سدیم، پتاسیم، سیلیسیم و کلسیم قرار دارند. عناصر اصلی یاد شده سنگ‌ساز هستند و سازنده‌های اصلی ترکیب سنگ‌های آذرین (گرانیتی)، رسوبی و دگرگونی می‌باشند. هم‌یافتی ژئوشیمیایی این عناصر در ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه به دلیل ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی آن‌ها است برای‌این که فلدسپارها (پلاژیوکلازها و آلکالی فلدسپارها)، کوارتز و قطعات سنگ‌های آذرین گرانیتی و رسوبی بخش عمده ترکیب این ماسه‌سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند.

–**خوشه سه:** در این خوشه عناصر اورانیم، سریم، لانتانیم، ایتریم و منیزیم قرار دارند. هم‌یافتی ژئوشیمیایی این عناصر در محیط‌های زمین‌شناسی نشان از رفتار ژئوشیمیایی یکسان آن‌های در طول فرایندهای آذرین، رسوبی و دگرگونی است. ماسه‌سنگ‌ها به ویژه انواع آهن و منگنزدار سنگ میزبان مناسبی برای برخی از تیپ‌های کانه‌زایی اورانیم و عناصر خاکی کمیاب هستند و در شرایط عادی نیز زمینه بالایی از این عناصر را دارا می‌باشند. افزون بر این، حضور گرانیت‌ها نیز به عنوان منشایی برای آن‌ها محتمل هست.

۳-۴-۲- شیمی کانی‌های اکسیدی

برای مطالعه شیمی کانی‌های اکسیدی، تعداد ۵ نمونه از برش‌های صیقلی و نازک-صیقلی نمونه‌های ماسه‌سنگ‌های تیتانیم و آهن‌دار و سنگ‌های مونزودیوریتی تا گابرویی انتخاب شدند. تجزیه نقطه‌ای کانی‌ها با استفاده از دستگاه ریزکاونده الکترونی نوع انتخابگر انرژی (EPMA-EDS) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است. این روش، بر پایه برهم‌کنش پرتوی الکترونی با نمونه و تحریک اتم‌ها برای انتشار پرتوهای ایکس عمل می‌کند. با تحلیل انرژی پرتوهای ایکس، می‌توان نوع و درصد عناصر موجود در ساختار کانی‌ها را با دقت قابل قبولی به‌دست آورد. در این پژوهش، برای شناخت کانی‌ها نتایج حاصل از تجزیه EDS نمونه‌ها با ترکیب شیمیایی کانی‌های مرجع مقایسه شده است. برای مطالعه شیمی کانی‌های اکسیدی، برش صیقلی شماره SA-P-01 و برش‌های نازک- صیقلی SA–TP-04 و SA-TP-07 از ماسه‌سنگ‌های تیتانیم‌دار و برش‌های نازک- صیقلی SA-TP-04 و SA-TP-07 از سنگ‌های مونزودیوریتی تا گابروئی انتخاب شده است. در مجموع، در این ۵ نمونه تعداد ۹۰ نقطه بر روی کانی‌های اکسیدی تجزیه شده است. از آن جایی که نتایج تجزیه شیمی کانی‌ها در تمامی ۵ نمونه تا حدود زیادی یکسان بوده است، برای پرهیز از حجم‌گرایی به توصیف نتایج تجزیه برش صیقلی نمونه شماره SA-P-01 بسنده شده است. این نمونه از افق‌های غنی از تیتانیم و آهن در ماسه‌سنگ‌ها انتخاب شده است. مطالعه کانی‌شناسی نشان می‌دهد که تیتانومگنتیت بخش عمده‌ای از این نمونه را تشکیل می‌دهد و با درصد بسیار اندکی از ایلمنیت، مگنتیت، هماتیت و گوتیت همراهی می‌شود. در برش صیقلی شماره SA-P-01، تعداد ۲۰ نقطه بر روی کانی‌های اکسیدی انتخاب شده است (شکل‌های ۱۹-a و b) و در هر یک از این نقاط مقادیر غلظت اکسیژن، تیتانیم، آهن، منیزیم، آلومینیم، سیلیسیم و وانادیم با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی مجهز به تکنیک میکروپروب الکترونی نوع EDS تجزیه شده است (جدول ۳). بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که عناصر اکسیژن، تیتانیم و آهن سازنده اصلی ترکیب کانی‌های اکسیدی در نمونه SA-P-01 است (شکل ۱۹-c و d). عناصر منیزیم، آلومینیم، سیلیسیم و وانادیم نیز در حد مقادیر جزئی گزارش شده است. افزون بر این، داده‌ها نشان می‌دهند که تغییرات زیادی در مقادیر غلظت عناصر آهن، تیتانیم و اکسیژن در نقاط تجزیه (۲۰ نقطه) مشاهده نمی‌شود. مقدار غلظت اکسیژن از کمینه ۲۴/۰۱ تا بیشینه ۴۱/۲۹ درصد وزنی (متوسط ۳۶/۵۶ درصد)، مقدار تیتانیم از کمینه ۱۳/۹۴ تا بیشینه ۱۷/۸۷ درصد وزنی (متوسط ۱۵/۴۱ درصد وزنی) و مقدار آهن از کمینه ۴۳/۱۷ تا بیشینه ۵۸/۶۰ درصد وزنی (متوسط ۴۷/۴۰درصد) تغییر می‌کند (جدول ۳). برای شناسایی نوع کانی‌های اکسیدی بر پایه شیمی کانی‌ها، متوسط مقدار غلظت عناصر در این نمونه (میانگین ۲۰ نقطه تجزیه) با مقادیر غلظت این عناصر در کانی‌های ایلمنیت، مگنتیت، تیتانومگنتیت و هماتیت مرجع مقایسه شده است (جدول ۳). در نمودار ستونی شکل ۲۰ متوسط ترکیب کانی‌های اکسیدی تیتانیم سبزوار با آن‌هایی از ایلمنیت، مگنتیت، تیتانومگنتیت و هماتیت مرجع مقایسه شده است، که ترکیب تیتانیم سبزوار بیشترین مشابهت را با ترکیب کانی تیتانومگنتیت دارد.



