

Original Research Paper

Geology, mineralogy, geochemistry, and genesis of Garmab sodium sulfate deposit, East of Semnan

Mehdi Ghosipoor¹, Masood Alipour-Asll^{1*}, Mahmood Sadeghian¹

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2024 February 26

Accepted: 2024 July 31

Available online: 2024 December 21

Keywords:

Shallow intracontinental basins

Marine evaporites

Upper Eocene

Sodium sulfate

Garmab

Semnan

ABSTRACT

The geological rock units in the Garmab area include the Eocene pyroclastic, lava flow, sedimentary, evaporite, and Oligocene-Miocene sedimentary-evaporite sequences. The sodium sulfate-bearing stratigraphic units include shale, siltstone, marl and gypsiferous marls with upper Eocene age, among which the dark gray shale unit has the most association with sodium sulfate. The amounts of MgO, CaO, and Na₂O in the Garmab shales are higher than the North American Shale Composition (NASC), which indicates their deposition in a shallow and closed marine environment. The Garmab sodium sulfate was deposited under hot and dry climate conditions at the latitude of 25° to 40°N and the action of hydrothermal fluids related to Eocene volcanic activities reached to the basin floor through oblique-slip active faults. Based on the mineralogy of Garmab deposit (glauberite, anhydrite, gypsum, and halite), seawater brines are rich in calcium, sodium, chlorine and sulfate. The sedimentary-evaporite layers were most likely deposited in the post-rift stage and in the marginal parts of the subduction-related intracontinental basins and or in the central parts of the shallow rift basins when the basin floor was uplifted. The Garmab sodium sulfate is classified in the category of marine evaporite deposits, which was formed in a shallow intracontinental basin.

1. Introduction

Sodium sulfate minerals, halite, sylvite, gypsum and anhydrite are usually formed as evaporite layers along with marl, marly limestone, shale, siltstone and claystone in the continental and marine depositional settings. Environmental factors such as climate, location, topography, and geology control the input and enrichment of solutes and sedimentary deposit types in arid closed basins (e.g., Eckardt, 2001; Gu and Eastoe, 2021). Glauberite (Na₂Ca(SO₄)₂) is a common sodium sulfate salt in ancient and modern saline lakes. In closed non-marine and marine environments, the continuous evaporation of water leads to the deposition of sodium sulfate minerals such as glauberite, thenardite and mirabilite. Their deposition is related to the

Ca-Na-SO₄-Cl-rich brines. In a closed hydrological system, the composition of water brines largely depends on unstable lithologies that are leached and altered by inflow waters in the drainage basin surrounding a salt basin.


The Garmab sodium sulfate deposit is located 35 km east of Semnan city, and it is the only active sodium sulfate mine in the country (Figure 1-a and b), which is being mined by Iranian Amlah Mining Company. In this deposit, sodium sulfate is observed as lenses and layers in the Upper Eocene bituminous shale and marl unit. Geological and exploration studies to identify similar sodium sulfate deposits in the Semnan-Garmsar area and other regions of Iran with the same geological and geographical features

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

Citation:

Ghosipoor, M., Alipour-Asll, M., Sadeghian, M., 2024. Geology, mineralogy, geochemistry, and genesis of Garmab sodium sulfate deposit, East of Semnan. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 34(4), 134, 1-22. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.445096.2135>.

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

 doi: 10.22071/gsj.2024.445096.2135

 dor: 20.1001.1.10237429.1403.34.4.1.1



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

have not been useful. So far, the Garmab sodium sulfate deposit has been studied from the aspects of structural geology (Shabaniyan et al., 2015), geophysical explorations using magnetometry and gravity methods (Afshar et al., 2018) and resistivity technique (Mostafaie and Ramazi, 2015), but this deposit has not been studied from the point of view of economic geology and genesis. In this research, the Garmab sodium sulfate deposit is investigated from the point of view of geology, mineralogy, geochemistry and mineralization, and based on the results is presented a model for the formation of this deposit, which may be a suitable method for prospecting sodium sulfate prospecting in Garmab and similar regions in the country.

2. Research methodology

This research was started by fieldworks in consecutive rounds, and during the fieldwork was recorded the geology and mineralization evidence. In this research, for geological, petrography, mineralogy and geochemical investigations were sampled from the sodium sulfate rocks and their accompanying rock units in outcrops, mining trenches, and walls of open pit mine. The number of 40 thin and 15 thin-polished sections have been prepared from the various rocks, and petrography, mineralogy, structure and texture of minerals have been carried out on the samples. In order to the mineralogical study of sodium sulfate and accompanying rocks, 10 samples were also analyzed using X-ray diffraction (XRD) method in the Zarazma mineral studies laboratory in Tehran. Several of 4 sodium sulfate, shale and gypsiferous shale samples have been selected for geochemical analysis. The concentration of major, trace and rare earth elements in 4 rock samples was analyzed using ICP-OES/MS methods in Zarazma Laboratory. Based on field observation and microscopic studies, 2 polished-thin sections from the evaporite rocks were selected to study the chemistry of sodium sulfate and the other evaporite minerals using a Scanning Electron Microscope (FESEM) at the central laboratory of Shahrood University of Technology.

3. Results

3.1. Geology and stratigraphy

Based on field observations and geologic, stratigraphy and petrographic investigations, the rock units in Garmab area include Eocene volcanic-sedimentary and Oligocene-Miocene sedimentary-evaporite units. Eocene volcano-sedimentary units contain lava flows, pyroclastic, sedimentary and evaporite rocks. The Eocene volcano-sedimentary rocks are locally cut by felsic to mafic (mostly intermediate) sub-volcanic bodies and diabase dikes.

- **Eocene lava flows:** The lava flows include porphyry andesite and andesite-basaltic rocks, which are associated with lithic tuff, tuffaceous shale, siltstone, and sandstone sequences. This unit is light- to dark gray in color. Plagioclase is the most abundant mineral in the composition of these rocks, which is accompanied by small amounts of hornblende, pyroxene, and magnetite. These rocks have a porphyritic texture with microlith background. Secondary minerals composed of calcite, chlorite, epidote, sericite, and calcite (Figure 6).

- **Eocene pyroclastic rocks:** Pyroclastic rocks are generally observed together with porphyry andesite and basaltic andesite lava flows in this area. Tuffs are a combination of light green and thin layers of sandy tuff, tuffaceous shale, lithic tuff, tuffaceous siltstone, and calcareous shale. These rock units mostly cropped out in the northwest of the Garmab area (Figure 3).

- **Eocene sedimentary rocks:** Sedimentary rocks include sandstone, marl, siltstone and shale with thin to medium layering and gray, cream and green

colors, in which the marl-shale unit is dominant (Fig. 4). The sublitharenite sandstone unit has a brown to red color. Their composition consists of quartz, feldspar, rock fragments, and a small amount of chlorite and biotite (Fig. 8-a and b). Marl unit includes gray, cream, and green marls, in which shale, gypsiferous shale, and gypsum are also found in different amounts in its layered horizons. Siltstone unit has a brownish-gray color and is mostly composed of clay minerals, muscovite, calcite and dolomite with small amounts of anhydrite and gypsum. Shale unit consists of gray, dark gray, and black laminated calcareous shale (Fig. 8-e). Shale unit is mostly associated with evaporite rocks and glauberite (Fig. 4-a). In microscopic studies, shale is mostly composed of clay minerals, quartz, plagioclase, muscovite, chlorite, anhydrite, and calcite (Fig. 8-f). The mineralogical study of the shale samples using X-ray diffractometry (XRD) method shows quartz, anhydrite, dolomite, muscovite, illite and a small amount of albite and chlorite.

- **Eocene evaporite rocks:** In the Garmab area, volcanic-sedimentary series with lava flows, pyroclastic and marine terrigenous sedimentary rock sequences are dominant Eocene rock units, which towards top of sequence (south Garmab area) moved to the shallow sedimentary units and finally to sedimentary-evaporite units. One of the unique features of the sedimentary-evaporite sequence in the Garmab area is the presence of sodium sulfate as a discrete stratigraphic horizon. The hanging- and foot wall rocks of sodium sulfate horizon are shale and gypsiferous marl interval. In one case, the thickness of the sodium sulfate horizon is several meters and it is being exploited as a sodium sulfate mine (Fig. 4a-c). Based on microscopic studies, glauberite is the only sodium sulfate mineral in Garmab mine, which is accompanied by anhydrite and a small amount of gypsum.

- **Oligo-Miocene rocks:** Oligo-Miocene rock units can be divided into two parts. Some units (e.g., OLMm,c,s, OLMsh,m,s, OLMt,s, and OLMl) are comparable to different members of the lower red formation, and the other part (e.g., OLMs,m,c, OLMs, m,g, OLMl,ml and OLMm,g,l) are equivalent with members of the Qom Formation (Fig. 5a-c). There is a discontinuity between these two rock units. Rock series in the lower part show most features of sedimentary and pyroclastic facies of the continental environment, while the rock set in the upper part mostly display the marine environment.

- **Miocene rocks:** Miocene rock units are exposed in the southern part of the Garmab area and are divided into two parts. The boundary between these two parts is gradual and continuous. Mql, ml unit consists of limestone, sandy limestone, marl limestone and marl alternating with cream and gray in color. Mqm,g,l unit consists of green marl series with interlayers of red marl, gypsum horizons, calcareous limestone, limestone and mudstone (Fig. 5c-d).

3.2. Geochemistry

To study the geochemical characteristics of sodium sulfate and its host rocks were selected 4 litho-geochemical samples. These samples were selected from the bituminous calcareous shale, gypsiferous shale, sodium sulfate rock, and anhydrite and sodium sulfate rock. The concentration of major oxides, trace and rare earth elements in these samples are given in Table 1. The chemistry of minerals has also been studied in 2 samples on glauberite and anhydrite (Tables 2 and 3).

3.2.1. Geochemistry of sodium sulfate-hosted shale

The major oxides values in the bituminous calcareous shale and gypsiferous

shale samples are normalized to the North American Shale Composition (NASC, Gromet et al., 1984). The enrichment of Mg, Ca, and Na in the shale samples is due to the presence of dolomite, calcite, anhydrite, glauberite and gypsum minerals in their composition (Fig. 10-a). The high amount of MgO, CaO and Na₂O in the host shale rocks indicates that they were deposited in a shallow and closed marine basin. In such sedimentary environments, the input of rivers and terrigenous materials from the continents is less and the rate of evaporation is high (e.g., Sonnenfeld, 2000; Warren, 2010, 2016). In trace elements concentration diagram from the Garmab shale samples, which is normalized to NASC, the content of Sr in the host shale and gypsiferous shale is higher than the NASC (Fig. 10-b). Considering that the Garmab shales have carbonate cement and evaporite minerals (e.g., anhydrite, sodium sulfate, and gypsum), therefore, the enrichment of Sr in their chemistry is justified.

The geochemical behavior of trace elements is also used to investigation the redox conditions of the sedimentation environment. For example, Th/U ratio is the parameter that provides more information about depositional conditions. Thorium usually concentrates in clay sediments under oxidizing conditions, so a Th/U value of less than 2 is used as an indicator of anoxic conditions (Wignall and Twitchett, 1996). The value of Th/U in the Garmab shale and gypsiferous shale is 2.07 and 0.05, respectively, and indicates the anoxic conditions. Also, the negative Ce anomaly in the host shale samples shows the anoxic conditions of depositional environment (Fig. 10-c). The Al₂O₃/TiO₂, Th/Cr, and Cr/Ni ratios are used to investigate the composition of sediment source rocks (Oni et al., 2014; Armstrong-Altrin et al., 2016; Garver et al., 1996). The values of these ratios for the Garmab shales indicate their origin from intermediate igneous rocks (Table 2).

3.2.2. Geochemistry of sodium sulfate rocks

The NASC-normalized major oxides concentration diagram of the Garmab sodium sulfate rocks shows the enrichment in Na₂O and CaO (Fig. 11-a). In the NASC-normalized trace element values of sodium sulfate rocks, the Sr value in sodium sulfate rock samples is higher than the NASC (Fig. 11-b).

3.2.3. Mineral chemistry

In this research, the mineral chemistry investigation has been carried out on glauberite and anhydrite. Based on the electron microprobe analysis results, the O, S, Na, and Ca constitute the highest weight percentage of glauberite, respectively (Table 3). The average amount of Na, S, Ca and O in the studied mineral is 10.67, 22.35, 16.96 and 51.96 wt.%, respectively. If the average chemical composition of the studied mineral is compared with the chemical composition of reference glauberite, it has the most geochemical similarity with glauberite (Fig. 12-c). The O, Ca, and S constitute the highest weight percentage of anhydrite, respectively (Table 4). The average amount of O, Ca and S in the studied mineral is 53.54, 24.10 and 21.95 wt.%, respectively. If the average chemical composition of the studied mineral is compared with the chemical composition of reference anhydrite, it has the most geochemical similarity with anhydrite (Fig. 13-c).

4. Discussions and conclusion

The Garmab area is located in the northern part of the Central Iran structural zone (CISZ). Tectonic evolution study of the Iranian crust and especially the (CISZ) shows that during the Upper Jurassic-Cretaceous time, simultaneously with the subduction of the Neo-Tethys oceanic crust under the Central Iran continental crust and formation of volcanic-plutonic arcs, the shallow intracontinental marine basins is formed in the continent-

continent collision zone during the Eocene to Pliocene times in the Central Iran zone. During the Eocene, in the central parts of the intracontinental rift basins, due to volcanic activities are formed a sequence of pyroclastic-sedimentary rocks (tuff and lithic tuff with andesite, dacite, trachyandesite and basaltic andesite in composition, tuffaceous shale, shale, mudstone, sandstone, conglomerate and sometimes evaporite rocks) and lava flows mostly dacite, andesite, and andesite-basalt lavas (Fig. 14-a). During the Upper Eocene-Miocene, granitoid rocks as massive, apophyse, and dyke forms were intruded into the Eocene volcano-sedimentary sequences (Fig. 2). In the marginal parts of the intracontinental rifts, as a result of the activity of the extensional and normal oblique-slip faults, shallow marine basins have been formed in different parts of the central Iran zone from the Upper Eocene to the Pliocene. A sequence of marl, shale, sandstone, conglomerate and evaporites (e.g., anhydrite, gypsum, sodium sulfate, halite) has been deposited in the shallow marginal basins (Fig. 14-b). Also, in the central parts of the intracontinental rift basins, when the depth of the sea water decreased due to the uplifting of the basin floor and intensity of evaporation was high, evaporite layers were deposited with marl and shale. During the Eocene to Pliocene times in central Iran (Upper Eocene time at the location of Garmab sodium sulfate deposit), hydrothermal vents related to the Cenozoic volcanic activities under extensional tectonic regime entered the sedimentary environment through oblique-slip normal faults. In addition, some sedimentary materials have entered the intracontinental basins as terrigenous materials from drainage basin rocks and continental volcanic eruptions (such as ashes, various gases, and acidic waters). According to the mineralogy of evaporites in Garmab area (glauberite, anhydrite, gypsum and halite), the evaporite brine waters were rich in Na-Ca-SO₄-Cl. Since the composition of sediments of evaporite basins depends on the lithology of the drainage basin surrounding a saline lake (Hardie and Eugster, 1970; Eugster, 1980), in the Garmab area, lithology of drainage basin very likely were felsic to mafic (mostly intermediate) volcanic-pyroclastic-intrusive rocks, pyrite-bearing shale, and intermediate volcanic ashes. The existence of Troude-Chah Shirin volcano-plutonic arc with felsic to mafic (mostly intermediate) igneous rocks in the north and vicinity of the Garmab area confirms this hypothesis. Glauberite is the most important sodium sulfate mineral in the Garmab area and it is formed along with anhydrite, gypsum and halite as lenses, layers and disseminated prismatic crystals forms in the upper Eocene gypsiferous marl, bituminous shale, mudstone, sandstone and conglomerate sequences. In these sequences, evaporite minerals are mostly associated with bituminous shales. The alternation of bituminous shales with evaporite rocks indicates an active progressive-regressive system in which the deposition of bituminous shale is followed by the deposition of evaporites (Eugster, 1985). Finally, the Garmab sodium sulfate was deposited with Upper Eocene shale and marl in the marginal parts of the subduction-related shallow closed intracontinental marine basins, closed hydrographic basin, hot and dry climate, and intense evaporation in latitude of 25° to 40° N.

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 Amlah Iran Mining Company for their cooperation in sampling from the Garmab sodium sulfate mine. Authors have especial thanks to the staff of Scientific Quarterly Journal of Geosciences and some anonymous reviewers who accept handling and reviewing our manuscript.