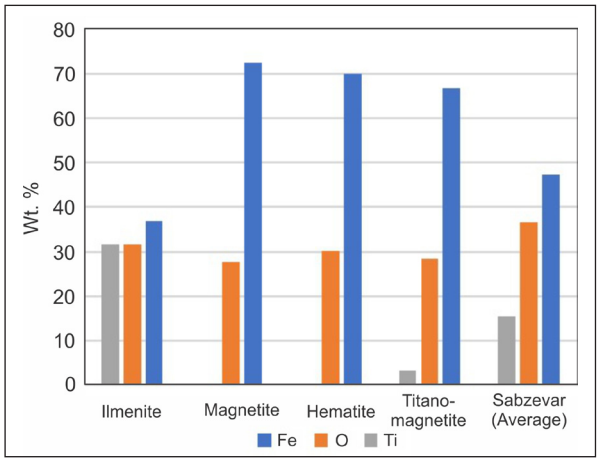
شکل ۱۹- a و b) تصاویر پس‌پراکنش الکترونی از نمونه SA-P-01 و موقعیت نقطه‌های تجزیه ریزکاوش الکترونی انتخابی. c و d) نمودار غلظت عناصر در نقطه‌های تجزیه شماره‌های ۹ و ۲۰.

Figure 19- a and b) Backscattered scanning electron microscope images of SA-P-01 sample and location of selected electron microprobe point analyses. C and d) Element concentration diagram in point analyses (spectrums) 9 and 20.

جدول ۳- تجزیه‌های ریزکاوش الکترونی (درصد وزنی) انتخابی به‌صورت نقطه‌ای بر روی کانی‌های اکسیدی در محدوده تیتانیم سبزوار و ترکیب شیمیایی تیتانومگنتیت، ایلمنیت، مگنتیت و هماتیت مرجع (webmin.mindat.org).

Table 3. Selected point electron microprobe analyses (wt. %) of upon oxide minerals in the Sabzevar titanium area, and chemical composition of reference titanomagnetite, ilmenite, magnetite, and hematite (webmin.mindat.org).

Spectrum		O	Ti	Fe	Mg	Al	Si	V	Total
1		35.75	15.31	48.34				0.6	100
2		35.62	14.13	50.24				0.1	100
3		31.04	17.87	49.41	0.83	0.38		0.47	100
4		37.6	15.73	45.2	0.66	0.3		0.51	100
5		37.52	15.34	47.14					100
6		24.01	16.48	58.6		0.4		0.51	100
7		38.27	15.03	46.17		0.39	0.14		100
8		38.19	15.73	46.07					100
9		38.04	14.77	46.6				0.59	100
10		34.55	15.69	49.04	0.73				100
11		41.29	13.94	44.77					100
12		36.6	16.11	46.35	0.94				100
13		37.05	15.96	46	0.76	0.23			100
14		40.82	14.32	44.86					100
15		39.47	14.4	44.69	0.48	0.29		0.66	100
16		41.01	15.15	43.17	0.67				100
17		29.07	17.84	51.91	0.93	0.25			100
18		38.74	14.73	46.09				0.45	100
19		36.94	14.52	48.54					100
20		39.58	15.2	44.85				0.36	100
Average		36.55	15.41	47.4	0.75	0.32	0.14	0.47	100
Reference minerals	**Titanomagnetite**	28.50	4.25	67.25					100
	Ilmenite	31.63	31.56	36.81					100
	Magnetite	27.64	-	72.36					100
	Hematite	30.06	-	69.94					100



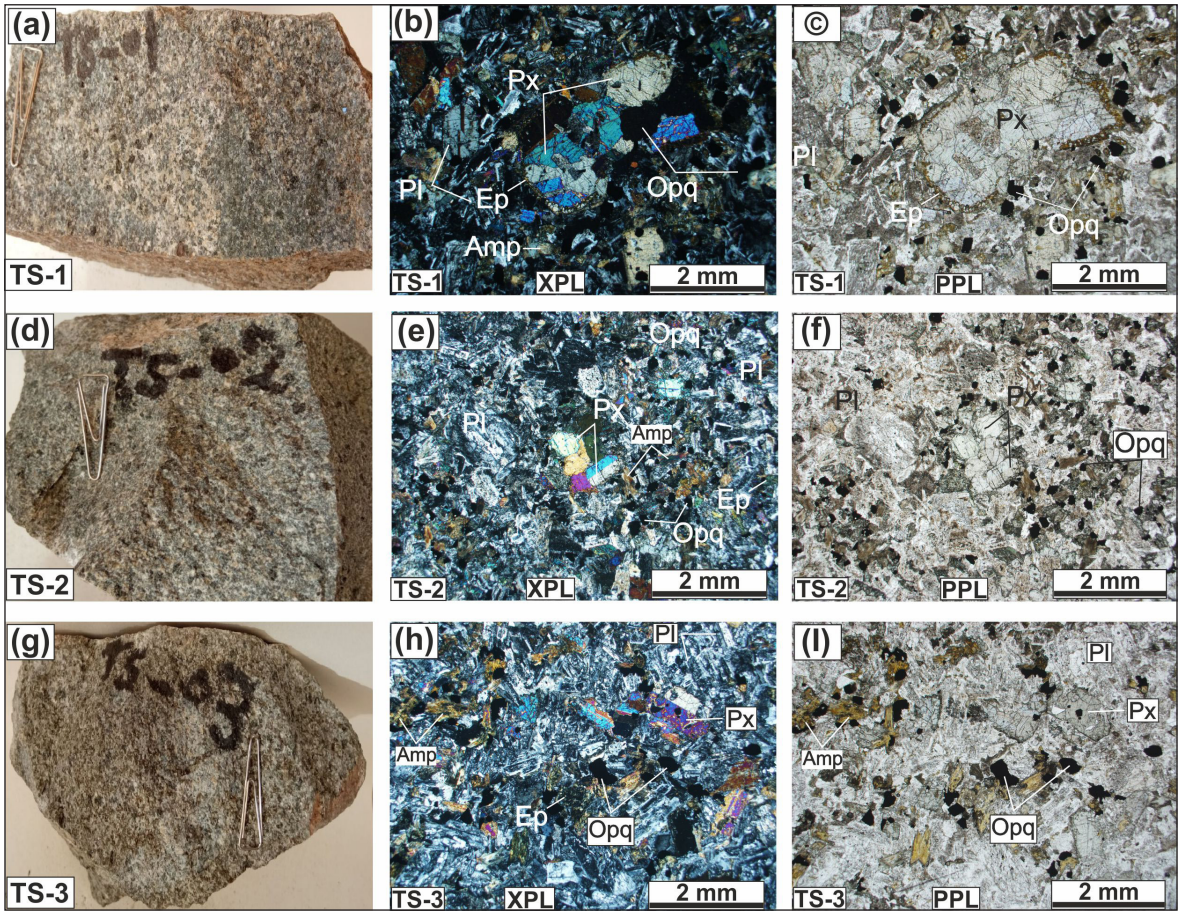
شکل ۲۰- مقایسه متوسط شیمی کانی‌های اکسیدی از نمونه‌های محدوده تیتانیم سبزوار با شیمی تیتانومگنتیت، ایلمنیت، مگنتیت و هماتیت مرجع (webmin.mindat.org)، که متوسط شیمی کانی‌ها نزدیک به ترکیب تیتانومگنتیت است.

Figure 20. Comparison of chemistry of oxide mineral from the Sabzevar titanium area with the reference titanomagnetite, ilmenite, magnetite, and hematite (webmin.mindat.org), which the average minerals chemistry is close to titanomagnetite composition.

۴- بحث و الگوی زایشی کانسار تیتانیم محمدآباد سبزوار

۴-۱- سنگ منشا احتمالی کانی‌های آهن-تیتانیم‌دار

برای بررسی سنگ منشا کانی‌های آهن-تیتانیم‌دار، از رخنمون‌های سنگی آذرین نفوذی مافیک-حدواسط کرتاسه پسین موجود در محدوده مورد مطالعه، نمونه‌برداری شده است. این سنگ‌های نفوذی دارای ترکیب دیوریت، مونزودیوریت تا مونزوگابرو هستند که به شکل‌های استوک، دایک و سیل (بیشتر سیل) در میان توالی‌های آتشفشانی-رسوبی کرتاسه پسین مشاهده می‌شوند (شکل‌های ۶-c تا e)، و با توجه به جایگیری آن‌ها در میان واحدهای رسوبی-آتشفشانی اوایل کرتاسه پسین (۹۰ تا ۱۰۰ میلیون سال پیش)، و تعیین سن‌های انجام شده بر روی آن‌ها، سن اواخر کرتاسه پسین دارند (جعفریان و جلالی، ۱۳۷۹؛ کاظمی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Kazemi et al., 2019b و قاسمی و همکاران، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸). سنگ‌های آذرین نفوذی، ویژگی‌های زمین‌شیمیایی سنگ‌های ماگمایی پهنه‌های فرورانش جزایر کمانی را دارند و ماگمای مادر این سنگ‌ها دارای سرشت تولئیتی بوده و از ذوب بخشی یک منشا گوشته‌ای تهی شده اسپینل لرزولیتی در خلال بسته شدن حوضه اقیانوسی تتیس جوان سبزوار در کرتاسه پسین حاصل شده است (کاظمی و همکاران، ۱۳۹۸؛ قاسمی و همکاران، ۱۳۹۸). بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، ترکیب سنگ‌شناسی این توده‌ها از مونزودیوریت، دیوریت تا مونزوگابرو تغییر می‌کند. پلاژیوکلاز، آمفیبول و کلینوپیروکسن،کانی‌های اصلی سازنده سنگ‌های نفوذی هستند. کلریت، اپیدوت، سریسیت، کانی‌های رسی و گاهی کربنات‌ها از کانی‌های دگرسانی و ثانویه این سنگ‌ها می‌باشند. از ویژگی کانی‌شناسی آشکار این سنگ‌ها دارا بودن مقادیر شایان توجهی از کانی‌های کدر (اپاک) در ترکیب آن‌ها است (شکل‌های ۲۱-a تا c). بر اساس مطالعات کانه‌نگاری، کانی‌های کدر موجود در ترکیب سنگ‌های آذرین بیشتر تیتانومگنتیت تا مگنتیت هستند. تجزیه‌های نقطه‌ای بر روی کانی‌های کدر نیز نشان می‌دهد که آن‌ها دارای ترکیب تیتانومگنتیت تا مگنتیت می‌باشند.



شکل ۲۱- سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی سنگ‌های آذرین نفوذی کرتاسه پسین جنوب سبزوار که دارای دانه‌های پراکنده‌ای از کانی‌های تیره (اکسیدی) هستند. a، d) تصاویر نمونه‌های دستی از مونزوگابرو. b، c، e، f) تصاویر نمونه‌های میکروسکوپی از مونزوگابرو. g) تصویر نمونه دستی از مونزودیوریت. i، h) تصاویر نمونه‌های میکروسکوپی از مونزودیوریت.

Figure 21. Petrography and mineralogy of late Cretaceous intrusive igneous rocks in the south of Sabzevar which contain disseminated grains of opaque minerals (Ti-Fe oxides). a, d) Hand-sample photographs of monzogabbro. b, c, e, f) Photomicrographs of monzogabbro (XPL and PPL). g) Hand-sample photograph of monzodiorite. i, h) Photomicrographs of monzodiorite (XPL and PPL).

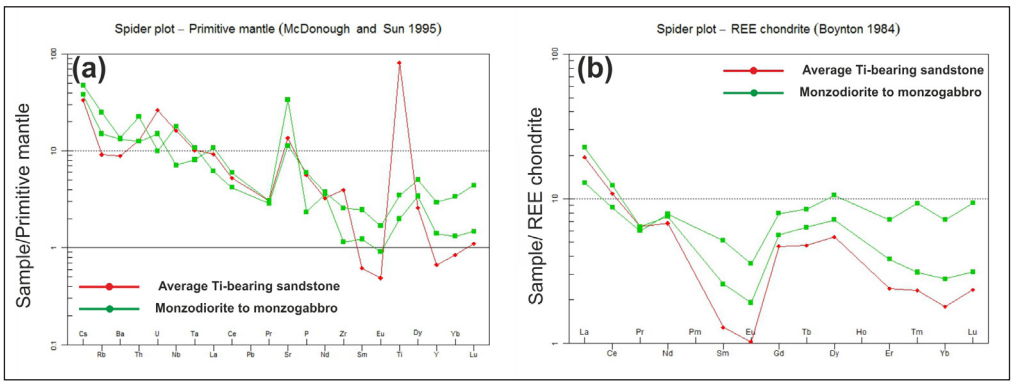
۴-۲- مقایسه ترکیب شیمیایی ماسه‌سنگ‌های تیتانیم‌دار و سنگ‌های دیوریتی تا مونزوگابرویی

برای بررسی میزان مشابهت ژئوشیمیایی میان ماسه‌سنگ‌های تیتانیم‌دار و سنگ‌های دیوریتی تا مونزوگابرویی، مقادیر غلظت عناصر کمیاب در نمونه‌های انتخابی این سنگ‌ها (جدول ۴)، به مقادیر آن‌ها در ترکیب گوشته اولیه (McDonough and Sun, 1995) و کندریت (Boynton, 1984) بهنجار شده است (شکل‌های ۲۲-a و b). به‌گونه‌ای که از این نمودارها مشخص است روند عناصر فرعی، کمیاب و خاکی کمیاب میان ماسه‌سنگ‌های تیتانیم‌دار و سنگ‌های دیوریتی تا مونزوگابرویی کاملا مشابه یکدیگر می‌باشد و گواهی بر این مسئله است که اجزای ماسه‌سنگ‌ها به احتمال زیاد از فرسایش و هوازدگی این سنگ‌های آذرین حدواسط تا مافیک (دیوریت تا مونزوگابر) منشا گرفته‌اند.