زمین شناسی، کانی شناسی، زمین شیمی و الگوی تشکیل کانسار سولفات سدیم گرماب، خاور سمنان

 مهدی قوسی پور^۱، مسعود علی پور اصل^{۱*} و محمود صادقیان^۱^۱ گروه پتروژئولوژی و زمین شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

واحدهای زمین شناسی منطقه گرماب شامل سنگ‌های آذرآواری، آتشفشانی، رسوبی و تبخیری ائوسن، واحدهای رسوبی-تبخیری الیگوسن و میوسن است. واحدهای چینه‌شناسی در برگیرنده سولفات سدیم، شیل، سیلتستون، مارن و مارن‌های ژیس دار ائوسن بالایی هستند، که در این میان واحد شیل خاکستری تیره بیشترین همیافتی را با سولفات سدیم دارد. مقادیر CaO ، MgO و Na_2O در شیل‌های گرماب بیشتر از NASC (شیل آمریکای شمالی) است که نشان از ته‌نشست آن‌ها در یک محیط دریایی کم‌ژرفا و بسته دارد. سولفات سدیم گرماب تحت شرایط آب و هوایی گرم و خشک، در عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و عملکرد سیالات گرمابی مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی ائوسن که از طریق گسل‌های اُریب لغز فعال به کف حوضه می‌رسیدند، نهشته شده است. با توجه به کانی‌شناسی کانسار گرماب (گلوبریت، انیدریت، ژیس و هالیت) شوراب‌های دریایی، غنی از کلسیم، سدیم، کلر و سولفات بوده است. لایه‌های رسوبی-تبخیری به احتمال زیاد در مرحله پس از کافت‌زایی (ریف‌زایی) و در بخش‌های حاشیه‌ای حوضه‌های رسوبی درون قاره‌ای مرتبط با مناطق فرورانش و یا در بخش‌های مرکزی حوضه‌های کافتی (کششی) کم‌ژرفا در زمان‌هایی که بستر حوضه دچار بالاآمدگی شده است، نهشته شده‌اند. سولفات سدیم گرماب در دسته نهشته‌های تبخیری دریایی طبقه‌بندی می‌شود که در یک حوضه کم‌ژرفای درون قاره‌ای تشکیل شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:

حوضه‌های کم‌ژرفای درون قاره‌ای
تبخیری‌های دریایی
ائوسن بالایی
سولفات سدیم
گرماب
سمنان

۱- پیش‌نوشتار

(بیشتر نوژن و پلیستوسن) چیره هستند (e.g., Mees, 1998; Khalili and Torabi, 2003; Rahimpour-Bonab and Abdi, 2012; Yu et al., 2015).

فرورانش پوسته اقیانوسی تیس جوان به زیر پوسته قاره‌ای ایران میانی از زمان کربنیفر- پرمین، همراه با همگرایی و برخورد بین صفحه عربستان (حاشیه شمال‌خاوری گندوانا) و صفحه اوراسیا، به ایجاد یک کمربند آزاد کننده تنش قوی در ایران میانی انجامیده است که با ترک خوردگی، گسلش و واگرایی، سامانه‌های کششی را به وجود آورده است. این سامانه‌های کافتی (ریف‌تی) بزرگ حاوی لایه‌های تبخیری فراوان و نهشته‌های ژیس، هالیت، سولفات سدیم و پتاسیم از نوع آواری قاره‌ای هستند که در حوضه‌های دریاچه‌ای بسته سنوزویک نهشته شده‌اند. پی‌جویی‌های زمین‌شناسی و اکتشافی، وجود کانسارهای سولفات سدیم را در مناطقی از استان‌های اراک (کویر میغان)، سمنان (گرمسار، سرخه و طرود)، قم (حوض سلطان و حوض مره)، تهران (جنوب ورامین)، اصفهان (کاشان، اردستان و خور)، یزد (ابرقو، مروست، هرات و سیاه کوه)، کرمان (کفه رسی- نمکی سیرجان و

کانی‌های سولفات سدیم، هالیت، سیلویت، ژیس و انیدریت به‌طور معمول در حوضه‌های تبخیری خشکی و دریایی به صورت لایه‌های تبخیری همراه با مارن، سنگ آهک مارنی، شیل، سیلتستون و سنگ‌های رسی تشکیل می‌شوند. عوامل محیطی مانند آب و هوا، موقعیت مکانی، توپوگرافی و زمین‌شناسی، ورود و غنی‌سازی املاح و نوع نهشته‌های رسوبی در حوضه‌های خشکی بسته را کنترل می‌کنند (e.g., Eckardt, 2001; Gu and Eastoe, 2021). گلوبریت ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$) سولفات سدیم رایج در محیط‌های دریاچه‌های شور قدیمی و عهد حاضر است. در حوضه‌های غیردریایی عهد حاضر، تبخیر مداوم آب دریاچه به رسوب کانی‌های سولفات سدیم مانند گلوبریت، تاردیت و میرابیلیت می‌انجامد. رسوب آن‌ها به شوراب‌های غنی از $\text{Na-SO}_4\text{-Cl}$ مربوط می‌شود. در این پاراژنز، میرابیلیت و تاردیت کانی‌هایی هستند که بیشترین کاربرد صنعتی را دارند، اما بر اهمیت اقتصادی گلوبریت نیز تاکید شده است. میرابیلیت در محیط‌های دریاچه‌ای عهد حاضر لایه‌های ستبر تشکیل می‌دهد، در حالی که لایه‌های تاردیت و گلوبریت در سازندهای قدیمی‌تر

* نویسنده مسئول: مسعود علی پور اصل؛ E-mail: masoodalipour@shahroodut.ac.ir

ماخذنگاری:

قوسی پور، م.، علی پور اصل، م. و صادقیان، م.، ۱۴۰۳، زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و الگوی تشکیل کانسار سولفات سدیم گرماب، خاور سمنان. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۴(۴)، ۱۳۴-۱۲۲. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.445096.2135>

doi: 10.22071/gsj.2024.445096.2135



doi: 20.1001.1.10237429.1403.34.4.1.1

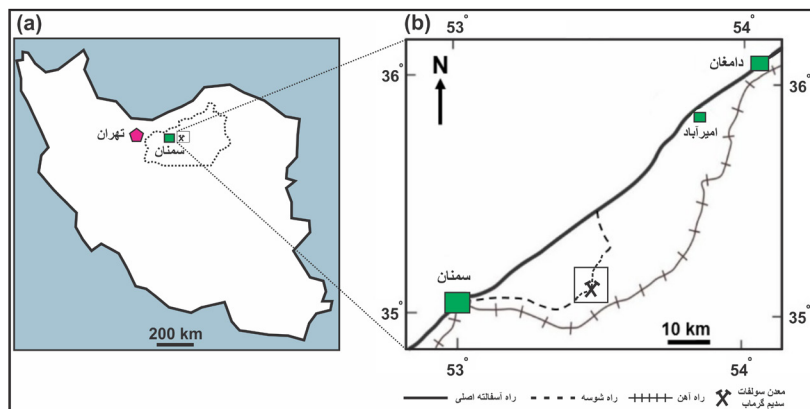
حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

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

جغرافیایی یکسان نتیجه‌بخش نبوده است. کانسار سولفات سدیم گرماب تا به حال از جنبه‌های زمین‌شناسی ساختمانی (شبانان و همکاران، ۱۳۹۴)، کاوش‌های ژئوفیزیکی با استفاده از روش‌های مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی (Afshar et al., 2018) و مقاومت ویژه الکتریکی (Mostafaie and Ramazi, 2015) مطالعه شده است، اما این کانسار از نگاه زمین‌شناسی اقتصادی و زایشی مطالعه نشده است. در این پژوهش، کانسار سولفات سدیم گرماب از منظر زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و کانه‌زایی بررسی می‌شود و بر پایه نتایج حاصله مدلی برای تشکیل این کانسار ارائه می‌شود که شاید راهکار مناسبی برای اکتشاف سولفات سدیم در ناحیه گرماب و نواحی مشابه در کشور باشد.

کراترهای جنوب راین، خراسان جنوبی (فردوس و طبس) نشان می‌دهد، که بخش عمده‌ای از این کانسارها از نوع پلایا، دریاچه‌های آب شور و رسوبات تبخیری عهد حاضر هستند.

کانسار سولفات سدیم گرماب در ۳۵ کیلومتری خاور شهرستان سمنان تنها معدن فعال سنگ سولفات سدیم از نوع گلوبریت در کشور می‌باشد (شکل a-1 و b)، که توسط شرکت معدنی املاح ایران در حال استخراج است. در این کانسار، سولفات سدیم به صورت لایه‌ای و عدسی در واحد شیلی-مارنی گچ‌دار ائوسن بالایی تشکیل شده است. مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی برای شناسایی کانسارهای سولفات سدیم مشابه در ناحیه سمنان-گرمسار و نواحی دیگر ایران با ویژگی‌های زمین‌شناسی و



شکل ۱-۱) موقعیت جغرافیایی کانسار سولفات سدیم گرماب در ایران و استان سمنان. (b) راه‌های دسترسی به محدوده کانسار سولفات سدیم گرماب.

Figure 1-a) The geographical location of the Garmab sodium sulfate deposit in Iran and Semnan province. b) Access ways to the area of Garmab sodium sulfate deposit.

۲- روش پژوهش

پلاسمای جفت شده القایی-نشر نوری (ICP-OES) در آزمایشگاه مطالعات مواد معدنی زرآما در تهران تجزیه شد. ترکیب این روش با L.O.I ترکیب کلی نمونه سنگ را تشکیل می‌دهد. مقادیر غلظت عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی در ۴ نمونه سنگ ژئوشیمی نیز به روش انحلال در مخلوط چهار اسید و با استفاده از طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) در همان آزمایشگاه تجزیه شد. بر اساس شواهد زمین‌شناسی صحرائی و مطالعات میکروسکوپی، تعداد ۲ نمونه برش نازک-صیقلی از سنگ‌های سولفات سدیم و سنگ گچ برای مطالعه شیمی کانی‌های سولفات سدیم و انیدریت با استفاده از دستگاه ریزکاوئند 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 تجزیه شده است.

۳- داده‌ها و اطلاعات

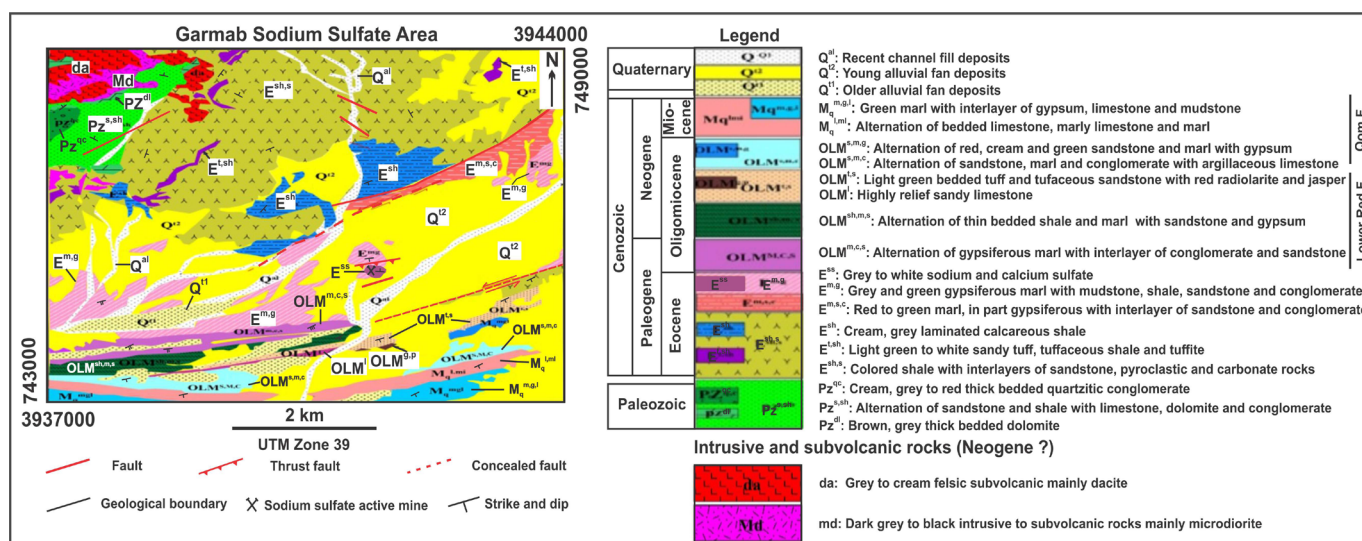
۳-۱- زمین‌شناسی و چینه‌شناسی

محدوده کانسار سولفات سدیم گرماب از نظر ساختاری در منتهی‌الیه شمالی پهنه ساختاری ایران مرکزی و در همبری با پهنه ساختاری البرز واقع شده است. این محدوده در پهنه برخوردی گسل‌های راستالغز چپر عطاری، انجیلو و دلازیان قرار دارد. بخش شمالی گستره مورد مطالعه تحت تأثیر عملکرد گسل عطاری است و بخش

این پژوهش با انجام بازدیدهای صحرائی طی نوبت‌های متوالی و مطالعه الگوی تشکیل کانسار کوه میل شروع شد و در طی آن شواهد صحرائی زمین‌شناسی و کانه‌زایی ثبت شد. در انجام این پژوهش، برای بررسی‌های زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی از سنگ‌های سولفات سدیم و سنگ‌های همراه آن‌ها در رخنمون‌های سطحی، ترانشه‌های اکتشافی و استخراجی و دیواره‌های معدن روباز نمونه‌برداری صورت گرفته است. تعداد ۴۰ برش نازک و ۱۵ عدد برش نازک-صیقلی از سنگ‌ها تهیه و مطالعات میکروسکوپی سنگ‌نگاری، کانی‌شناسی و ساخت و بافت ماده معدنی روی آن‌ها انجام شد. برای مطالعه کانی‌شناسی سولفات سدیم و سنگ‌های همراه تعداد ۱۰ نمونه نیز با استفاده از روش پراش سنجی اشعه ایکس (XRD) در آزمایشگاه مطالعات مواد معدنی زرآما در تهران بررسی شده است. تعداد ۴ نمونه از سنگ‌های سولفات سدیم، شیل و شیل‌های ژئوسداس برای بررسی‌های زمین‌شیمی انتخاب شده است. نمونه‌برداری از سنگ‌ها به روش قطعه‌ای انجام شده است، بدین ترتیب که در هر ایستگاه حدود ۵۰ قطعه کوچک سنگ با مقطع عرضی ۳ تا ۴ سانتی‌متر مربع برداشت شده است. وزن کلی هر نمونه سنگ ژئوشیمی در حدود ۳ کیلوگرم بوده است. نمونه‌های سنگ به ترتیب مراحل خردایش و آسیاب را پشت‌سر گذاشته است. تعداد ۴ نمونه سنگ ژئوشیمی طی فرایند ذوب قلیایی در حضور مواد کمک ذوب در بوت‌های پلاتین ذوب شده، سپس نمونه مذاب به کمک محلول اسیدی هضم شده و مقادیر اکسید عناصر اصلی با استفاده از طیف‌سنج

رخنمون‌های سنگی مربوط به سنوزویک، مجموعه رسوبی، آذرآواری و آتشفشانی ائوسن است، که بخش قابل ملاحظه‌ای از مساحت محدوده سولفات سدیم گرماب را نیز تشکیل می‌دهند. سازندهای قرمز زیرین (الیگوسن)، قم (الیگومیوسن) و قرمز بالایی (میوسن) گسترش شایان توجهی دارند که همراه با لایه‌ها و گنبد‌های گچی و نمکی بخش عمده رخنمون‌های سنگی پهنه ساختاری ایران مرکزی را در ناحیه سمنان و محدوده مورد مطالعه تشکیل می‌دهند. بیشتر گسل‌های ناحیه سمنان در دسته گسل‌های پی‌سنگی هستند و عامل جدا کننده بخش‌های کوهستان و دشت و سازنده زمین‌ریخت ناحیه می‌باشند. این گسل‌ها دارای پتانسیل فعالیت مجدد و ایجاد زمین‌لرزه هستند. ساز و کار این گسل‌ها بیشتر فشارشی معرفی شده است و پی‌سنگ منطقه نیز سنگ‌های آتشفشانی ائوسن می‌باشند (بربریان و همکاران، ۱۳۷۵). بر پایه اطلاعات نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ سمنان (Aghanabati et al., 1994)، ۱:۱۰۰۰۰۰ جام (Alavi-Naini, 1997)، ۱:۲۵۰۰۰ کلاته آبگرم (بهار فیروزی و همکاران، ۱۳۹۶) و مشاهدات صحرایی پژوهش حاضر، سازندهای زمین‌شناسی پالئوزویک، سنوزویک و نهشته‌های کواترنری در محدوده کانسار سولفات سدیم گرماب رخنمون دارند (شکل ۲).

جنوبی آن در پهنه همگرا و فشارشی گسل‌های انجیلو و دلازیان، چین خوردگی‌های مشخصی را در واحدهای سنگی سنوزویک نشان می‌دهد (شیخ‌الاسلامی و همکاران، ۱۳۹۳). از دیدگاه چینه‌شناختی، ناحیه سمنان دربردارنده قدیمی‌ترین رخنمون‌های سنگی از پرکامبرین (سازند کهر) تا جوان‌ترین واحدهای رسوبی چین‌خورده متعلق به پلیوسن (سازند هزاردره) و پوشش‌های رسوبی کواترنری است (صفایی و قلمقاش، ۱۳۹۰). توالی‌های پالئوزویک در پهنه ساختاری البرز ناحیه سمنان شامل سازندهای باروت، زاگون، لالون، میلا (کامبرین)، لشکرک (اردوویسین پسین)، جیرود (دونین)، مبارک (کربنیفر)، درود و روته (پریمین) است، در حالی که در پهنه ایران مرکزی توالی‌های پالئوزویک شامل سازندهای شیرگشت و نیور (سیلورین)، پادها، بهرام و سبزار (دونین) می‌باشد. دوران مزوزویک در پهنه البرز با رخنمون سازندهای الیکا (تریاس)، شمشک، دلچای و لار (ژوراسیک) و سنگ‌های کربناتی آواری کرتاسه مشخص می‌شود، در حالی که واحدهای سنگی مزوزویک در پهنه ایران مرکزی در ناحیه مورد مطالعه رخنمون ندارند. واحدهای سنگی سنوزویک در پهنه البرز با کنگلومرای فجن (پالئوسن) آغاز می‌شود و در ادامه بخش‌های مختلف سازند کرج (ائوسن) رخنمون دارد. در پهنه ایران مرکزی ناحیه سمنان، قدیمی‌ترین



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده سولفات سدیم گرماب (با تغییر اقتباس از بهار فیروزی و همکاران، ۱۳۹۶).