جدول ۴- مقادیر غلظت سنگ کل اکسید عناصر اصلی (درصد وزنی)، عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی (گرم در تن) در متوسط ماسه‌سنگ‌های تیتانیم‌دار و در ۲ نمونه انتخابی از سنگ‌های نفوذی (دیوریت و مونزوگابرو) در جنوب سبزوار.

Table 4. Concentration of whole-rock major oxides (wt. %), minor, trace and rare earth elements (ppm) in mean of Ti-rich sandstones and 2 selected samples of intrusive rocks (diorite and monzogabbro) in the south of Sabzevar.

Element	Lithology	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	TiO_2
SA-OG-1-4	Mean of Ti-rich sandstone	20.34	4.89	4.87	50.59	0.18	1.37	0.12	1.20	0.12	16.32
SA-RG-01	Diorite	54.92	16.36	8.65	8.58	0.55	4.19	0.14	5.77	0.12	0.70
SA-RG-02	Monzogabbro	48.43	12.66	30.58	2.59	0.53	1.44	0.16	3.16	0.05	0.40
Element	**Lithology**	**Ag**	**Ba**	**Be**	**Co**	**Cr**	**Cs**	**Cu**	**Li**	**Nb**	**Ni**
SA-OG-1-4	Mean of Ti rich sandstone	0.58	58.50	0.53	35.45	416.75	0.70	18.50	4.94	10.63	65.75
SA-RG-01	Diorite	0.4	90	0.7	15.3	43	1	58	3	11.8	15
SA-RG-02	Monzogabbro	0.075	87	0.7	9	19	0.8	14	4	4.7	19
Element	**Lithology**	**Rb**	**Sc**	**Sn**	**Sr**	**Ta**	**Th**	**Tl**	**U**	**V**	**Y**
SA-OG-1-4	Mean of Ti rich sandstone	5.50	15.00	0.93	271.15	0.38	1.03	0.13	0.53	354.00	2.88
SA-RG-01	Diorite	15	41.4	1.2	225.4	0.4	1.8	0.2	0.2	295	12.7
SA-RG-02	Monzogabbro	9	4.8	0.9	676.4	0.3	1	0.3	0.3	58	6
Element	**Lithology**	**Zn**	**Zr**	**La**	**Ce**	**Pr**	**Nd**	**Sm**	**Eu**	**Gd**	**Tb**
SA-OG-1-4	Mean of Ti rich sandstone	100.50	41.50	6.00	8.75	0.78	4.05	0.25	0.08	1.21	0.23
SA-RG-01	Diorite	60	27	4	7	0.73	4.7	1	0.26	2.05	0.4
SA-RG-02	Monzogabbro	3	12	7	10	0.78	4.5	0.5	0.14	1.45	0.3
Element	**Lithology**	**Dy**	**Er**	**Tm**	**Yb**	**Lu**					
SA-OG-1-4	Mean of Ti rich sandstone	1.75	0.50	0.08	0.37	0.08					
SA-RG-01	Diorite	3.4	1.5	0.3	1.49	0.3					
SA-RG-02	Monzogabbro	2.3	0.8	0.1	0.58	0.1					

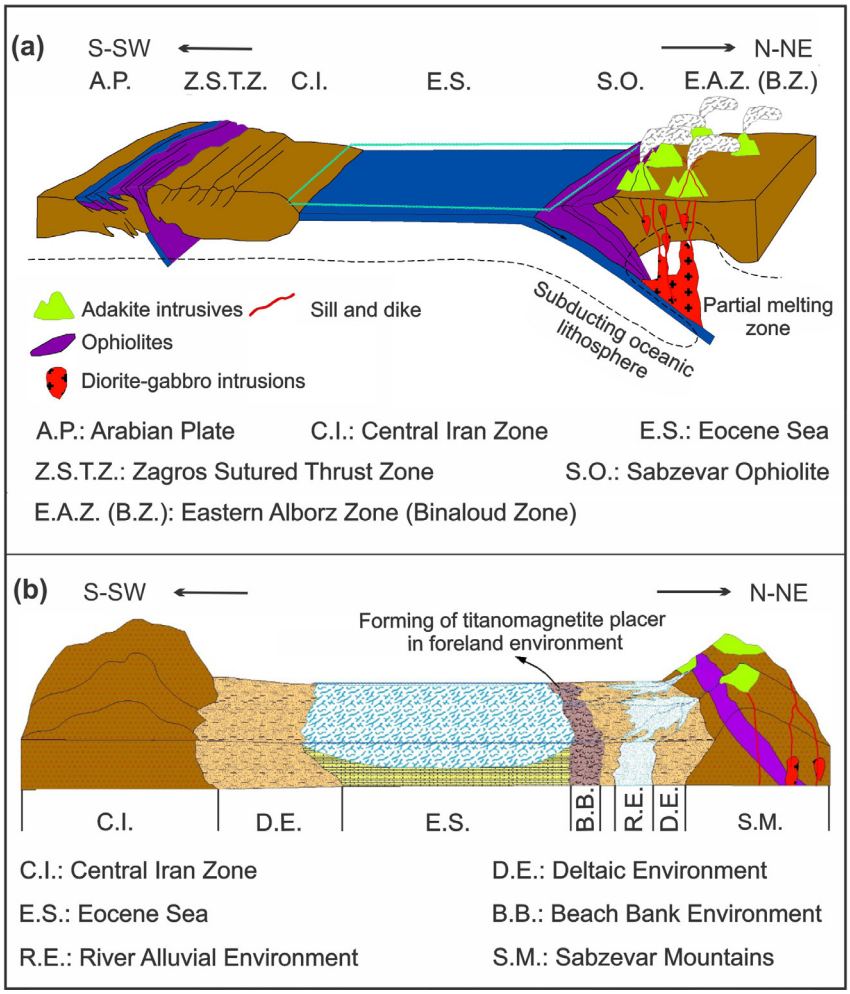


شکل ۲۲- مقایسه ترکیب شیمیایی متوسط ماسه‌سنگ‌های تیتانیم‌دار و سنگ‌های دیوریتی و مونزوگابرویی در جنوب سبزوار. a) بهنجارسازی مقادیر عناصر فرعی و کمیاب به ترکیب گوشته اولیه. b) بهنجارسازی مقادیر عناصر خاکی کمیاب به ترکیب کندریت.