Figure 2. Geologic map of the Garmab sodium sulfate area (modified after Bahar-Firouzi et al., 2017).

رسوبی تخریبی دریایی به همراه افق‌هایی از سنگ‌های آذرآواری و گدازه‌ای، سنگ‌شناسی چیره ائوسن هستند که به سمت بالای توالی (جنوب محدوده گرماب)، به مجموعه کم‌ژرفا و در نهایت به واحدهای دارای رسوبات تبخیری تبدیل می‌شوند. از ویژگی منحصر به فرد این رسوبات تبخیری وجود سولفات سدیم به صورت افق چینه‌ای مشخص است (شکل ۲).

واحد E^{sh,s}: این واحد شامل مجموعه‌ای از شیل و ماسه‌سنگ‌های نازک تا متوسط لایه به رنگ‌های خاکستری، نخودی، کرم و سبز است که بخش شیلی در آن چیره است (شکل ۳-ا). میان‌لایه‌های سبز رنگ از سنگ‌های توفی با ترکیب کریستال لیتیک توف، توف ماسه‌ای و لاپیلی توف و سنگ‌های کربناتی به رنگ قهوه‌ای در داخل این واحد دیده می‌شود (شکل ۳-ب). این واحد در همبری با توده‌های نیمه‌ژرف جوان‌تر دچار دگرسانی شده است و به دلیل آغشتگی به اکسیدهای آهن

۳-۱-۱- واحدهای سنگ-چینه‌ای پالئوزویک

واحدهای سنگ-چینه‌ای پالئوزویک در وسعت کم در بخش باختر-شمال‌باختر محدوده گرماب بروزند دارند. این توالی سنگ-چینه‌ای به ترتیب از پایین به بالا شامل تناوبی از ماسه‌سنگ به رنگ‌های خاکستری تا ارغوانی و شیل به رنگ‌های خاکستری تیره تا سیاه به همراه میان‌لایه‌های اندکی از سنگ‌آهک فسفیل‌دار، دولومیت و کنگلومرا (PZ^{sh}), سنگ‌های دولومیتی و آهک دولومیتی قهوه‌ای رنگ دارای رگه-رگچه‌های کوارتز، کلسیت و باریت (PZ^{dl}) و کنگلومرای کوارتزیستی ستبرلایه تا توده‌ای کرم، خاکستری تا قرمز رنگ (PZ^{qc}) است.

۳-۱-۲- واحدهای سنگی ائوسن

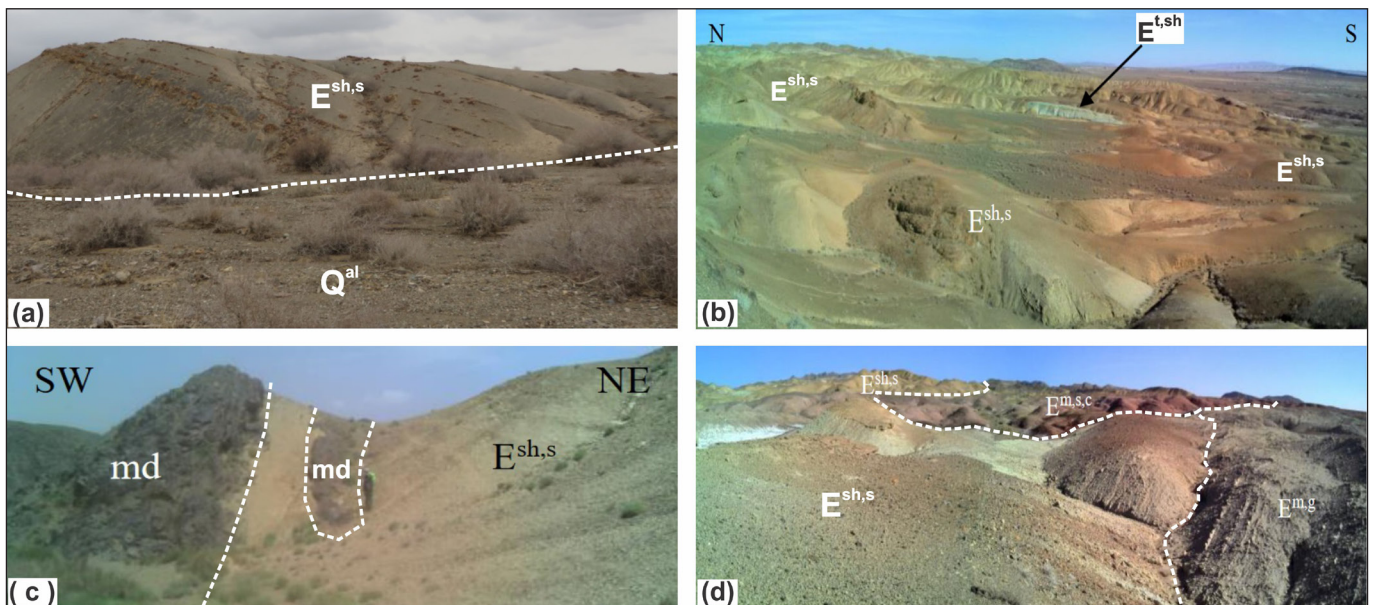
واحدهای سنگ-چینه‌ای ائوسن در بخش شمالی محدوده گرماب رخنمون و گسترش دارند و به صورت ۶ واحد مجزا تفکیک شده‌اند. مجموعه سنگ‌های

– **واحد E^{sh}** : این واحد به صورت تپه ماهوری در قسمت مرکزی محدوده گرماب برونزد دارد و شامل شیل‌های آهکی لامینه و خرد شده به رنگ‌های کرم، خاکستری و نخودی است. ترکیبی از لایه‌بندی بسیار ظریف و سامانه درزه‌ها موجب ایجاد ساخت شیل‌های مدادی شده است. این واحد در واقع بخشی از واحد $E^{sh,s}$ است که در آن اثری از لایه‌های ماسه‌سنگی دیده نمی‌شود.

– **واحد $E^{m,s,c}$** : این واحد با روند تقریبی شمال‌خاوری – جنوب‌باختری در بخش مرکزی محدوده گرماب رخنمون دارد و شامل مجموعه‌ای از مارن، ماسه‌سنگ و کنگلومرای قرمز رنگ نازک تا متوسط لایه است. رخساره چیره این واحد، مارن‌های قرمز رنگ است که به صورت محلی دارای ژئیس می‌باشد. مرز زیرین این واحد بیشتر گسلی است، اما مرز بالایی آن با مجموعه مارن و ژئیس خاکستری مایل به سبز اتوسن به‌طور کامل مشخص و عادی است (شکل ۳-د). بیشینه ستبرای این واحد به ۱۵۰ متر می‌رسد.

به رنگ نخودی تا زرد و قهوه‌ای درآمده است (شکل ۳-ج). به سمت بالای توالی، این واحد به صورت تدریجی به واحد آواری – تبخیری ($E^{m,s,c}$) تبدیل می‌شود، گاهی نیز مرز میان آن‌ها گسلی است (شکل ۴-د). در خارج از محدوده گرماب این واحد با واحدهای گدازه‌ای با ترکیب تراکی‌آندزیت تا تراکی‌بازالت برشی شده و واحد توف برشی و سیلیسی شده همراه است (بهار فیروزی و همکاران، ۱۳۹۶).

– **واحد $E^{t,sh}$** : این واحد در قسمت شمال‌باختر محدوده گرماب و به تقریب در بخش میانی توالی واحد $E^{sh,s}$ و به صورت یک رخنمون نواری شکل با ستبرای کمتر از ۱۰۰ متر با سیمای کاملاً مشخص و به رنگ سبز دیده می‌شود. مجموعه‌ای از توف ماسه‌ای، شیل توفی و توفیت به رنگ سبز روشن، دارای لایه‌بندی نازک تا لامینه‌ای در صحرا به خوبی قابل تشخیص و ردیابی است (شکل ۳-ب).



شکل ۳- (a) تناوبی از شیل و ماسه‌سنگ‌های نازک تا متوسط لایه واحد $E^{sh,s}$ که بخش شیلی در آن چیره است (نگاه به جنوب‌باختر). (b) میان‌لایه‌های سبز رنگ از واحد $E^{t,sh}$ در داخل واحد $E^{sh,s}$ (نگاه به خاور، اقتباس از بهار فیروزی و همکاران (۱۳۹۶)). (c) دگرسانی واحد $E^{sh,s}$ در همبری با توده میکرودیوریتی (نگاه به شمال‌باختر، اقتباس از بهار فیروزی و همکاران (۱۳۹۶)). (d) همبری واحدهای E^{sh} ، $E^{m,s,c}$ و $E^{m,g}$ در محدوده گرماب (نگاه به سمت شمال‌خاور).

Figure 3- a) Alternation of thin to medium layers of shale and sandstone ($E^{sh,s}$) in which the shale unit is dominant (view to SW). b) Interlayers of green tuff from the $E^{t,sh}$ into the $E^{sh,s}$ unit (view to E, after Bahar-Firouzi et al. (2017)). c) Alteration of $E^{sh,s}$ unit in contact with microdiortite body (view to NW, after Bahar-Firouzi et al. (2017)). d) Units of E^{sh} , $E^{m,s,c}$ and $E^{m,g}$ in the Garmab area (view to NE).

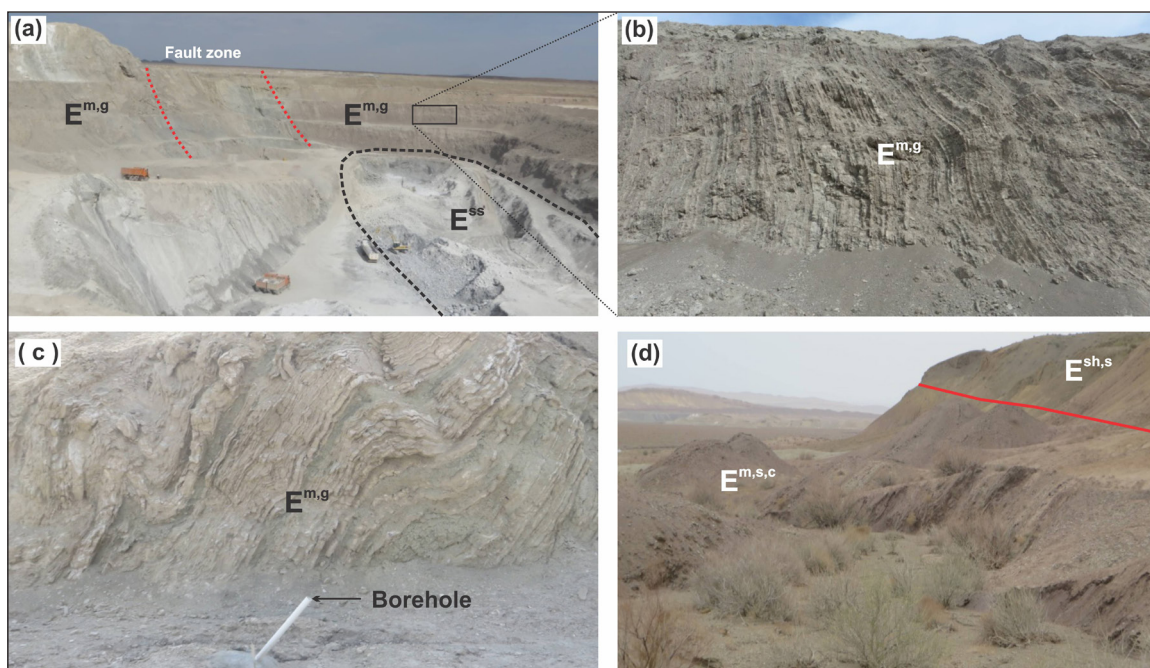
زیادی از سطح این واحد توسط رسوبات مخروطه افکنه‌ای پوشیده شده است. این واحد در حدود ۱۰۰۰ متر ستبرای دارد و با توجه به جنس واحدهای سنگی آن، در مقابل میدان‌های تنش زمین‌ساختی تغییرات آشکار در شیب لایه‌بندی نشان می‌دهد. میزان فراوانی ژئیس در این واحد به صورت جانبی متغیر است. اگرچه تبخیرهای اصلی در داخل این واحد انیدریت و ژئیس هستند اما به صورت محلی رسوبات تبخیری سولفات سدیم هم دیده می‌شود، که در یک مورد به صورت واحد سنگ چینه‌ای مشخص (E^{ss}) بر روی نقشه‌ی زمین‌شناسی نشان داده شده است (شکل ۲ و ۴-ا).

– **واحد E^{ss}** : در بخش میانی محدوده گرماب، در داخل واحد $E^{m,g}$ افق‌های کاملاً

– **واحد $E^{m,g}$** : این واحد با روند تقریبی خاوری – باختری و به صورت تپه ماهوری در بخش مرکزی محدوده گرماب مشاهده می‌شود. رخساره رسوبی چیره این واحد، مارن‌های خاکستری، کرم، سبز و نخودی هستند که ژئیس نیز به مقادیر مختلف در افق‌های چینه‌ای آن وجود دارد. به صورت محلی مادستون، شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرا به رنگ‌های خاکستری تا ارغوانی همراه مارن مشاهده می‌شود (شکل ۴-ا تا ج). لایه‌های ماسه‌سنگی و کنگلومرای در بخش‌های زیرین توالی این واحد فراوان‌تر هستند. این واحد در بخش زیرین به صورت عادی و با مرز مشخص بر روی واحد $E^{m,s,c}$ قرار می‌گیرد و به سمت بالا با مرز نسبتاً مشخص، اما در بیشتر موارد پوشیده، توسط رسوبات کواترنری و رسوبات واحد $OLM^{m,c,s}$ فرا گرفته شده است. بخش

پراکنده در واحد شیلی و مارنی مشاهده می‌شود و بیشترین همیافتی را با شیل‌های بیتومین دار دارد. در یک مورد، ستبرای افق سولفات سدیم به چند متر می‌رسد و به عنوان کانسنگ سولفات سدیم در حال بهره برداری است (شکل ۴-ا). در مطالعه کانی‌شناسی نمونه‌ای از این افق سولفات دار با استفاده از پراش‌سنجی اشعه ایکس، گلوبریت $(Na_2Ca(SO_4)_2)$ و انیدریت $(CaSO_4)$ شناسایی شده است.

هم‌شیب با لایه‌بندی از سولفات سدیم و سولفات کلسیم به رنگ خاکستری روشن تا سفید وجود دارند که ستبرای آن‌ها در حد چند سانتی‌متر تا چند ده سانتی‌متر است (شکل ۲). لایه‌های کمر بالا و کمر پایین افق سولفات دار از مارن، شیل، مادستون، ماسه‌سنگ و کنگلومرا تشکیل شده است (شکل ۴-ا و ب). سولفات سدیم به همراه انیدریت، ژپس و هالیت به شکل‌های عدسی، لایه‌ای و بلورهای منشوری دانه



شکل ۴-ا) عدسی و لایه‌هایی از سولفات سدیم در توالی مارن، شیل و مادستون گچ‌دار واحد $E^{m,g}$ در معدن گرماب (نگاه به شمال). (ب و ج) تناوبی از لایه‌های نازک چین خورده مارن، مادستون و گچ در واحد $E^{m,g}$ در یال یک تاقدیس. (د) مرز گسله میان واحد شیلی، ماسه‌سنگی و توفی ($E^{sh,s}$) و واحد مارنی، ماسه‌سنگی و کنگلومرای ($E^{m,s,c}$) (نگاه به باختر - جنوب‌باختر).

Figure 4-a) Sodium sulfate layers and lenses in gypsiferous marl, shale and mudstone sequence ($E^{m,g}$) in the Garmab mine (view to N). b and c) Alternation of folded thin layers of marl, mudstone and gypsum ($E^{m,g}$) on the anticline limb. d) Fault contact between shale, sandstone and tuff unit ($E^{sh,s}$) and marl, sandstone and conglomerate unit ($E^{m,s,c}$) (view to W-SW).

کلی این واحد در حدود ۲۸۰ متر تخمین زده می‌شود. این واحد در بخش زیرین احتمالاً به وسیله یک ناپیوستگی هم‌شیب بر روی رسوبات ائوسن ($E^{m,g}$) قرار می‌گیرد و به سمت بالا توسط رسوبات شیل، مارن و ماسه‌سنگ الیگومیوسن (واحد $OLM^{sh,m,s}$) به صورت پیوسته و هم‌شیب فرا گرفته شده است.

— **واحد $OLM^{sh,m,s}$** : این واحد به عنوان بخشی از سازند قرمز زیرین با روند به تقریب خاوری-باختری در بخش جنوبی محدوده گرماب رخمون دارد و متشکل از تناوبی از شیل و مارن‌های نازک لایه تا لامینه ارغوانی تا قرمز رنگ با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ خاکستری و رگه‌ها و لایه‌های ژپس است. ستبرای واقعی این واحد در حدود ۲۲۰ متر است. واحد $OLM^{m,s,c}$ با رخساره چیره مارنی در زیر این واحد قرار دارد و به صورت پیوسته توسط واحد OLM^{ts} با رخساره چیره آذرآواری پوشیده می‌شود.

— **واحد OLM^{ts}** : این واحد به عنوان بخشی از سازند قرمز زیرین با روند به تقریب خاوری-باختری در بخش جنوبی محدوده گرماب و همچنین در یال شمالی یک

۳-۱-۳- واحدهای سنگی الیگومیوسن

واحدهای متعلق به زمان الیگومیوسن به دو بخش قابل تقسیم هستند. بخشی از آن‌ها (شامل واحدهای OLM^{ts} ، $OLM^{sh,m,s}$ ، $OLM^{m,c,s}$ ، OLM^{l} و $OLM^{m,c}$) قابل مقایسه با عضوهای مختلف سازند قرمز زیرین هستند و بخش دیگر (شامل واحدهای $OLM^{m,c}$ ، OLM^{lml} ، $OLM^{m,g}$ و $OLM^{m,gl}$) با عضوهای سازند قم هم‌ارز هستند (شکل ۲). بین این دو مجموعه سنگ‌چینه‌ای یک ناپیوستگی وجود دارد. مجموعه واحدهای سنگ-چینه‌ای بخش زیرین بیشتر ویژگی‌های رخساره‌های رسوبی و آذرآواری محیط قاره‌ای را نشان می‌دهند، در حالی که مجموعه سنگی بخش بالایی بیشتر محیط دریایی را تداعی می‌کنند.

— **واحد $OLM^{m,c,s}$** : این واحد با روند خاوری-باختری در بخش جنوب‌باختری گستره مورد مطالعه رخمون دارد و مجموعه‌ای متشکل از مارن‌های گچ‌دار کرم و نخودی رنگ همراه با افق‌هایی از کنگلومرا، سیلستون و ماسه‌سنگ است. بخش‌هایی از سطح این واحد توسط رسوبات کواترنری پوشیده شده است. ستبرای

گچ (واحد OLM^{SP}) به سمت بالا به صورت تدریجی به واحد سازند قم (واحد M_q^{lml}) تبدیل می‌شود. ستبرای آن در منطقه مورد مطالعه در حدود ۲۰۰ متر برآورد می‌شود. از دیدگاه سنگ‌شناختی شامل تناوبی از ماسه‌سنگ و مارن به رنگ‌های قرمز، کرم و سبز با میان لایه‌ها و عدسی‌هایی از سنگ گچ و مقادیر محدودی کنگلومرای قرمز رنگ است. لایه‌های ژپس با ستبراهای مختلف همراه این واحد دیده می‌شود. گاهی ستبرای آن‌ها در حدی است که به صورت واحد مستقل بر روی نقشه نشان داده شده‌اند (شکل ۲ و ۵-۳).

– **واحد OLM^{SP} :** این واحد شامل افق و یا لایه‌های ستبر تا توده‌ای از سنگ گچ است که در داخل واحد $OLM^{s,m,g}$ و در یال شمالی یک ناودیس رخمنون دارد. بیشینه ستبرای لایه‌های گچ دار تا ۵۰ متر می‌رسد. همراه افق‌های سنگ گچ، مارن‌های قرمز و کرم رنگ نیز مشاهده می‌شود (شکل ۵-۲ و ۳-۵).

۳-۱-۴- واحدهای سنگ-چینه‌ای میوسن

واحدهای سنگ‌چینه‌ای متعلق به میوسن در قسمت جنوبی محدوده گرماب و در یال شمالی یک ناودیس رخمنون دارد و در بردارنده دو بخش مجزا است (شکل ۲). همبری بین این دو بخش تدریجی و پیوسته است.

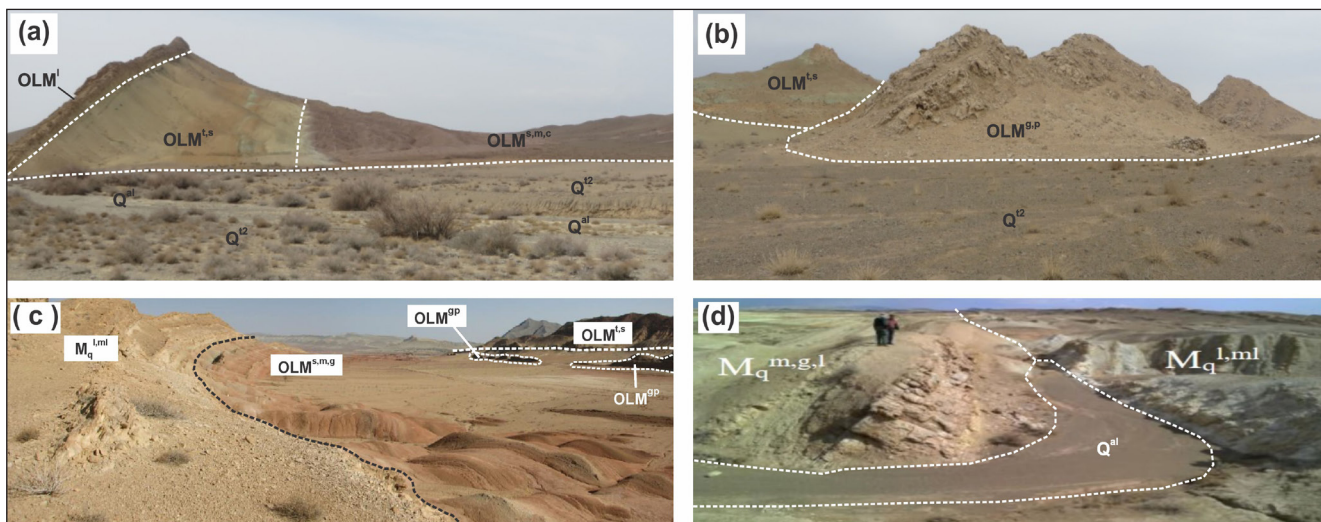
– **واحد M_q^{lml} :** این واحد شامل تناوبی از سنگ‌آهک، سنگ‌آهک ماسه‌ای، سنگ‌آهک مارنی و مارن به رنگ‌های متناوب کرم و خاکستری است. از دیدگاه لایه‌بندی ممکن است لایه‌ها، نازک، متوسط و حتی ستبر باشند. همبری زیرین آن با سازند قرمز زیرین تدریجی و پیوسته است. به سمت بالا بر روی این واحد، با همبری تدریجی و پیوسته واحد سنگ-چینه‌ای $M_q^{m,g,l}$ قرار گرفته است (شکل ۵-۴).

ناودیس رخمنون دارد. از نظر چینه‌شناختی شامل توف، توفیت، توف ماسه‌ای، توف سیلیسی نازک تا متوسط لایه و مادستون‌های توفی به رنگ‌های سبز، خاکستری، نخودی، قهوه‌ای و قرمز به همراه ماسه‌سنگ‌های توفی است. میان‌لایه‌هایی از رادیولاریت قرمز رنگ و ژاسپر نیز به صورت محلی در داخل آن دیده می‌شود. ستبرای واقعی این واحد حدود ۷۰۰ متر برآورد می‌شود (شکل ۵-۲ و ۵-۳).

– **واحد OLM^I :** این واحد نیز در یال شمالی ناودیس و گاه در داخل واحد $OLM^{s,m,g}$ و با شیب به سمت جنوب دیده می‌شود. واحد یاد شده شامل سنگ‌آهک‌های ماسه‌ای و گاهی دولومیتی است، که به صورت جانبی با بخش‌های توف ماسه‌ای نیز جایگزین می‌شود. در بخش زیرین این واحد رخساره مادستون توفی و روی آن سنگ‌های توفی سبز روشن از واحد $OLM^{s,m,g}$ گسترش دارند (شکل ۵-۲).

– **واحد $OLM^{s,m,c}$:** این واحد نیز با روند تقریبی خاوری-باختری در قسمت جنوبی محدوده گرماب و در یال شمالی یک ناودیس رخمنون دارد. واحد مذکور تناوبی از ماسه‌سنگ، مارن و کنگلومرا به رنگ‌های قرمز، خاکستری و کرم، به همراه میان‌لایه‌هایی از سنگ‌آهک رسی در بخش بالایی است (شکل ۵-۲). گاهی همراه با بخش‌های مارنی، لایه‌های نازک ژپس نیز وجود دارد. این واحد در بخش زیرین به صورت تدریجی و گاهی به صورت جانبی بر روی واحد $OLM^{s,m,g}$ قرار می‌گیرد و به سمت بالا نیز به صورت تدریجی به واحد آهکی، آهک مارنی و مارنی میوسن تبدیل می‌شود. ستبرای بیشینه این واحد به حدود ۳۵۰ متر می‌رسد.

– **واحد $OLM^{m,g}$:** این واحد با روند به تقریب خاوری-باختری در قسمت جنوبی محدوده گرماب و در یال شمالی یک ناودیس رخمنون دارد و با در برداشتن افق‌های



شکل ۵-۲) تناوبی از ماسه‌سنگ، مارن و کنگلومرا با میان‌لایه‌هایی از سنگ‌آهک رسی واحد $OLM^{s,m,c}$ ، سنگ‌های توفی، توف ماسه‌ای، توف سیلیسی نازک تا متوسط لایه و مادستون‌های توفی واحد $OLM^{s,m,g}$ و سنگ‌آهک ماسه‌ای واحد OLM^I (نگاه به جنوب‌خاوری). (b) لایه‌های ستبر و توده‌ای سنگ گچ واحد OLM^{SP} در همبری با واحد توفی، توف ماسه‌ای و مادستونی $OLM^{s,m,c}$ (نگاه به شمال باختر). (c) تناوبی از ماسه‌سنگ، مارن و کنگلومرا با میان‌لایه‌ها و عدسی‌های گچ واحد $OLM^{s,m,g}$ در همبری عادی با تناوب سنگ‌آهک، سنگ‌آهک مارنی و مارن واحد M_q^{lml} (نگاه به خاوری). (d) مارن‌های سبز به همراه افق‌هایی از سنگ گچ، سنگ‌آهک مارنی و مادستون واحد $M_q^{m,g,l}$ و تناوب سنگ‌آهک، سنگ‌آهک مارنی و مارن واحد M_q^{lml} (نگاه به جنوب خاوری، تصویر d از بهار فیروزی و همکاران (۱۳۹۶) اقتباس شده است).

Figure 5- a) Alternation of sandstone, marl and conglomerate with interlayers of argillaceous limestone ($OLM^{s,m,g}$), thin-medium layers of tuff, sandy tuff, silicified tuff and tuffaceous mudstones ($OLM^{s,m,c}$), and sandy limestone units (OLM^I) (view to SE). b) Thick and massive bedded gypsum (OLM^{SP}) in contact with tuff, sandy tuff and mudstone unit ($OLM^{s,m,c}$) (view to NW). c) Alternation of sandstone, marl and conglomerate with gypsum interlayers and lenses ($OLM^{s,m,g}$) in normal contact with alternation of limestone, marly limestone and marl (M_q^{lml}) (view to E). d) Green marl with gypsum horizons, marly limestone and mudstone unit ($M_q^{m,g,l}$) and limestone, marl limestone and marl sequences (M_q^{lml}) (view to SE, image d after Bahar-Firouzi et al. (2017)).

اوسن و همچنین واحدهای شیل و ماسه‌سنگی پالئوزوییک برنزد یافته‌اند و دارای اثر حرارتی بر روی این واحدها می‌باشند و به نظر می‌رسد حتی در بالا آمدن واحدهای سنگی پالئوزوییک نیز نقش داشته‌اند (بهار فیروزی و همکاران، ۱۳۹۶).

۳-۲- سنگ‌نگاری سنگ‌های محدوده گرماب

بر پایه مشاهدات صحرایی و مطالعات چینه‌شناسی، زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری، واحدهای سنگی محدوده گرماب از قدیم به جدید شامل واحدهای آتشفشانی-رسوبی اوسن و واحدهای رسوبی-تبخیری الیگوسن و میوسن است. در ادامه، ویژگی‌های کانی‌شناسی، بافتی و سنگ‌نگاری پاره‌ای از واحدهای سنگی این محدوده توصیف می‌شود.

۳-۲-۱- سنگ‌نگاری سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری اوسن

واحدهای آتشفشانی-رسوبی اوسن شامل واحدهای گدازه‌ای، آذرآواری، رسوبی و تبخیری می‌باشد. سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی اوسن، به طور محلی به وسیله توده‌های نیمه‌نفوذی فلسیک تا مافیک (بیشتر حدواسط) و دایک‌های دیابازی قطع می‌شوند.

۳-۲-۱-۱- واحد گدازه‌ای: واحد گدازه‌ای شامل سنگ‌های آندزیت پورفیری و آندزیت-بازالتی است که با تناوبی از لیتیک توف، شیل توفی، سیلتستون توفی و ماسه‌سنگ توفی همراه هستند. در نمونه دستی دارای رنگ خاکستری روشن مایل به کرم است. پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی در ترکیب سنگ‌های آندزیت پورفیری است که با مقادیر اندکی هورنبلند سبز یا قهوه‌ای، پیروکسن، زیرکن و مگنتیت همراهی می‌شود. پلاژیوکلازها در مواردی سرسیتی شده‌اند. بافت این سنگ‌ها، پورفیری با زمینه میکروولیتی است (شکل ۶-۱-۱). گدازه‌های آندزیت بازالتی نیز در همراهی چینه‌شناختی با مجموعه سنگ‌های آذرآواری و رسوبی اوسن می‌باشند. در نمونه دستی به رنگ خاکستری تیره متمایل به سیاه دیده می‌شود (شکل ۶-۱-۲). کانی‌های اولیه آن‌ها پلاژیوکلاز، آمفیبول، پیروکسن و مگنتیت است. کانی‌های ثانویه شامل کلسیت، کلریت، اپیدوت، سریسیت، کلسیت و روتیل است (شکل ۶-۱-۳).

۳-۱-۱- واحد $M_4^{m,pl}$: این واحد شامل مجموعه مارنی سبز رنگ با میان لایه‌هایی از مارن‌های قرمز و به همراه افق‌هایی از سنگ گچ، سنگ آهک مارنی و رسی، سنگ آهک و مادستون است (شکل ۵-۱-۱). همبری زیرین این واحد با واحد M_4^{lm} پیوسته بوده و با ظهور افق گچ و مارن کرم رنگ با ستبرای حدود ۲ متر قابل تشخیص است. در بخش‌های بالایی این واحد، مارن‌هایی به رنگ قرمز نیز ظاهر می‌شوند. در مرز تبدیل این واحد به واحد رویی (سازند قرمز بالایی) افق‌های کربناتی به صورت سنگ آهک‌های رسی کرم متمایل به سبز و سرشار از فسیل دیده می‌شود (بهارفیروزی و همکاران، ۱۳۹۶).

۳-۱-۵- واحدهای رسوبی کواترنری

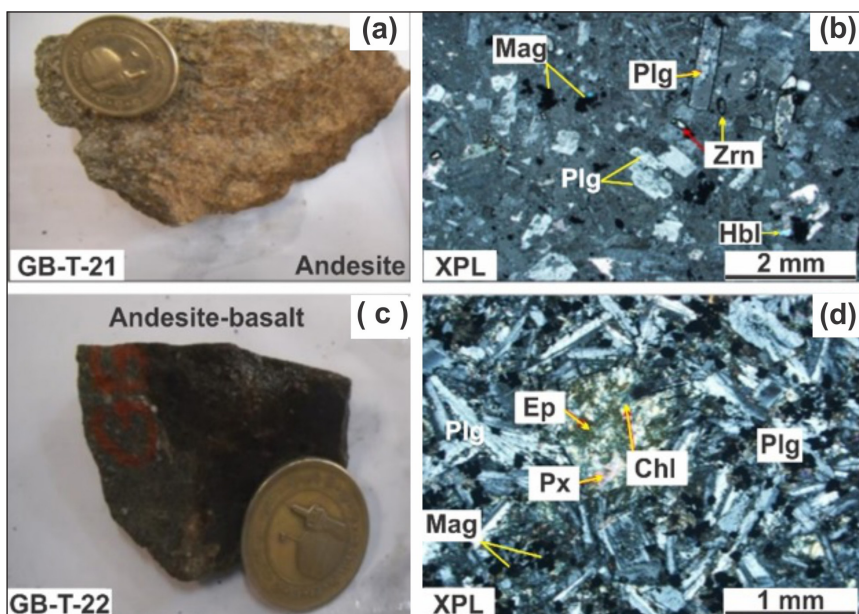
شرایط ریخت‌شناسی حاکم بر منطقه که شیب عمومی از شمال به جنوب ایجاد نموده است، موجب شده است که محیط‌های رسوبی قاره‌ای شامل واریزه‌های پای‌کوهی به صورت رسوبات کوه‌زفتی و گراولی با گردشگی و گرویت کم (Q^{H1})، رسوبات مخروطه افکنه‌ای به صورت رسوبات کانالی رودخانه‌ای و واریزه‌های با منشأ جریان‌های خرده سنگی (Q^{H2}) و رسوبات رودخانه‌ای و آبراه‌های (Q^{H3}) به صورتی نسبتاً منظم از شمال به جنوب در منطقه گسترش یابند. ادامه ریخت‌شناسی منطقه به سمت جنوب در خارج از محدوده به پهنه‌های بیابانی می‌رسد.