Figure 22. Comparison of chemical composition of mean Ti-rich sandstones and diorite and monzogabbro rocks in south of Sabzevar. a) Primitive mantle-normalized minor and trace elements contents. b) Chondrite-normalized rare earth elements contents.

۴-۳- الگوی زایشی کانسار تیتانیم سبزوار

کانسار تیتانیم محمدآباد سبزوار، در محیط‌های رودخانه‌ای-دلتایی و ساحلی کم‌ژرفای یک حوضه دریایی رسوبی-تبخیری کم‌ژرفای پیش‌بومی (فورلند) درون‌قاره‌ای ایجاد شده است. شواهد زمین‌شناسی نشان می‌دهند که این حوضه کم‌ژرفای پیش‌بومی، بازمانده دریای حوضه اقیانوسی سبزوار بوده که در زمان کرتاسه-پالئوسن و با بالازدگی مجموعه افیولیتی سبزوار، ایجاد نوار دگرگونی کرتاسه-پالئوسن، و تشکیل کمان ماگمایی کرتاسه پسین-ترشیر بسته شده است (Jafari and Ghasemi, 2023). باقیمانده این دریا به صورت یک حوضه دریایی کم‌ژرفای پیش‌بومی در سراسر زمان ترشیر (پالئوسن-میوسن) وجود داشته و در آن نهشته‌های مارن‌های گچ‌دار، شیل‌های بیتومینه، گل‌سنگ، ماسه‌سنگ و کنگلومرا ته‌نشست می‌شده است (شکل ۲۳). توالی‌های تبخیری شامل سنگ گچ (ژیپس، انیدریت) و سنگ نمک (هالیت) نیز در این محیط‌ها گسترش دارند و نشانگر اقلیم خشک، تبخیر بالا و محیط آبی بسته درون قاره‌ای مناسب برای تمرکز املاح و عناصر فلزی هستند.



شکل ۲۳- طرح نمادین برای تشکیل کانسار پلاسر دیرین چینه‌کران تیتانیم محمدآباد در جنوب سبزوار. a) فرورانش ورقه اقیانوسی تتیس جوان حوضه سبزوار به زیر ورقه قاره‌ای البرز خاوری و زایش پهنه افیولیتی و تشکیل کمان آتش‌فشانی حاشیه فعال قاره‌ای در زمان کرتاسه پسین. b) هوازدگی و فرسایش مجموعه افیولیتی سبزوار، سنگ‌های اطراف و به ویژه نفوذی‌های دیوریتی، مونزودیوریتی و گابرویی تیتانومگنتیت‌دار، حمل و تمرکز کانی‌های سنگین (به ویژه تیتانومگنتیت، مگنتیت و ایلمنیت) در محیط‌های رودخانه‌ای و ساحلی دریای کم‌ژرفای ائوسن میانی-پسین و تشکیل ماسه‌سنگ‌های تیتانیم‌دار محمدآباد در جنوب سبزوار.

Figure 23. Schematic model for formation of stratabound paleoplacer titanium deposit of Mohammad Abad in the south of Sabzevar. a) Subduction of Sabzevar Neo-Tethys oceanic slab beneath the eastern Alborz continental plate and creation of ophiolite zone and forming of active continental margin volcanic arc during late Cretaceous. b) Weathering and erosion of the Sabzevar ophiolitic complex, surrounding rocks, and particularly titanomagnetite-bearing diorite, monzodiorite, and gabbro intrusions, transport and concentration of heavy minerals (especially titanomagnetite, ilmenite, and magnetite) into the river and beach environments of middle-late Eocene shallow sea and formation of Mohammad Abad Titanium-rich sandstones in the south of Sabzevar.

مشاهدات زمین‌شناسی صحرایی، سنگ‌نگاری، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی گویای آن است که سنگ مادر کانی‌های تیتانیم‌دار در ناحیه جنوب سبزوار به‌احتمال زیاد سنگ‌های آذرین مافیک-حدواسط اواخر کرتاسه پسین با ترکیب مونزوگابرو، دیوریت و مونزودیوریت است که به شکل استوک، دایک و سیل (بیشتر سیل) در توالی رسوبی-آتشفشانی اوایل کرتاسه پسین رخنمون دارند (شکل‌های ۶-c تا e و شکل‌های ۲۱- a تا i). هوازدگی و فرسایش این سنگ‌های آذرین دارای کانی‌های آهن-تیتانیم‌دار، سبب آزادسازی این کانی‌ها از سنگ‌های مادر شده و از طریق رواناب‌ها و سیلاب‌های فصلی به داخل کانال‌های رودخانه‌ای و سواحل حوضه‌های رسوبی-تبخیری کم‌ژرفا وارد شده‌اند. فرایند حمل و انتقال در یک محیط با انرژی پایین و فاقد زه‌کشی قوی، و بیشتر از نوع تعلیقی بوده است. شکل‌های لایه‌ای، عدسی و یا پراکنده این کانی‌ها در بین لایه‌های رسوبی، بیانگر تمرکز تدریجی و تاثیر شرایط رسوبی بر شکل‌گیری آن‌ها است. در منطقه مورد مطالعه، به دنبال فاز کوهزادی لارامید و بالازدگی سنگ‌های کرتاسه به‌ویژه افیولیت‌های سبزوار و توالی آذرین درونی-بیرونی کرتاسه پسین سبزوار به عنوان سنگ مادر کانی‌های تیتانیم‌دار، این سنگ‌ها متحمل هوازدگی و فرسایش شده و رسوبات آن‌ها به صورت کنگلومرایی، ماسه‌سنگی و گل‌سنگی در محیط‌های رودخانه‌ای و ساحلی دریای کم‌ژرفای ائوسن ته‌نشست شده‌اند. کانی‌های مقاوم آهن-تیتانیم‌دار از جمله تیتانومگنتیت و ایلمنیت به همراه مگنتیت به صورت کانی سنگین پلاسری در بخش رسوبات ماسه‌سنگی تجمع یافته و افق‌های اقتصادی را تشکیل داده‌اند (شکل‌های ۲۳-a و b). این پلاسرهای آبرفتی در نتیجه رخداد آخرین فازهای کوهزاد آلپی (پیرنه و پاسادنین) چین خورده‌اند و اکنون به شکل توالی‌های شیلی-ماسه‌سنگی-مارنی-آهکی چین‌خورده و دارای تمرکز کانه‌های آهن-تیتانیم‌دار مشاهده می‌شوند. بنابراین نوع کانی‌زایی آهن-تیتانیم در این منطقه از نوع دیرینه پلاسری (پالئوپلاسر) است، که تحت فرایند سخت‌شدگی (دیاژنز) متحمل سنگ‌شدگی شده است. لایه‌های ماسه‌سنگی این توالی، غنی از کانی‌های آهن-تیتانیم‌دار (بیشتر تیتانومگنتیت) هستند، هر چند که میزان تمرکز کانی‌های اکسیدی در افق‌های مختلف ماسه‌سنگ‌ها متفاوت است. در حقیقت، کانسار آهن-تیتانیم سبزوار، یک کانسار دیرینه پلاسری چینه‌کران (فقط در واحد ماسه‌سنگی) با ساخت چیره چینه‌سان و از نوع پلاسر رودخانه‌ای-ساحلی کم‌ژرفا است. پیدایش این کانسارها وابسته به نوع اقلیم، هوازدگی فیزیکی و شیمیایی سنگ‌ها و کانی‌ها می‌باشد و بیشتر در دوران سنوزوییک تشکیل شده‌اند. روش‌های استخراج کم‌هزینه و آسان، روش‌های فرآوری ساده و عدم نیاز به خردکردن ماده معدنی و یا خردایش آسان در پلاسرها و دیرینه پلاسرها سبب می‌شود تا این ذخایر از ارزش اقتصادی بسیار مناسبی برخوردار باشند.

۵- نتیجه‌گیری

بخش ماسه‌سنگی در واحد مارنی-کنگلومرایی-آهکی-ماسه‌سنگی ائوسن میانی-پسین جنوب سبزوار، دارای تمرکز قابل ملاحظه‌ای از کانی‌های آهن-تیتانیم‌دار است. ماسه‌سنگ‌ها شامل انواع دانه ریز، متوسط و درشت هستند و بر اساس درصدهای کوارتز (۳۰ تا ۴۵ درصد)، فلدسپار (۱۵ تا ۳۰ درصد) و قطعات سنگی (۱۵ تا ۴۵ درصد) در گروه لیتیک‌آرکوز و فلدسپاتیک لیت‌ارنایت قرار می‌گیرند. آن‌ها شامل ۳ گروه سنگ‌رخساره گراولی و دانه درشت (Gmm و Gcm)، ماسه‌ای و دانه متوسط (Sh و Sr) و گلی و دانه ریز (Fl) هستند که حکایت از نهشت آن‌ها در یک محیط رسوب‌گذاری با انرژی متوسط تا بالا است. در افق‌های ماسه‌سنگی به صورت کلی چینه‌کران، کانی‌های آهن-تیتانیم‌دار به شکل‌های چینه‌سان، عدسی، میان‌دانه‌ای و دانه‌پراکنده در مقیاس میلی‌متری تا متری مشاهده می‌شوند. کانی‌های اکسیدی در ماسه‌سنگ‌ها شامل تیتانومگنتیت، ایلمنیت، مگنتیت و هماتیت است که در این میان تیتانومگنتیت بیشترین فراوانی را دارد. مطالعه شیمی کانی‌های اکسیدی در ماسه‌سنگ‌ها و سنگ‌های دیوریتی تا گابرویی، متوسط ترکیب شیمیایی آن‌ها را تیتانومگنتیت نشان می‌دهد. مشابهت الگوی توزیع ژئوشیمیایی عناصر فرعی، کمیاب و خاکی کمیاب در ماسه‌سنگ‌های آهن-تیتانیم‌دار با الگوهای آن‌ها در سنگ‌های آذرین حدواسط- مافیک (دیوریت، مونزودیوریت و مونزوگابرو) و نیز وجود مقادیر شایان‌توجهی از کانی‌های تیتانومگنتیت و مگنتیت در ترکیب این سنگ‌های آذرین، منشا و سنگ مادر احتمالی کانی‌های آهن-تیتانیم‌دار در ماسه‌سنگ‌های جنوب سبزوار را سنگ‌های دیوریت، مونزودیوریت و مونزوگابرو به سن اواخر کرتاسه پسین معرفی می‌کند. کانسار تیتانیم سبزوار، یک کانسار دیرینه پلاسر چینه‌کران است که در محیط‌های رودخانه‌ای، دلتایی و ساحلی کم‌ژرفای حوضه پیش‌بوم ائوسن در واحد ماسه‌سنگی نهشته شده است. این دیرینه پلاسر آبرفتی، رخدادهای آخرین فازهای کوهزاد آلپی (پیرنه، پاسادنین) را تجربه کرده و اکنون به شکل توالی‌های کنگلومرایی-ماسه‌سنگی-گل‌سنگی-مارنی-آهکی چین‌خورده و دارای تمرکز اقتصادی از کانه‌های آهن-تیتانیم‌دار مشاهده می‌شود.

سپاسگزاری

نگارندگان مقاله از دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود که بستر و محیط مناسبی را برای انجام این پژوهش آماده کرده‌اند، سپاسگزاری می‌نمایند. از دست‌اندرکاران محترم فصلنامه علمی علوم زمین و داورانی که ارزیابی مقاله حاضر را قبول فرمودند، قدردانی می‌شود.

کتابنگاری

اعلمی‌نیا، ز.، گل‌قندشتی، م.، ۱۳۹۰، بررسی کانسار پلاسری تیتانیوم در خراسان رضوی، اولین همایش ملی زمین‌شناسی ایران، گروه زمین‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی شیراز، ۸ صفحه.

جعفریان، م.ب.، جلالی، ع.، ۱۳۷۹، نقشه زمین‌شناسی چهارگوش ششتمد، سری ۱/۱۰۰۰۰۰، شماره ۷۵۶۱. سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران.