۳-۱-۶- توده‌های نفوذی محدوده گرماب

در بخش شمال‌باختری منطقه گرماب رخنمونی از سنگ‌های نفوذی نیمه‌ژرف با ترکیب فلسیک و حدواسط مشاهده می‌شود که دارای ترکیب داسیت (da) و میکرودیوریت (md) هستند (شکل ۲). توده‌های نفوذی از نظر ریخت‌شناسی بخش‌های مرتفع منطقه را می‌سازند. توده‌های داسیتی و میکرودیوریتی همزمان جای گرفته‌اند و آپوفیزهایی از آن‌ها همدیگر را قطع می‌نمایند. این توده‌ها با رنگ خاکستری و کرم (داسیت) و خاکستری تیره تا سیاه (میکرودیوریت) دارای بافت پورفیری تا میکروپورفیری با سیمای نیمه‌ژرف هستند. توده‌های آذرین با روند عمومی شمال‌خاوری-جنوب‌باختری در داخل واحدهای شیل، ماسه‌سنگ و آذرآواری‌های

شکل ۶-۱-۱) تصویر نمونه دستی گدازه آندزیت پورفیری. (b) تصویر میکروسکوپی گدازه آندزیت پورفیری که پلاژیوکلاز ترکیب اصلی سنگ را تشکیل می‌دهد و بافت آن پورفیری با زمینه میکروولیتی است. (c) تصویر نمونه دستی از گدازه آندزیت بازالتی. (d) تصویر میکروسکوپی گدازه آندزیت بازالتی که دارای پلاژیوکلاز، هورنبلند، پیروکسن و مگنتیت است.

Figure 6- a) Hand sample photo of porphyritic andesite. b) Photomicrograph of porphyry andesite lava which mainly composed of plagioclase and have porphyritic texture. c) Hand sample photo of basaltic andesite lava. d) Photomicrograph of basaltic andesite lava which composed of plagioclase, hornblende, pyroxene, and magnetite. Chl: Chlorite; Ep: Epidote; Hbl: Hornblende; Mag: Magnetite; Plg: Plagioclase; Px: Pyroxene; Zrn: Zircon. (Abbreviations for names of minerals from Whitney and Evans (2010)).

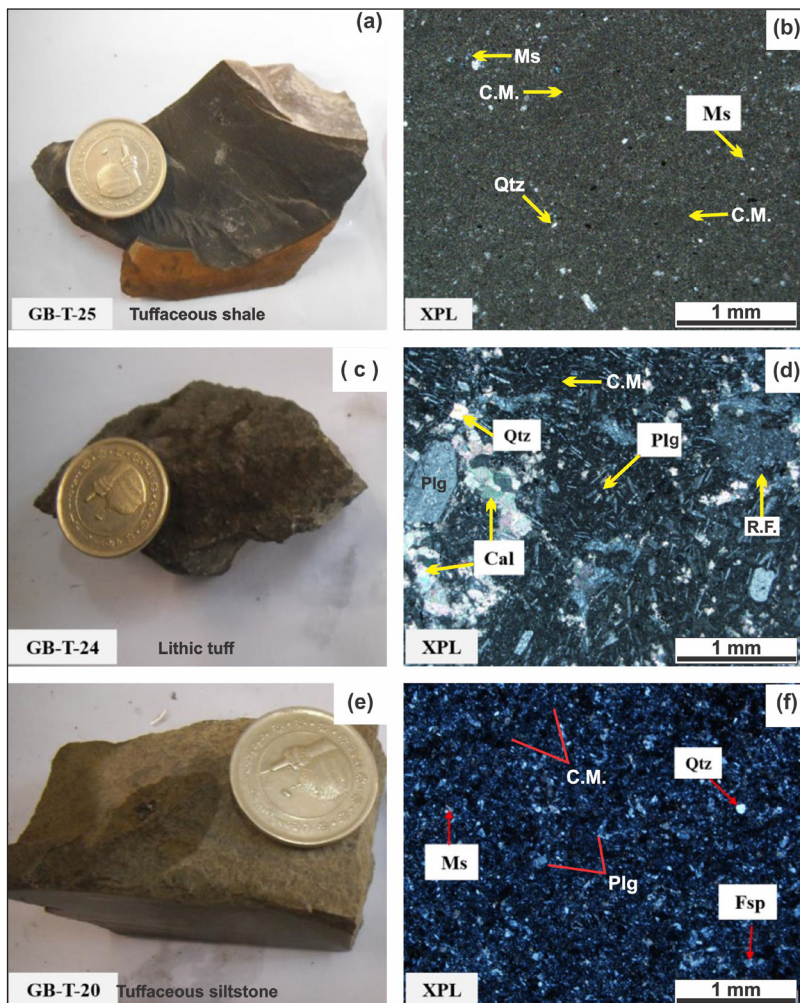


این واحد سنگی، در نمونه‌ی دستی به رنگ خاکستری است. قطعات سنگی سازنده آن‌ها دارای ترکیب آندزیت بازالتی است که در زمینه‌ای دانه‌ریز از پلاژیوکلاز، کانی‌های رسی، کلریت، کلسیت و کوارتز قرار گرفته‌اند (شکل ۷- c و d). واحد سیلتستون توفی به صورت لایه سبز رنگ و مشخص، با ستبرای کمتر از ۱۰۰ متر در مجموعه آتشفشانی- رسوبی انوسن در شمال‌باختر محدوده گرماب مشاهده می‌شود. از نظر کانی‌شناسی، از پلاژیوکلاز، کانی‌های رسی و مسکوویت ترکیب یافته است (شکل ۷- e و f).

واحد آذرآواری: در مجموعه آتشفشانی- رسوبی انوسن، همراه با گدازه‌های آندزیت پورفیری و آندزیت بازالتی، سنگ‌های آذرآواری مانند توف، توف خردسنگی (لیتیک توف) و سیلتستون توفی مشاهده می‌شود. توف‌ها به صورت مجموعه‌ای از توف ماسه‌ای، شیل توفی، توف شیلی کربناتی و توفیت به رنگ سبز روشن و با لایه‌بندی نازک تا لامینه‌ای در شمال‌باختر محدوده گرماب رخنمون دارند. توف‌ها از کانی‌های رسی، مسکوویت و کوارتز تشکیل شده‌اند (شکل ۷- a و b). توف‌های خردسنگی در میان لایه‌های سبز رنگ سنگ‌های توفی مشاهده می‌شوند.

شکل ۷- a) تصویر نمونه دستی شیل توفی. b) تصویر میکروسکوپی نمونه شیل توفی که بیشتر از کانی‌های رسی و مسکوویت تشکیل شده است. c) تصویر نمونه دستی توف قطعه‌سنگی. d) تصویر میکروسکوپی نمونه توف قطعه‌سنگی که دارای قطعات سنگ‌های آتشفشانی، پلاژیوکلاز، کانی‌های رسی، کوارتز و کلسیت است. e) تصویر نمونه دستی سیلتستون توفی. f) تصویر میکروسکوپی نمونه سیلتستون توفی که از پلاژیوکلاز، کانی‌های رسی و مسکوویت ترکیب یافته است.

Figure 7- a) Hand sample of tuffaceous shale. b) Photomicrograph of tuffaceous shale which mostly composed of clay minerals and muscovite. c) Hand sample of lithic tuff. d) Photomicrograph of lithic tuff contain volcanic rock fragments, plagioclase, clay minerals, quartz, and calcite. e) Hand sample of tuffaceous siltstone. f) Photomicrograph of tuffaceous siltstone which composed of plagioclase, clay minerals, and muscovite. Cal: Calcite; Chl: Chlorite; C.M.: Clay minerals; Ms: Muscovite; Plg: Plagioclase; Qtz: Quartz; R.F.: Rock fragments. (Abbreviations for names of minerals from Whitney and Evans (2010)).



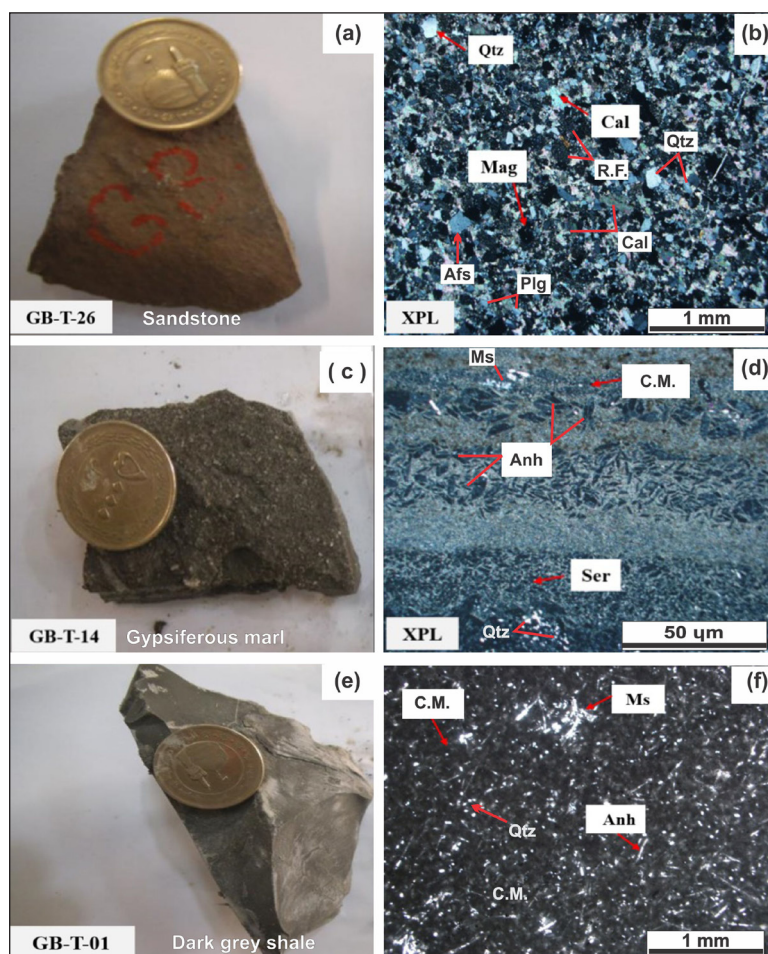
در لایه‌بندی، داخل حفرات و شکستگی‌های آن مشاهده می‌شود. کانی‌های سازنده مارن (مانند کانی‌های رسی، سریسیت، مسکوویت، کوارتز و فلدسپار) به صورت متناوب با بلورهای ریز و درشت ژپس قرار دارند (شکل ۸- c و d). واحد سیلتستونی دارای رنگ خاکستری مایل به قهوه‌ای است و بیشتر از کانی‌های رسی، مسکوویت، کلسیت و دولومیت به همراه مقدار اندکی انیدریت و ژپس ترکیب یافته است. واحد شیلی شامل شیل‌های کربناتی لامینه‌ای به رنگ‌های خاکستری و خاکستری تیره تا سیاه است (شکل ۸- e). واحد شیلی بیش‌ترین ارتباط را با سنگ سولفات سدیم (گلوپریت) دارد. در مطالعات میکروسکوپی، بیشتر از کانی‌های رسی، کوارتز، پلاژیوکلاز، مسکوویت، کلریت، انیدریت و کلسیت تشکیل شده است (شکل ۸- f). مطالعه کانی‌شناسی نمونه‌ای از واحد شیل با استفاده از روش پراش سنجی اشعه ایکس (XRD)، کانی‌های کوارتز، انیدریت، دولومیت، مسکوویت، ایلیت و مقدار کمی آلپیت و کلریت را نشان می‌دهد.

۳-۲-۲- سنگ‌نگاری سنگ‌های رسوبی انوسن

واحدهای سنگی رسوبی با روند تقریبی شمال‌خاوری- جنوب‌باختری و خاوری- باختری در بخش مرکزی محدوده گرماب رخنمون دارند. سنگ‌های رسوبی در این محدوده شامل مجموعه‌ای از ماسه‌سنگ، مارن، سیلتستون و شیل نازک تا متوسط لایه به رنگ‌های خاکستری، نخودی، کرم و سبز هستند که بخش مارنی- شیلی در آن چیره است. واحدهای رسوبی به شدت تکتونیک و خرد شده‌اند و زمین‌ریخت‌شناسی عمومی آن‌ها تپه‌ماهوری است. واحد ماسه‌سنگی دارای رنگ قهوه‌ای تا قرمز است. ترکیب آن‌ها از کوارتز، فلدسپار، قطعه‌سنگ و به مقدار کم کلریت و بیوتیت تشکیل شده است و از نوع ساب‌لیتارنایت می‌باشد (شکل ۸- a و b). رخساره رسوبی چیره واحد مارنی، شامل مارن‌های خاکستری، کرم، سبز و نخودی است که شیل، شیل‌های ژپس‌دار و ژپس نیز در مقادیر مختلف در افق‌های چینه‌ای آن دیده می‌شود. مارن در نمونه دستی به رنگ خاکستری است و بلورهای ژپس

شکل ۸- a) تصویر نمونه دستی از ماسه‌سنگ. b) تصویر میکروسکوپی از نمونه ماسه‌سنگ که بیشتر از کوارتز، فلدسپار، قطعات سنگی و کلسیت تشکیل شده است و از نوع ساب‌لیتارنایت است. c) تصویر نمونه دستی مارن. d) تصویر میکروسکوپی نمونه مارن که دارای کانی‌های رسی، مسکوویت، انیدریت، پلاژیوکلاز، کوارتز و کلسیت است. e) تصویر نمونه دستی شیل خاکستری تیره. f) تصویر میکروسکوپی نمونه شیل تیره رنگ که از کوارتز، انیدریت، دولومیت، مسکوویت، کانی‌های رسی، پلاژیوکلاز و کلریت ترکیب یافته است.

Figure 8. a) Hand sample photo of sandstone. b) Photomicrograph of sublitharenite sandstone which mostly composed of quartz, feldspar, rock fragments, and calcite. c) Hand sample photo of marl. d) Photomicrograph of marl contain clay minerals, muscovite, anhydrite, plagioclase, quartz, and calcite. e) Hand sample photo of dark gray shale. f) Photomicrograph of black shale which composed of quartz, anhydrite, dolomite, muscovite, clay minerals, plagioclase, and chlorite. Anh: Anhydrite; Cal: Calcite; Chl: Chlorite; C.M.: Clay minerals; Ms: Muscovite; Plg: Plagioclase; Qtz: Quartz; R.F.: Rock fragments. (Abbreviations for names of minerals from Whitney and Evans (2010)).



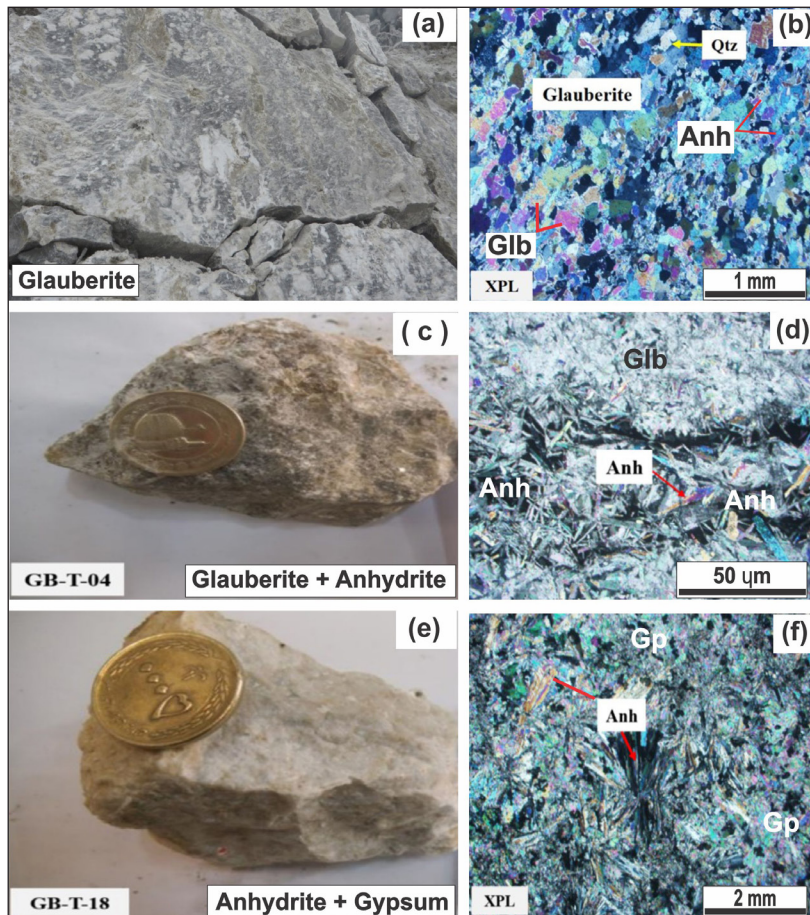
مواد معدنی سولفات سدیم مانند گلوبریت، تناردیت و میرابیلیت می‌انجامد. اگرچه گلوبریت متداول‌ترین کانی معدنی سولفات سدیم است اما چگونگی نه‌نشست و منشأ آن (اولیه و یا دیازنتیک) موضوعی بحث‌انگیز بوده است (Salvany et al., 2007). بر پایه مشاهدات میکروسکوپی، گلوبریت تنها کانی سولفات سدیم در معدن گرماب است که با انیدریت و مقدار کمی ژپس همراهی می‌شود. کوارتز و آلکالی فلدسپار نیز به مقدار خیلی اندک در سنگ سولفات سدیم وجود دارد. گلوبریت، بیشتر به صورت بلورهای همسان دانه، در حالی که انیدریت به صورت‌های شاخه‌ای، شعاعی و تیغه‌ای مشاهده می‌شود (شکل ۹-b و d). کانی‌شناسی چند نمونه سنگ سولفات سدیم گرماب با استفاده از پراش‌سنجی اشعه ایکس، کانی‌های اصلی، فرعی و خیلی اندک آن‌ها را به ترتیب گلوبریت، انیدریت و کوارتز نشان می‌دهد. در توالی واحدهای رسوبی - تبخیری محدوده گرماب، افق‌هایی از سنگ گچ نیز مشاهده می‌شود. انیدریت (CaSO_4) دارای رنگ کرم روشن تا سفید، وزن مخصوص ۲/۹۸، سختی ۳ تا ۳/۵، بی‌فررنزاس متوسط، برجستگی بالا و سیستم بلوری ارتورومبیک است، در حالی که ژپس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) معمولاً به رنگ‌های سفید، طوسی، کرم و بی‌رنگ، اشکال بلوری گوناگون، وزن مخصوص ۲/۳۲، سختی ۱/۵ تا ۲ و سیستم بلوری مونوکلینیک است (شکل ۹-e و f). کانی‌شناسی چند نمونه از افق‌های گچی با استفاده از پراش‌سنجی اشعه ایکس، کانی‌های اصلی و فرعی آن‌ها را به ترتیب انیدریت و ژپس نشان می‌دهد.