حاج علیلو، ب.، رزم‌آرا، م.، حاج علیلو، ن.، ۱۴۰۰، شناخت منشاء کانی‌های تیتانومگنتیت وانادیم‌دار عطائیه در جنوب باختر مشهد با روش‌های SEM، XRM و EPMA، فصلنامه علوم زمین، دوره ۳۱، شماره ۲، پیاپی ۱۲۰، صفحه ۵۳ تا ۶۴. gsj.2018.96076.1237/10.22071.

رحیم‌سوری، ی.، علیپور، ص.، حسین زاده، ب.، ۱۳۹۶، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و شرایط تشکیل پلاسرهای سرشار از تیتانیوم در کانسار خانیک ارومیه، استان آذربایجان غربی، شمال غرب ایران، رسوب شناسی کاربردی، دوره ۵، شماره ۹، صفحه ۵۸ تا ۷۳.

فرخ نژاد، ر.، اسفندیاری، ب.، معتمد، ا.، ۱۳۹۵، تحلیل لیتوفاسیس‌ها و شرایط رسوب‌گذاری توالی آواری پالئوسن در البرز خاوری، ایران، فصلنامه علمی علوم زمین، سال بیست و ششم، شماره ۱۰۱، صفحه ۲۱۱ تا ۲۱۸. gsj.2016.41068/10.22071.

قاسمی، ح.، کاظمی، ز.، موسیوند، ف.، گریفین، و.، ۱۳۹۷، شیمی سنگ‌کل و شیمی کانی داسیت‌های کرتاسه پسین جنوب غرب سبزوار: رهیافتی بر منشأ و جایگاه زمین‌ساختی آن‌ها، مجله پترولوژی، جلد ۹، شماره ۳، صفحه ۷۹ تا ۱۰۰.

قاسمی، ح.، هدایتی خرق، س.ن.، کاظمی، ز.، ۱۳۹۸، شیمی کانی و شرایط فیزیکی تبلور در توده‌های گابرودیوریتی فیلشور و گفت، جنوب غرب سبزوار، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، جلد ۲۷، شماره ۳، صفحه ۶۶۷ تا ۶۸۲.

قربانی، م.، ۱۳۸۷، زمین‌شناسی اقتصادی کانسارها و نشانه‌های معدنی ایران، چاپ اول، انتشارات آرین زمین، تهران، ۶۷۴ ص.

کاظمی، ز.، قاسمی، ح.، موسیوند، ف.، گریفین، و.، ۱۳۹۸، ماگماتیسم فرورانش جزایر کمانی کرتاسه پسین در لبه شمالی ایران مرکزی، جنوب غرب سبزوار، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۳(۴۹)، صفحه ۱ تا ۲۱.

کوثری، س.، علوی نایینی، م.ر.، آزرم، ف.، رضوانی، ج.، ۱۳۶۶، گزارش اکتشاف تفصیلی کانسار تیتانیوم کهنوج، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، تهران، ۲۵۰ صفحه.

مقدسی، س.ج.، یزدی، ج.، ۱۳۹۴، زمین‌شناسی و نحوه تشکیل پلاسرهای تیتانیوم‌دار ناحیه دره جوگز بالا در منطقه فنوج، استان سیستان و بلوچستان، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۷، شماره ۲، صفحه ۳۲۷ تا ۳۴۱.

موسوی حرمی، ر.، محبوبی، ا.، هاشمی، ف.، ۱۳۸۵، لیتوفاسیس و پتروفاسیس رسوبات سیلیسی-آواری ژوراسیک میانی در شرق بینالود و ارتباط آن با موقعیت تکتونیکی منشاء، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال دوم، شماره چهارم، صفحه ۳۳-۴۶.

نعیمی، ر.، ۱۳۹۷، گزارش پایانی عملیات اکتشاف محدوده اکتشاف سنگ آهن جنوب دیزج (جعفرخان)، جنوب شرق شاهرود، سازمان صنعت، معدن و تجارت استان سمنان، گزارش داخلی و منتشر نشده، ۸۰ صفحه.

References

Aalaminia, Z., and Golghandashti, M., 2011, Investigation of titanium placer deposits in Khorasan Razavi, First National Geological Conference of Iran, Geology Department, Islamic Azad University, Shiraz, 8 p. (In Persian).

Alaminia, Z., Karimour, M.H., Homam, S.M., and Finger, F., 2013. The magmatic record in the Arghash region (northeast Iran) and tectonic implications. International Journal of Earth Sciences 102(6). DOI:10.1007/s00531-013-0897-1

Amini, A., and Anketell, J.M., 2015. Textural and geochemical studies of detrital Fe-Ti oxides and test of their validity in provenance determination, a case study from Central Iran. Journal of African Earth Sciences, 103, 140-152. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.12.008.

Baroz, R., Macaudiere, J., Montigny, R., and Noghreyan, H., 1984. Ophiolites and related formations in the central part of the Sabzevar range (Iran) and possible geotectonic reconstructions. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen 168(3), 358-388. DOI:10.1127/njgpa/168/1984/358.

Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of rare earth elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., Ed., rare earth element geochemistry, Elsevier, New York, 63-114. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3.

Eftekhar-Nezhad, J., Aghanabati, A., Hamzehpour, B., and Baroyant, V., 1976. Geological quadrangle map of Kashmar, 1:250,000 series, No. J5, Geological Survey of Iran, Tehran.

El-Khalloufi, M., Drevelle, O., and Soucy, G., 2021. Titanium: An overview of resources and production methods, Minerals 11, 1425. https://doi.org/10.3390/min11121425.

Farokhnejad, R., Esfandiari, B., and Motamed, A., 2016. Analysis of lithofacies and sedimentary conditions of Paleocene detrital succession in Eastern Alborz, Iran, Scientific Quarterly Journal, Geosciences, 26(101), 211-218. (In Persian). DOI:10.22071/gsj.2016.41068.

Folk, R.L., 1974. Petrology of sedimentary rocks, Hemphill Publishing Co., Austin, 182 p.

Friend, P.F., and Dade, W.P., 2005. Transport modes and grain-size pattern in fluvial basin. In Blum, M.D., Marriott, S.B. and Leclair, S.E. (eds.), Fluvial Sedimentology VII, International Association of Sedimentologists Special Publication 35, Blackwell, 399-407.

Ghasemi, H., Hedayati Kharagh, S.N., and Kazemi, Z., 2019. Mineral chemistry and physical conditions of crystallization in Filshour and Goft dioritic intrusions, southwest Sabzevar. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27(3), 667-682. (In Persian).