۳-۲-۳- پتروگرافی سنگ‌های تبخیری ائوسن

در محدوده گرماب مجموعه آتشفشانی - رسوبی، تناوبی از سنگ‌های گدازه‌ای، آذرآواری و رسوبی تخریبی دریایی، واحدهای سنگی چیره ائوسن هستند که به سمت بالای توالی (جنوب محدوده گرماب) به واحدهای رسوبی کم‌ژرفا و در نهایت به واحدهای رسوبی - تبخیری تبدیل می‌شوند. از ویژگی منحصر به فرد واحدهای رسوبی - تبخیری در محدوده گرماب، وجود سولفات سدیم به صورت افق سنگ چینه‌ای مشخص است. در توالی واحدهای رسوبی - تبخیری، افق‌های کاملاً هم‌شیب با لایه‌بندی، از مواد معدنی سولفات سدیم و سولفات کلسیم به رنگ خاکستری روشن تا سفید وجود دارند که ستبرای آن‌ها در حد چند سانتی‌متر تا چند ده سانتی‌متر است. لایه‌های کمر بالا و کمر پایین افق‌های سولفات‌دار تناوبی از شیل و مارن‌های گچ‌دار است. در یک مورد ستبرای افق سولفات سدیم به چند متر نیز می‌رسد که به عنوان معدن سولفات سدیم در حال بهره برداری است. گلوبریت ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$) از کانی‌های مهم سولفات سدیم می‌باشد. این کانی دارای رنگ‌های خاکستری، زرد تا سفید و بی‌رنگ، وزن مخصوص ۲/۷۷، سختی ۲/۵ تا ۳، جلای شیشه‌ای، رنگ خاکه سفید و سیستم بلوری مونوکلینیک است (شکل ۹-a و c). گلوبریت کانی تبخیری متداول در محیط‌های دریاچه‌های نمک قدیمی و عهد حاضر است (e.g., Wei, 2001; Liu et al., 2007; Rahimpour-Bonab and Abdi, 2012; Yu et al., 2015). در حوضه‌های غیردریایی عهد حاضر، تبخیر مداوم آب دریاچه به رسوب

شکل ۹- a) تصویر نمونه دستی سنگ سولفات سدیم. b) تصویر میکروسکوپی نمونه سنگ سولفات سدیم که بخش عمده آن گلوبریت است که با مقادیر اندکی انیدریت، کوارتز و آلکالی فلدسپار همراهی می‌شوند. c) تصویر نمونه دستی سنگ سولفات سدیم و انیدریت. d) تصویر میکروسکوپی نمونه سنگ سولفات سدیم و انیدریت که از انیدریت، گلوبریت، ژپس و مقدار اندکی کوارتز ترکیب یافته است. e) تصویر نمونه دستی سنگ گچ. f) تصویر میکروسکوپی نمونه سنگ گچ که از انیدریت و ژپس تشکیل شده است.

Figure 9- a) Hand sample photo of sodium sulfate ore. b) Photomicrograph of sodium sulfate ore which mostly composed of glauberite, and accompany with anhydrite and rarely quartz and alkali feldspar. c) Hand sample photo of sodium sulfate and anhydrite ore. d) Photomicrograph of sodium sulfate and anhydrite ore contain glauberite, anhydrite, gypsum, and rarely quartz. e) Hand sample photo of anhydrite and gypsum. f) Photomicrograph of anhydrite and gypsum. Alkali feldspar: Afs; Anh: Anhydrite; Glb: Glauberite; Gp: Gypsum; Qtz: Quartz. (Abbreviations for names of minerals from Whitney and Evans (2010)).



۴- بحث

۴-۱-۴ ژئوشیمی

ژئوشیمیایی عناصر اصلی و کمیاب در نمونه‌های شیل، مقدار غلظت عناصر در این نمونه‌ها به مقدار آن‌ها از ترکیب شیل آمریکای شمالی (NASC: Gromet et al., 1984) استاندارد شده است.

بر پایه داده‌های ژئوشیمیایی جدول ۱ مقدار درصد وزنی اکسیدهای عناصر اصلی در واحد شیل (نمونه GB-G-1) شامل، SiO_2 : 41.26, CaO : 9.24, Al_2O_3 : 9.64, MgO : 6.99 و Fe_2O_3 : 4.28 می‌باشد. مقدار بیشینه غلظت به SiO_2 و کمینه آن به P_2O_5 مربوط می‌شود. در نمونه شیل دارای کانی‌های تبخیری (GB-G-4) مقدار درصد وزنی اکسیدهای عناصر اصلی شامل، SiO_2 : 13.01, CaO : 28.86, Al_2O_3 : 2.51, MgO : 4.24 و SO_3 : 41.21, Fe_2O_3 : 1.14 می‌باشد. بیشینه غلظت مربوط به عناصر SO_3 و CaO و کمینه آن به MnO مربوط است. در نمودار مقادیر غلظت اکسید عناصر اصلی در نمونه‌های شیل کربناتی و شیل دارای کانی‌های تبخیری که به ترکیب شیل آمریکای شمالی بهنجار شده است، در نمونه شیل کربناتی (GB-G-1) مقادیر اکسیدهای عناصر CaO , MgO و Na_2O نسبت به NASC غنی‌شدگی دارند، مقدار P_2O_5 تا حدودی مشابه نمونه مرجع است، در حالی که مقادیر سایر اکسیدهای عناصر اصلی کمتر از ترکیب شیل آمریکای شمالی است (شکل ۱۰- a). در نمونه شیل دارای کانی‌های تبخیری (GB-G-4) مقادیر CaO و MgO نسبت به NASC غنی‌شدگی دارند در حالی که مقادیر سایر اکسیدها کمتر از ترکیب شیل آمریکای شمالی است (شکل ۱۰- a). غنی‌شدگی عناصر منیزیم، کلسیم و سدیم در نمونه‌های شیل میزبان به دلیل وجود کانی‌های دولومیت، کلسیت، انیدریت، گلوبریت و ژپس در ترکیب آن‌ها است. نتایج مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی به روش پراش

به منظور مطالعه ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ میزبان کانسار و سنگ سولفات سدیم گرماب، تعداد ۴ نمونه سنگ ژئوشیمیایی برداشت شده است. این نمونه‌ها از واحد شیل کربناتی میزبان سولفات سدیم، شیل دارای کانی‌های تبخیری (گلوبریت، انیدریت، \pm ژپس)، سنگ سولفات سدیم (سنگ پرعیار سولفات سدیم) و سنگ انیدریت و سولفات سدیم (سنگ عیار متوسط سولفات سدیم) انتخاب شده‌اند. مقادیر غلظت اکسید عناصر اصلی و عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی در این نمونه‌ها در جدول ۱ داده شده است. رفتار ژئوشیمیایی عناصر در نمونه‌های شیل و سولفات سدیم به طور جداگانه بررسی می‌شود.

۴-۱-۱-۴ ژئوشیمی واحد شیل میزبان سولفات سدیم

در منطقه گرماب، این واحد شامل شیل کربناتی و شیل دارای انیدریت، گلوبریت و ژپس به رنگ خاکستری تیره تا سیاه است و بیشترین ارتباط را با ماده معدنی سولفات سدیم دارد. بر پایه مطالعات سنگ‌نگاری، نمونه شیل بیش‌تر از کانی‌های رسی، مسکوویت، آلپیت، کلسیت و دولومیت به همراه کانی‌های تبخیری از قبیل انیدریت، گلوبریت و ژپس تشکیل شده است (شکل ۸- e و f). بر اساس مطالعات کانی‌شناسی به روش XRD در نمونه انتخابی از واحد شیل، کانی‌های کوارتز، انیدریت، دولومیت، مسکوویت، ایلیت و مقدار کمی کانی‌های آلپیت و کلریت گزارش شده است. نمونه‌های ژئوشیمیایی GB-G-1 و GB-G-4 به ترتیب از شیل کربناتی و شیل دارای کانی‌های تبخیری برداشت شده است. برای مطالعه رفتار

دریاچه‌ای و کولابی) است. در چنین محیط‌های رسوبی ورود رودخانه‌ها و مواد آواری از خشکی‌ها کمتر و میزان تبخیر زیاد می‌باشد (e.g., Sonnenfeld, 2000; Warren, 2010, 2016).

اشعه ایکس نمونه‌های شیل، این گفته را اثبات می‌نماید. مقدار بالای MgO ، CaO و Na_2O در سنگ‌های شیل میزان سنگ سولفات سدیم گرماب نشان از ته‌نشست آن‌ها در یک حوضه تبخیری بسته (مانند حوضه‌های کافتی کم‌ررفای درون قاره‌ای،

جدول ۱- مقادیر غلظت سنگ کل اکسید عناصر اصلی (درصد وزنی)، عناصر فرعی، کمیاب و کمیاب خاکی (گرم در تن) در نمونه‌های شیل و سولفات سدیم گرماب.

Table 1. Concentration of whole-rock major oxides (wt. %), minor, trace and rare earth elements (ppm) in shale and sodium sulfate samples.

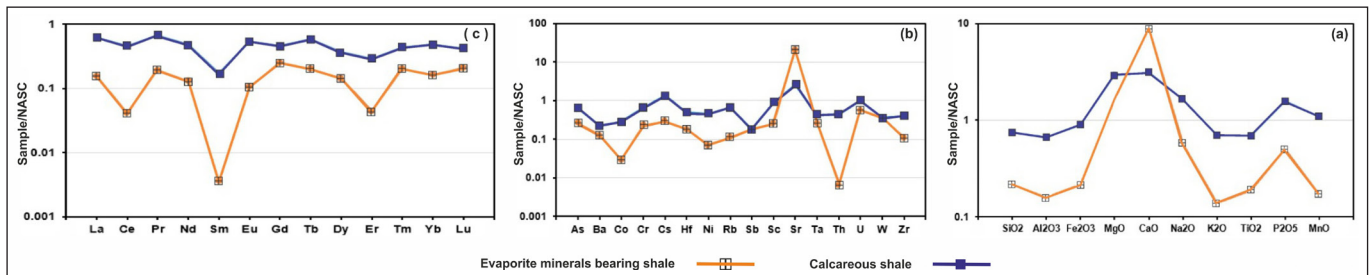
Sample	Rock type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	SO ₃	L.O.I.
GB-G-1	Calcareous shale	41.26	9.64	4.28	6.99	9.24	1.58	2.35	0.47	0.20	0.23	8.71	15.04
GB-G-2	Anhydrite with minor glauberite	1.16	0.23	0.12	0.31	39.65	0.58	0.06	0.03	0.04	0.04	56.61	0.56
GB-G-3	Glauberite with minor anhydrite	0.94	0.17	0.08	0.05	20.55	20.14	0.05	0.04	0.03	0.03	55.90	1.72
GB-G-4	Gypsiferous shale	13.01	2.51	1.14	4.24	28.86	0.60	0.51	0.14	0.07	0.05	41.21	7.41
Sample	Rock type	Ag	As	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Hf	Li
GB-G-1	Calcareous shale	0.4	18.1	137	1.30	0.20	0.4	7.30	82	7.00	24	3.08	118
GB-G-2	Anhydrite with minor glauberite	0.3	8.3	41	0.15	0.08	0.2	0.75	18	0.38	8	0.73	12
GB-G-3	Glauberite with minor anhydrite	0.3	3.1	14	0.15	0.08	0.2	0.75	37	0.38	6	0.59	1
GB-G-4	Gypsiferous shale	0.2	7.5	80	0.30	0.08	0.3	0.75	29	1.50	13	1.15	48
Sample	Rock type	Mo	Nb	Ni	Pb	Rb	S	Sb	Sc	Se	Sn	Sr	Ta
GB-G-1	Calcareous shale	1	6.1	27	17	83	34840	0.40	13.7	0.38	1.4	369	0.47
GB-G-2	Anhydrite with minor glauberite	1	1.1	1	5	1	226440	0.38	0.9	0.38	0.4	6529	0.15
GB-G-3	Glauberite with minor anhydrite	1	0.7	1	1	1	223600	0.38	0.9	0.38	0.2	4026	0.13
GB-G-4	Gypsiferous shale	14	2.4	4	5	14	164840	0.40	3.8	0.38	0.7	2953	0.29
Sample	Rock type	Te	Th	Tl	U	V	W	Y	Zn	Zr	La	Ce	Pr
GB-G-1	Calcareous shale	0.08	5.37	0.47	2.6	127	0.75	14.5	76	80	20	34	5.33
GB-G-2	Anhydrite with minor glauberite	0.08	0.08	0.08	0.2	6	0.70	2.7	1	4	1	1	0.69
GB-G-3	Glauberite with minor anhydrite	0.08	0.08	0.08	0.2	3	0.70	2.5	1	4	1	1	0.63
GB-G-4	Gypsiferous shale	0.08	0.08	0.21	1.5	38	0.75	5.9	38	22	5	3	1.53
Sample	Rock type	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Er	Tm	Yb	Lu	-	-
GB-G-1	Calcareous shale	16.1	0.99	0.68	2.37	0.50	2.13	1.00	0.22	1.50	0.20		
GB-G-2	Anhydrite with minor glauberite	0.9	0.02	0.10	1.06	0.10	0.36	0.05	0.10	0.10	0.10		
GB-G-3	Glauberite with minor anhydrite	0.8	0.02	0.10	1.06	0.10	0.30	0.05	0.10	0.05	0.10		
GB-G-4	Gypsiferous shale	4.3	0.02	0.13	1.32	0.17	0.83	0.15	0.10	0.50	0.10		

مانند انیدریت، سولفات سدیم و ژیس هستند، از این رو، غنی‌شدگی استرانسیم در ترکیب شیمیایی آن‌ها توجیه‌پذیر است. از رفتار ژئوشیمیایی عناصر کمیاب برای مطالعه شرایط اکسیداسیون-احیا محیط رسوب‌گذاری نیز استفاده می‌شود. برای مثال نسبت Th/U ، پارامتری است که بیشترین اطلاعات را درباره شرایط رسوب‌گذاری به دست می‌دهد. اورانیم دو وضعیت رایج اکسیداسیون دارد (U^{+4} و U^{+6})، اما توریم تنها یک حالت رایج (Th^{+4}) دارد، به علت ویژگی‌های شیمیایی مشابهی مانند بار یونی و عدد هم‌آرایی یون‌های U^{+4} و Th^{+6} رفتارهای ژئوشیمیایی مشابهی دارند و سبب جایگزینی توریم به جای اورانیم تحت شرایط اکسیدان می‌شود (Blackburn et al., 1994). توریم معمولاً در رسوبات رسی تحت شرایط اکسیدان متمرکز می‌یابد، بنابراین مقدار نسبت Th/U کمتر از ۲ به عنوان یک شاخص شرایط غیراکسیدان استفاده می‌شود (Wignall and Twitchett, 1996). مقدار Th/U در نمونه‌های شیل، و نمونه‌های شیل دارای کانی‌های تبخیری در منطقه گرماب به ترتیب ۲/۰۷ و ۰/۰۵

در نمودار مقادیر غلظت عناصر کمیاب نمونه‌های شیل منطقه گرماب که به ترکیب شیل آمریکای شمالی (Gromet et al., 1984) بهنجار شده است، تنها مقدار استرانسیم در نمونه‌های مورد مطالعه بیشتر از ترکیب شیل آمریکای شمالی است و مقدار غلظت سایر عناصر کمتر از ترکیب شیل مرجع است (شکل ۱۰-b). استرانسیم از عناصر قلیایی خاکی است و دارای بیشترین مشابهت شیمیایی با کلسیم، منیزیم و باریوم می‌باشد. در سنگ‌های آذرین این عنصر جایگزین کلسیم در پلاژیوکلازها می‌شود. در سنگ‌های رسوبی (به ویژه سنگ‌های کربناتی) و نیز در سیمان کربناته سنگ‌های رسوبی، استرانسیم جانشین کلسیم در کلسیت، آراگونیت و دولومیت می‌شود. سنگ‌های تبخیری نیز دارای مقادیر قابل توجهی استرانسیم هستند که به صورت همیافتی ژئوشیمیایی با کلسیم در ترکیب کانی‌های انیدریت و ژیس و نیز به صورت سلسیت و استرونسیانیت مشاهده می‌شود (Brand et al., 1998). با توجه به این که شیل‌های منطقه گرماب دارای سیمان کربناته بوده و دارای کانی‌های تبخیری

را تشکیل می‌دهند و رس‌ها در فرایند جذب و رسوب برخی از عناصر فرعی و کمیاب از آب دریا نقش اساسی دارند که این به نوبه خود سبب تهی‌شدگی برخی از عناصر در آب دریاها و غنی‌سازی آن‌ها در رسوبات سیلتی و رسی می‌شود. مقدار غلظت سریم و ساماریم در نمونه‌ی شیل گرماب به ترتیب ۳۴ و ۰/۹۹ گرم در تن، و مقدار آن‌ها در نمونه‌ی شیل دارای کانی‌های تبخیری گرماب به ترتیب ۳ و ۰/۰۲ گرم در تن است. بنابراین وقتی که مقادیر این دو عنصر به ترکیب شیل آمریکای شمالی بهنجار شوند بی‌هنجاری منفی شاخصی در موقعیت عناصر سریم و ساماریم در نمودار استاندارد شده، مشاهده می‌شود (شکل ۱۰-c). برای اینکه شیل آمریکای شمالی در یک محیط دریایی نهشته شده است، در حالی که شیل دارای کانی‌های تبخیری منطقه گرماب در یک حوضه تبخیری بسته و کم‌ژرفا تشکیل شده است. بی‌هنجاری سریم گاهی به عنوان شاخص شرایط نهشته‌گذاری استفاده می‌شود. در کل δCe کمتر از یک، نشان‌دهنده شرایط غیراکسیدان و δCe بیشتر از یک، نشان‌دهنده شرایط اکسیدان است (Mao et al., 2014). بی‌هنجاری منفی سریم در نمونه‌های شیل منطقه مورد مطالعه شرایط نهشته‌گذاری غیراکسیدان را نشان می‌دهد.