Ghasemi, H., Kazemi, Z., Mousivand, F., and Griffin, W., 2018. Whole-rock geochemistry and mineral chemistry of the Late Cretaceous dacites in SW Sabzevar: Constrain on their origin and tectonic setting. Petrological Journal 9(3), 79-100. DOI:10.22108/ijp.2018.105937.1049. (In Persian).

Ghorbani, M., 2008. Economic geology of ore deposits and indication of Iran, First Edition, Arian Zamin Publications, Tehran, 674 p. (In Persian). DOI:10.1007/978-94-007-5625-0.

Hajalilou, B., Razmara, M., Hajalilou, N., 2021. Recognition of Vanadium titanomagnetite origin by XRM, SEM and EPMA in Ataieh, southwest of Mashhad. Scientific Quarterly Journal of Geosciences 31(2), 53-64. (In Persian). DOI: 10.22071/gsj.2018.96076.1237.

Harms, J.G., and Fahnestock, R.K., 1965. Classification bed forms and flow phenomena (with an example from the Rio Grande). In Middleton, G.V. (ed.), primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 12, 84-115. DOI:10.1306/BC743C7F-16BE-11D7-8645000102C1865D.

Jafari, A., and Ghasemi, H., 2023. Geologic history of the Sabzevar oceanic basin, NE Iran: An overview from continental rifting to obduction in the NeoTethys oceanic system. Journal of Asian Earth Sciences 245, 105559. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105559.

Jafarian, M.B., and Jalali, A., 2000. Geological quadrangle map of Sheshtamad, 1:100,000 series, No. 7561, Geological Survey of Iran, Tehran. (In Persian).

Jain, M., Tandon, S.K., Singhvi, A.K., Mishra, S., and Bhatt, S.C., 2005. Quaternary alluvial stratigraphic development in a desert setting: a case study from the Luni River basin. Thar Desert of western India, In Blum, S.B. Marriott, M.D. and Leclair, S.E. (eds.), Fluvial Sedimentology VII, International Association of Sedimentologists Special Publication 35, Blackwell, 349-371. https://doi.org/10.1002/9781444304350.ch19

Kazemi, Z., Ghasemi, H., Mousivand, F., and Griffin, W., 2019a. Late Cretaceous subduction-related magmatism on the northern edge of Central Iran zone, southwest Sabzevar. Iranian Journal of Geology 13(49), 1-21. (In Persian).

Kazemi, Z., Ghasemi, H., Tilhac, R., Griffin, W., Shafaii Moghadam, H., O'Reilly, S., and Mousivand, F., 2019b. Late Cretaceous subduction-related magmatism on the southern edge of Sabzevar basin, NE Iran. Journal of the Geological Society 176(3), 530-552. https://doi.org/10.1144/jgs2018-076.

Kowsari, S., Alavi-Naini, M.R., Azarm, F., and Rezvani, J., 1987. Detailed exploration report of Kahnuj titanium deposit, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, 250 p. (In Persian).

Lensch, G., and Davoudzadeh, M., 1982. Ophiolites in Iran. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Monatshefte 5(5), 306-320. DOI:10.1127/njgpm/1982/1982/306.

Martinson, O.J., Ryseth, A., Helland-Hansen, W., Flesche, H., Torkildsen, G., and Idil, S., 1999, Stratigraphic base level and fluvial architecture: Ericson Sandstone (Campanian), Rock Springs Uplifts, SW Wyoming, USA, Sedimentology 47, 235-259.

McDonough, W.F., and Sun, S.S., 1995. The composition of the earth. Chemical Geology, 120, 223-253. https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4.

Miall, A.D., 1996. The geology of fluvial deposits: Sedimentary facies, basin analysis and petroleum Geology, Springer-Verlag, New York, 582 p.

Moghaddasi, S.J., and Yazdi, J., 2016. Geology and formation of titaniferous placer deposits in Upper Jogaz Valley area, Fanuj, Sistan and Baluchestan province, Iran. Journal of Economic Geology 7(2), 327– 341. Doi:10.22067/ECONG.V7I2.28197 (In Persian).

Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., and Hashemi, F., 2006. Lithofacies and Petrofacies of middle Jurassic siliciclastic sediments in east of Binaloud and its relation with tectonic setting and source, Iranian Journal of Geology, 2(4), 33-46. (In Persian).

Naeimi, R., 2018. Final report of the exploration operations of the south Dizaj (Jafarkhan) ironstone exploratory area, southeast of Shahrood. Industry, Mining and Trade Organization of Semnan Province, internal and unpublished report, 80 p. (In Persian).

Nasrabady, M., Shi, Y., Lustrino, M., and Rossetti, F., 2023. Geochemical and geochronological constraints on the origin of the Sabzevar ophiolites (NE Iran): Forced far-field subduction initiation in the upper-plate of the + subduction zone. Geochemistry 83(3), 125962. DOI:10.1016/j.chemer.2023.125962.

Pettijohn, F.J., Potter, P.E., and Siever, R., 1973. Sand and sandstone, Springer-Verlag, New York, 553 p. DOI:10.1007/978-1-4612-1066-5.

Rahimsouri, Y., Alipour, S., and Hosseizadeh, B., 2017. Mineralogy, geochemistry and genesis of titanium-rich placer in Khanik deposit, Urmia, West Azarbaijan Province, NW Iran. Applied Sedimentology 5(9), 58-73. (In Persian).

Rossetti, F., Nasrabady, M., Vignaroli, G., Theye, T., Gerdes, A., Razavi, M., and Moin Vazir, H., 2010. Early Cretaceous migmatitic mafic granulites from the Sabzevar range (NE Iran): implications for the closure of the Mesozoic peri-Tethyan oceans in central Iran. Terra Nova 22, 26-34. https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00912.x

Shafaii Moghadam, H., Corfu, F., Chiaradia, M., Stern, R.J., and Ghorbani, G., 2014. Sabzevar Ophiolite, NE Iran: Progress from embryonic oceanic lithosphere into magmatic arc constrained by new isotopic and geochemical data. Lithos 210-211, 224-241. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.10.004.

Subasinghe, H.C.S., and Ratnayake, A.S., 2022. General review of titanium ores in exploitation: present status and forecast. Comunicações Geológicas 109(1), 21-31. DOI: https://doi.org/10.34637/aab4-mk81.

Whitney, D.L., and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist 95,185-187. DOI:10.2138/am.2010.3371.