است و بیانگر شرایط غیراکسیدان محیط نه‌نشست آن‌ها می‌باشد. بررسی نمودار بهنجار شده الگوی عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های شیل گرماب نسبت به NASC نشان می‌دهد که تفکیکی بین LREE و HREE در این نمودارها وجود ندارد (شکل ۱۰-c). از طرفی در نمونه‌های شیل گرماب بی‌هنجاری منفی سریم و ساماریم مشاهده می‌شود. مقدار غلظت سریم و ساماریم در آب دریا به ترتیب ۱ و ۰/۰۵ گرم در تن است (Brewer, 1975)، در حالی که متوسط فراوانی آن‌ها در ترکیب شیل آمریکای شمالی به ترتیب ۷۳ و ۵/۷ گرم در تن است (Gromet et al., 1984). این داده‌ها نشان می‌دهند که عناصر سریم و ساماریم در آب دریا دارای کمترین فراوانی هستند و این مسئله رسوب سریم و ساماریم (به ویژه سریم) را از آب دریا نشان می‌دهد. بنابراین مواد رسوبی مانند باریت، کانی‌های منگنندار، کانی‌های تبخیری و غیره که از منشا آب دریا هستند دارای بی‌هنجاری منفی سریم و ساماریم خواهند بود (Henderson, 1984). شیل در گروه سنگ‌های رسوبی تخریبی قرار دارد و عناصری که ترکیب شیل را تشکیل می‌دهند بیشتر منشا آواری داشته و از هوازدگی و فرسایش سنگ‌های پوسته قاره‌ای ناشی می‌شوند. افزون بر این، کانی‌های رسی بخش شایان توجهی از ترکیب شیل



شکل ۱۰- مقادیر عناصر در شیل و شیل دارای کانی‌های تبخیری گرماب که به ترکیب NASC (Gromet et al., 1984) بهنجار شده است. (a) اکسید عناصر اصلی، (b) عناصر فرعی و کمیاب، و (c) عناصر کمیاب خاکی.

Figure 10. Element concentrations in shale and evaporite-bearing shale from the Garmab normalized to the NASC (Gromet et al., 1984). a) major oxides, b) minor and trace elements, and c) rare earth elements.

سنگ‌های آذرین مافیک منشا می‌گیرند، دارای مقدار Cr/Ni بیشتر از ۳ می‌باشند (Garver et al., 1996)، که این نسبت برای نمونه‌های شیل منطقه گرماب در حدود ۳ است و تفسیر منشا آن‌ها از سنگ‌های حدواسط را قوت می‌بخشد (جدول ۲).

۴-۱-۳- ژئوشیمی سنگ سولفات سدیم

به منظور مطالعه ویژگی‌های ژئوشیمیایی سنگ سولفات سدیم، تعداد ۲ نمونه سنگ ژئوشیمیایی برداشت شده است. این نمونه‌ها از سنگ سولفات سدیم (سنگ پرعیار سولفات سدیم) و سنگ سولفات سدیم، انیدریت و ژپس (سنگ عیار متوسط سولفات سدیم) انتخاب شده‌اند. مقادیر غلظت عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی در این نمونه‌ها (GB-G-2 و GB-G-3) در جدول ۱ داده شده است. به گونه‌ای که CaO ، SO_3 و Na_2O به ترتیب با مقادیر ۵۵/۹۰، ۲۰/۱۴ و ۲۰/۱۴ درصد بیشترین فراوانی را در ترکیب سنگ پرعیار سولفات سدیم گرماب دارند، در حالی که مقادیر هر یک از اکسیدهای دیگر کمتر از ۱ درصد است و کمینه غلظت با مقدار ۰/۰۳ درصد به عناصر MnO ، P_2O_5 و TiO_2 اختصاص دارد. در مطالعه سنگ پرعیار سولفات سدیم به روش پراش اشعه ایکس، گلوپریت به عنوان کانی سازنده اصلی مشخص شده است که به وسیله انیدریت همراهی می‌شود که در انطباق کامل با نتایج

۴-۱-۲- سنگ‌های والد شیل‌های منطقه گرماب

به دلیل حلالیت پایین Al و Ti در طول فرایندهای هوازدگی و حمل، نسبت‌های Al_2O_3/TiO_2 برای بررسی ترکیب سنگ‌های منشا رسوبات و سنگ‌های رسوبی به کار برده می‌شود (Oni et al., 2014). نسبت Al_2O_3/TiO_2 برای رسوباتی که از سنگ‌های آذرین مافیک، حدواسط و فلسیک منشا می‌گیرند به ترتیب از ۳ تا ۸، ۸ تا ۲۱ و ۱۵ تا ۷۰ تغییر می‌کند (Girty et al., 1996; Hayashi et al., 1997). این نسبت برای سنگ‌های شیل و شیل دارای کانی‌های تبخیری (نمونه‌های GB-G-1 و GB-G-4) منطقه گرماب به ترتیب ۲۱ و ۱۸ محاسبه شده است و بیشتر سنگ‌های منشا حدواسط را برای این رسوبات نشان می‌دهد (جدول ۲). این تفسیر با وجود سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری با ترکیب چیره آندزیت تا آندزیت بازالتی در بخش‌های شمالی منطقه گرماب تایید می‌شود. نسبت‌های عناصر کمیاب مانند Th/Cr نیز در سنگ‌های منشا فلسیک و مافیک/اولترامافیک متفاوت هستند. مقدار Th/Cr در رسوباتی که از سنگ‌های منشا فلسیک و مافیک مشتق می‌شوند به ترتیب از ۰/۱۳ تا ۲/۷۰ و ۰/۱۸ تا ۰/۴۶ تغییر می‌کند (Armstrong-Altrin et al., 2016). این مقدار برای نمونه‌های شیل منطقه گرماب در دامنه ۰/۰۵ تا ۰/۰۷ در نوسان است که گویای منشاگیری آن‌ها از سنگ‌های آذرین حدواسط می‌باشد. رسوباتی که از

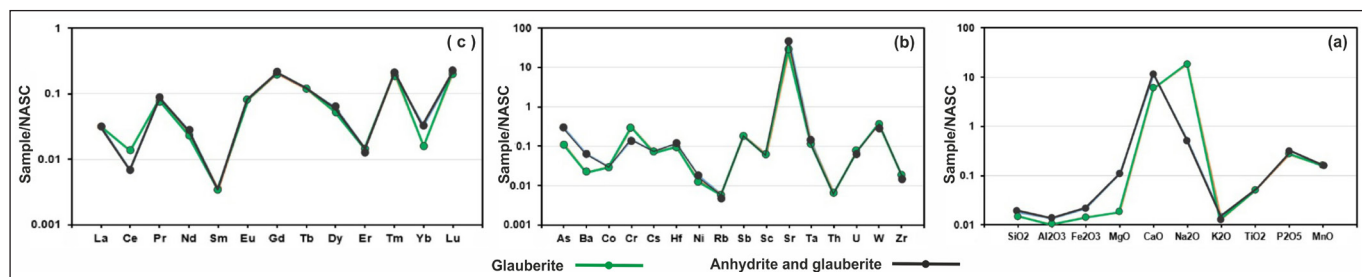
به‌نجار شده است، تنها مقدار استرانسیم در نمونه‌های مورد مطالعه بیشتر از ترکیب شیل آمریکای شمالی است و مقدار غلظت سایر عناصر از ترکیب شیل مرجع کمتر است (شکل ۱۱-ب). سنگ‌های تبخیری دارای مقادیر شایان توجهی استرانسیم هستند که به صورت همبستگی ژئوشیمیایی با کلسیم در ترکیب کانی‌های انیدریت و ژیس و نیز به صورت سلسیت و استرونسیانیت مشاهده می‌شود (Brand et al., 1998). با توجه به اینکه سنگ‌های تبخیری منطقه گرماب غنی از انیدریت، ژیس و سولفات سدیم هستند، از این رو، غنی‌شدگی استرانسیم در شیمی آن‌ها قابل توجیه است. در نمودار به‌نجار شده الگوی عناصر کمیاب خاکی نمونه‌های سولفات سدیم گرماب نسبت به NASC بی‌هنجاری منفی سریم و ساماریم نمایان است که دلیل این تپی‌شدگی در مطالعه ژئوشیمی واحد شیل توصیف شد. برای اینکه رفتار ژئوشیمیایی Er و Yb در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی با سایر عناصر کمیاب خاکی سنگین مشابه است، از این رو تپی‌شدگی در مقادیر عناصر Er و Yb به احتمال خیلی زیاد به دلیل خطای آنالیز است (شکل ۱۱-ج).

سنگ ژئوشیمیایی است. در نمونه عیار متوسط سولفات سدیم SO_3 ، CaO ، SiO_2 و Na_2O به ترتیب با مقادیر ۵۶/۶۱، ۳۹/۶۵، ۱/۱۶ و ۰/۵۸ درصد بیشترین فراوانی را در ترکیب این نمونه دارند، در حالی که مقادیر هر یک از اکسیدهای دیگر کمتر از ۰/۵ درصد است و کمینه غلظت با مقدار ۰/۰۴ درصد به عناصر MnO ، P_2O_5 و TiO_2 اختصاص دارد (جدول ۱). در مطالعه کانی‌شناسی این نمونه به روش پراش اشعه ایکس، انیدریت به عنوان کانی سازنده اصلی مشخص شده است که به وسیله گلوبریت همراهی می‌شود. مقادیر ناچیزی کوارتز نیز در این نمونه شناسایی شده است. همان گونه که از داده‌ها مشخص است، نتایج مطالعات کانی‌شناسی در انطباق با نتایج سنگ ژئوشیمیایی است. در نمودار اکسیدهای عناصر اصلی که به ترکیب شیل آمریکای شمالی (Gromet et al., 1984) به‌نجار شده است غنی‌شدگی در مقدار CaO و Na_2O در نمونه‌های سنگ سولفات سدیم گرماب به خوبی نمایان است (شکل ۱۱-ا). در نمودار مقادیر غلظت عناصر کمیاب نمونه‌های سنگ سولفات سدیم منطقه گرماب که به ترکیب شیل آمریکای شمالی (Gromet et al., 1984)

جدول ۲- نسبت‌های Th/Cr ، Al_2O_3/TiO_2 و Cr/Ni برای تعیین سنگ‌های والد واحد شیل میزبان سولفات سدیم در منطقه گرماب.

Table 2. Al_2O_3/TiO_2 , Th/Cr , and Cr/Ni ratios to determine the parent rocks of the sodium sulfate-hosting shale unit in Garmab area.

نسبت‌های عنصری	Al_2O_3/TiO_2	Th/Cr	Cr/Ni	Th/U
رسوبات با سنگ منشا آذرین فلسیک	to 70 15	to 2.70 0.13	3 >	-
رسوبات با سنگ منشا آذرین حدواسط	to 21 8	to 0.10 0.05	3 >	-
رسوبات با سنگ منشا آذرین مافیک	to 8 3	to 0.046 0.018	3 <	-
شیل کربناتی گرماب (GB-G-1)	21	0.07	3.04	2.07
شیل دارای کانی‌های تبخیری‌های گرماب (GB-G-4)	18	0.05	2.80	0.05
منابع	Girty et al., 1996; Hayashi et al., 1997	Armstrong-Altrin et al., 2016	Garver et al., 1996	-



شکل ۱۱- مقادیر عناصر در سولفات سدیم (گلوبریت)، انیدریت و گلوبریت گرماب که به ترکیب NASC (Gromet et al., 1984) به‌نجار شده است. (a) اکسید عناصر اصلی، (b) عناصر فرعی و کمیاب، و (c) عناصر کمیاب خاکی.

Figure 11. Element concentrations in sodium sulfate (Glauberite), anhydrite and Glauberite from the Garmab normalized to the NASC (Gromet et al., 1984). a) major oxides, b) minor and trace elements, and c) rare earth elements.

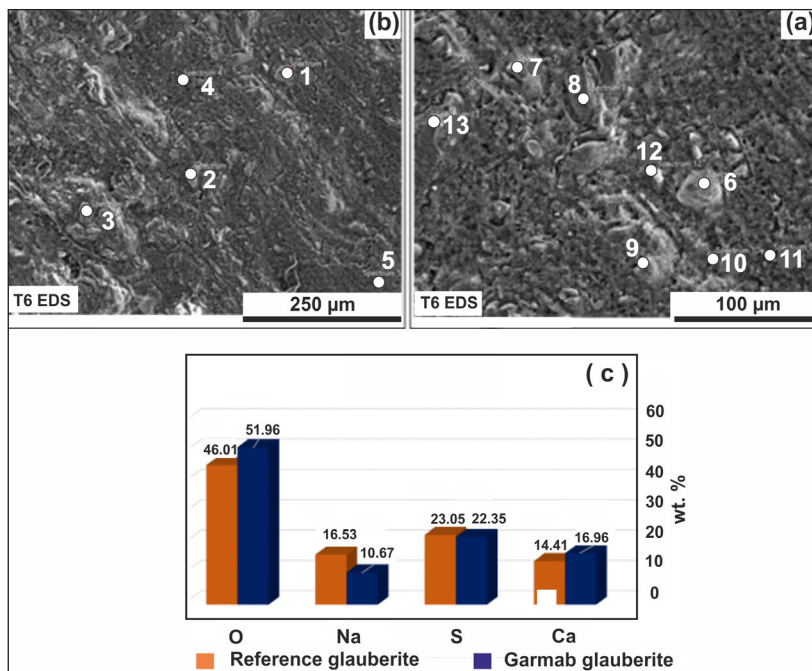
۲-۴- شیمی کانی

از سنگ‌های سولفات سدیم به شماره‌های T3 EDS و T6 EDS برای مطالعه شیمی کانی‌ها با استفاده از دستگاه ریزکاونده الکترونی نوع انتخابگر انرژی (EPMA-EDS) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود انتخاب شد.

مطالعه شیمی کانی‌های تبخیری منطقه گرماب یکی از ابزارهای مهم برای شناسایی نوع کانی‌ها است. مطالعات کانی‌شناسی در منطقه گرماب بر روی ۵۵ مقطع نازک و نازک- صیقلی انجام گرفته است که در این میان تعداد ۲ مقطع نازک- صیقلی

O در کانی هدف مطالعه به ترتیب ۱۰/۶۷، ۲۲/۳۵، ۱۶/۹۶ و ۵۱/۹۶ درصد است. اگر متوسط ترکیب شیمیایی کانی هدف با ترکیب شیمیایی گلوبریت مرجع مقایسه شود، بیشترین شباهت ژئوشیمیایی را با گلوبریت دارد (شکل ۱۲- c). بر اساس نتایج مطالعات کانی‌شناسی نوری و مطالعات XRD نیز کانی گلوبریت سازنده اصلی نمونه T6 EDS است و این نمونه از سنگ عیار بالای گلوبریت در معدن گرماب انتخاب شده است. بر اساس مطالعه شیمی کانی، افزون بر عناصر اصلی مانند اکسیژن، گوگرد، سدیم و کلسیم، وجود درصد ناچیزی از عناصر کلر و بر در ترکیب این کانی، به دلیل شرایط تبخیری محیط تشکیل می‌باشد.

—**شیمی گلوبریت:** بر پایه مطالعات میکروپروب الکترونی کانی گلوبریت در نمونه T6 EDS شناسایی شده است. موقعیت ۱۳ نقطه تجزیه بر روی تصاویر پس‌پراکنش الکترونی (Back-scattered electron imaging: BSE) و نتایج تجزیه شیمیایی به ترتیب در شکل (۱۲- a و b) و جدول ۳ آورده شده است. گلوبریت مرجع با فرمول شیمیایی $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ دارای ترکیب شیمیایی، S: 23.05، Na: 16.53% و Ca: 14.41% و O: 46.01% می‌باشد (webmin.mindat.org). بر پایه نتایج تجزیه میکروپروب الکترونی اکسیژن، گوگرد، سدیم و کلسیم به ترتیب بیشترین درصد وزنی این کانی را تشکیل می‌دهند (جدول ۳). مقدار میانگین عناصر Na، S، Ca و



شکل ۱۲- a و b) تصاویر پس‌پراکنش الکترونی از سولفات سدیم گرماب (نمونه T6 EDS) و موقعیت نقطه‌های تجزیه ریزکاوش الکترونی انتخابی، c) مقایسه ترکیب شیمیایی گلوبریت گرماب با گلوبریت مرجع (webmin.mindat.org).

Figure 12- a and b) Backscattered scanning electron microscope images of sodium sulfate in the Garmab (sample T6 EDS) and location of selected electron microprobe point analyses, c) Comparison of chemical composition of Garmab glauberite with the reference glauberite (webmin.mindat.org).

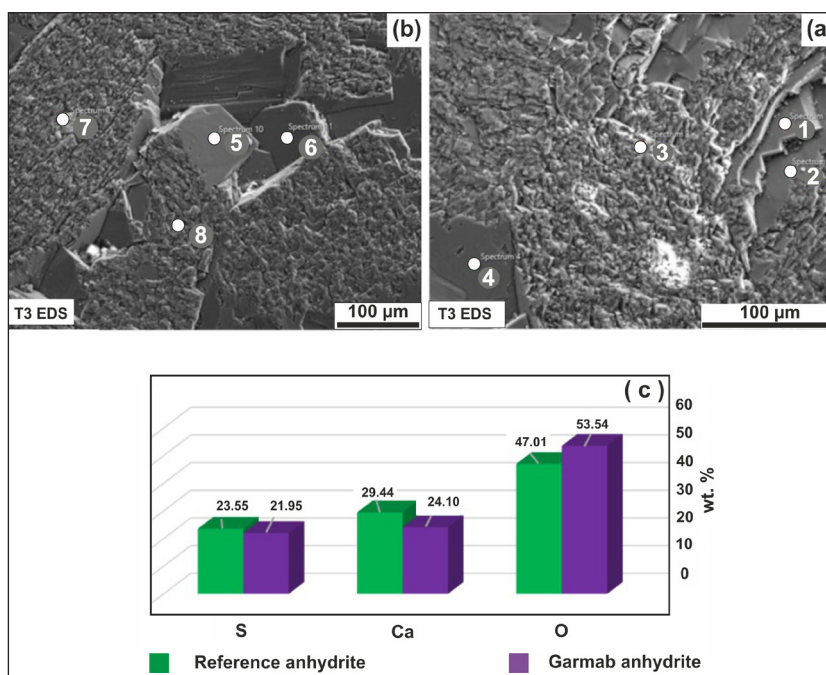
جدول ۳- تجزیه‌های ریزکاوش الکترونی (درصد وزنی) انتخابی گلوبریت از کانسار سولفات سدیم گرماب.

Table 3. Selected electron microprobe analyses (wt. %) of glauberite from the Garmab sodium sulfate deposit.

Sample	T6 EDS													Reference glauberite	
Mineral	Glauberite													(webmin.mindat.org)	
Point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Average	
O	54.9	41.6	45.1	-	55.6	53.6	46.6	46.7	52.5	57.5	62.2	60.7	46.6	51.96	46.01
Na	16.7	13.0	11.6	3.4	10.4	16.6	13.2	13.7	15.4	4.6	4.3	3.0	13.1	10.67	16.53
S	18.4	28.3	26.7	40.7	15.6	19.5	16.7	24.9	20.5	19.1	17.0	18.2	25.1	22.35	23.05
Ca	10.0	17.1	16.5	52.6	12.1	10.4	9.1	14.8	11.6	17.5	15.6	18.1	15.3	16.96	14.41
Cl	-	-	-	3.4	6.5	-	-	-	-	1.3	0.8	-	-	3.05	-
B	-	-	-	-	-	-	14.5	-	-	-	-	-	-	14.46	-
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-	100

درصد وزنی این کانی را تشکیل می‌دهند (جدول ۴). مقدار میانگین عناصر Ca، O و S در کانی هدف مطالعه به ترتیب ۵۳/۵۴، ۲۴/۱۰ و ۲۱/۹۵ درصد است. اگر متوسط ترکیب شیمیایی کانی هدف با ترکیب شیمیایی انیدریت مرجع مقایسه شود، بیشترین شباهت ژئوشیمیایی را با انیدریت دارد (شکل ۱۳- c). طبق مطالعات کانی‌شناسی نوری و مطالعات XRD نیز کانی انیدریت بخش شایان توجهی از این نمونه را تشکیل می‌دهد.

— **شیمی انیدریت:** بر پایه مطالعات میکروپروب الکترونی کانی انیدریت در نمونه T3 EDS شناسایی شده است. موقعیت ۸ نقطه تجزیه بر روی تصاویر پس‌پراکنش الکترونی و نتایج تجزیه شیمیایی به ترتیب در شکل ۱۳- a و b و جدول ۴ آورده شده است. انیدریت مرجع با فرمول شیمیایی $CaSO_4$ ، دارای ترکیب شیمیایی O: 47.01% و Ca: 29.44% و S: 23.55% می‌باشد (webmin.mindat.org). بر پایه نتایج تجزیه میکروپروب الکترونی اکسیژن، کلسیم و گوگرد به ترتیب بیشترین



شکل ۱۳- a و b) تصاویر پس‌پراکنش الکترونی از انیدریت گرماب (نمونه T3 EDS) و موقعیت نقطه‌های تجزیه ریز کاوش الکترونی انتخابی، c) مقایسه ترکیب شیمیایی انیدریت گرماب با انیدریت مرجع (webmin.mindat.org).

Figure 13- a, b) Backscattered scanning electron microscope images of anhydrite in the Garmab (sample T3 EDS) and location of selected electron microprobe point analyses, c) Comparison of chemical composition of Garmab anhydrite with the reference anhydrite (webmin.mindat.org).

جدول ۴- تجزیه‌های ریز کاوش الکترونی (درصد وزنی) انتخابی انیدریت از کانسار گرماب.

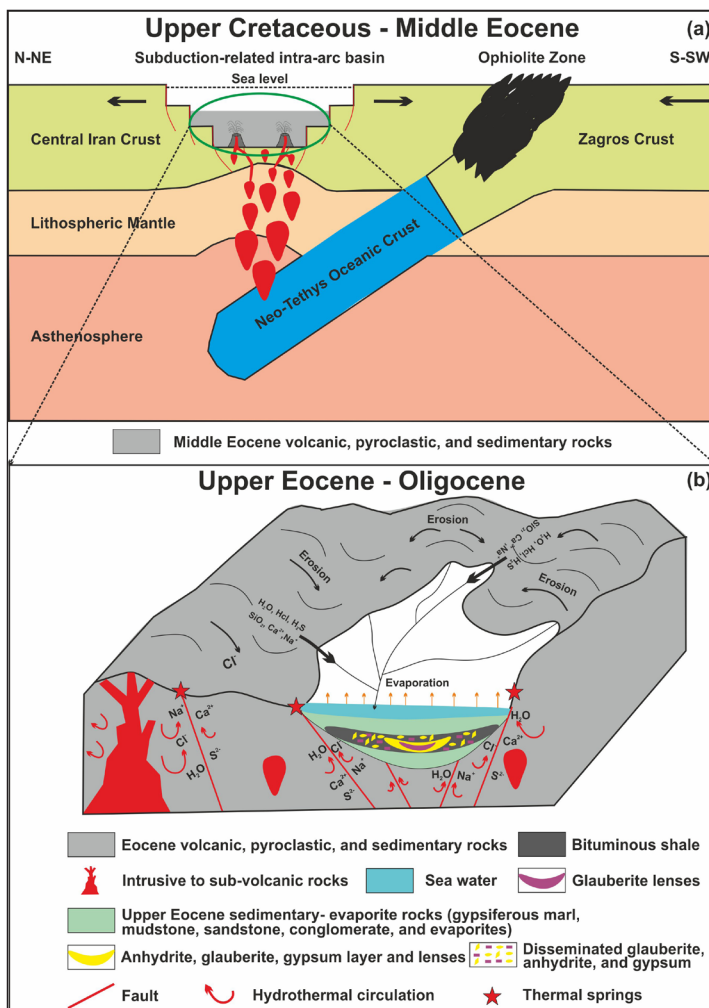
Table 4. Selected electron microprobe analyses (wt. %) of anhydrite from the Garmab deposit.

Sample	T3 EDS									Reference anhydrite (webmn.mindat.org)
	Anhydrite									
Mineral										
Point No.	1	2	3	4	5	6	7	8	Average	
S	23.4	23.8	19.0	22.0	19.6	25.9	21.1	21.0	21.95	23.55
Ca	26.6	26.5	19.7	23.6	21.3	30.7	23.0	21.4	24.10	29.44
O	50.0	49.7	61.3	54.4	59.1	43.4	55.9	54.5	53.54	47.01
Sr	-	-	-	-	-	-	0.1	3.1	1.60	-
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	-	100

۳-۴- الگوی زایشی سولفات سدیم در منطقه گرماب

از نظر زمین‌ساختی، منطقه مورد مطالعه در بخش شمالی پهنه ایران مرکزی قرار دارد. بررسی تکامل زمین‌ساختی پوسته سرزمین ایران و به ویژه پهنه ایران مرکزی نشان می‌دهد که در طول زمان‌های ژوراسیک بالایی- کرتاسه و انوسن- الیگوسن به ترتیب همزمان با فرورانش پوسته‌های اقیانوسی تتیس جوان اول و دوم به زیر پوسته قاره‌ای ایران مرکزی و تشکیل کمان‌های آتشفشانی- ماگمایی، حوضه‌های دریایی کم‌ژرفا و بسته درون قاره‌ای ناشی از کافت‌زایی، در مناطق برخورد قاره - قاره در طول زمان‌های انوسن تا میوسن در پهنه ساختاری ایران مرکزی به وجود می‌آید. با بسته شدن شاخه‌های مختلف اقیانوس تتیس جوان در طول زمان‌های کرتاسه بالایی تا میوسن، اثرات پوسته‌های اقیانوسی به صورت پهنه‌های افیولیتی در امتداد راندگی اصلی زاگرس (اثرات پوسته اقیانوسی تتیس جوان اول) و اطراف خرد قاره ایران مرکزی (اثرات پوسته اقیانوسی تتیس جوان دوم) مشاهده می‌شود (e.g., Berberian, 1983; Golonka, 2004). در طول انوسن در بخش‌های مرکزی حوضه‌های رسوبی درون قاره‌ای کشتی مرتبط با مناطق فرورانش، بر اثر فعالیت‌های آتشفشانی توالی از سنگ‌های آذرآواری- رسوبی (لیتیگ توف و توف با ترکیب آندزیت، داسیت، تراکی آندزیت و آندزیت بازالتی، توف شیلی، شیل، مادستون، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و گاهی سنگ‌های تبخیری) و آتشفشانی (بیشتر گدازه‌های داسیتی، آندزیتی و آندزیت بازالتی) تشکیل یافته‌اند (شکل ۱۴-ا). در طول انوسن بالایی- میوسن، سنگ‌های آذرین با ترکیب گرانیت، گرانودیوریت، دیوریت، مونزونیت، مونزودیوریت و دیاباز به شکل‌های توده، آپوفیز و دایک در سری

آذرآواری- گدازه‌ای انوسن نفوذ کرده است (شکل ۲). کمان‌های آتشفشانی- نفوذی ترو- چاه شیرین، خوف- درونه، قوچان- سبزواری نتیجه این واقعه مهم زمین‌ساختی هستند. در قسمت‌های حاشیه حوضه‌های درون قاره‌ای و در نتیجه فعالیت گسل‌های کشتی و عادی (نرمال) اربلغز، حوضه‌های دریایی کم‌ژرفا در بخش‌های مختلف پهنه ساختاری ایران مرکزی از انوسن بالایی تا پلیوسن تشکیل شده است. در این حوضه‌های کم‌ژرفای حاشیه‌ای، توالی از مارن، شیل، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و تبخیری‌ها (انیدریت، ژیس، سولفات سدیم، نمک طعام و ...) نهشته شده است (شکل ۱۴-ب). هم‌چنین، در قسمت‌های مرکزی حوضه‌های درون قاره‌ای در زمان‌هایی که ژرفای آب دریا به دلیل بالا آمدن کف حوضه کمتر شده و شدت تبخیر بالا بوده است، لایه‌های تبخیری همراه با مارن و شیل نهشته شده‌اند. در زمان‌های انوسن تا پلیوسن در ایران مرکزی (زمان انوسن بالایی در موقعیت کنسار سولفات سدیم گرماب)، شورابه‌های گرمابی مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی انوسن در یک رژیم زمین‌ساختی کشتی از طریق گسل‌های عادی اربلغز که امتداد آن‌ها به کف حوضه می‌رسید، وارد محیط حوضه رسوبی شده است. در ضمن، برخی از مواد رسوبی نیز به صورت آواری از سنگ‌های حوضه زهکشی و فوران‌های آتشفشانی واقع در خشکی‌ها (خاکستر، گازهای مختلف و آب‌های اسیدی) وارد حوضه‌های رسوبی درون قاره‌ای شده است. در این قبیل حوضه‌های رسوبی به دلیل آب و هوای گرم و خشک، بسته بودن حوضه از نظر آب‌نگاری و زمین‌ساختی، تبخیر شدید، قرار گرفتن در عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و غیره شرایط برای رسوب نهشته‌های تبخیری به همراه مارن و شیل فراهم شده است (شکل ۱۴-ب).



شکل ۱۴- (a) فرورانش پوسته اقیانوسی تتیس جوان به زیر پوسته ایران مرکزی و تشکیل حوضه‌های درون قاره‌ای مرتبط با فرورانش در زمان کرتاسه بالایی- انوسن و (b) مدل نمادین که نهشته‌گذاری توالی رسوبی- تبخیری را در حوضه کم‌ژرفای درون قاره‌ای در زمان انوسن بالایی- الیگوسن در ناحیه گرماب نشان می‌دهد.

Figure 14- a) Subduction of Neo-Tethys oceanic crust under the Central Iran crust and forming of the subduction-related intracontinental basin during Upper Cretaceous-Eocene and b) Schematic model showing deposition of sedimentary-evaporite sequence in shallow intracontinental basin during Upper Eocene- Oligocene in the Garmab area.

دنبال می‌شود (Eugster, 1985). در کانسار سولفات سدیم گرماب، کانی‌های گلوبریت، انیدریت، ژپیس و هالیت از شورابه‌های غنی از $\text{Na}-(\text{Ca})-\text{SO}_4-\text{Cl}$ در بخش‌های حاشیه‌ای حوضه‌های دریایی کم‌ژرفای بسته‌درون قاره‌ای مرتبط با مناطق فرورانش تحت شرایط آب و هوایی خشک تشکیل شده است.

۵- نتیجه‌گیری

گلوبریت مهم‌ترین کانی سولفات سدیم در منطقه گرماب است و به همراه انیدریت، ژپیس و هالیت به شکل‌های عدسی، لایه‌ای و بلورهای منشوری پراکنده در توالی شیل بیتومین‌دار، مارن‌های گچ‌دار، مادستون، ماسه‌سنگ و کنگلومرای ائوسن بالایی تشکیل شده است. در این توالی رسوبی-تبخیری، کانی‌های تبخیری بیشترین همیافتی را با شیل‌های بیتومین‌دار دارند. تناوب شیل‌های بیتومین‌دار با سنگ‌های تبخیری، بیانگر یک سامانه پیش‌رونده-پس‌رونده فعال است که در آن نهشت شیل بیتومین‌دار با رسوب تبخیری‌ها دنبال می‌شود. شورابه‌های گرمابی مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی ائوسن در یک رژیم زمین‌ساختی کششی از طریق گسل‌های عادی ارب‌لغز که امتداد آن‌ها به کف یا بستر حوضه‌های رسوبی می‌رسید، وارد محیط رسوبی شده‌اند. در ضمن، برخی از مواد رسوبی نیز به صورت آواری از سنگ‌های حوضه زهکشی با ترکیب سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری-نفوذی فلسیک تا مافیک (بیشتر حدواسط) وارد حوضه‌های رسوبی درون قاره‌ای شده است. با توجه به کانی‌شناسی نهشته‌های تبخیری در منطقه گرماب (گلوبریت، انیدریت، ژپیس و هالیت)، شورابه‌های حوضه تبخیری غنی از $\text{Na}-(\text{Ca})-\text{SO}_4-\text{Cl}$ بوده‌اند. کانسار سولفات سدیم گرماب در بخش‌های حاشیه‌ای حوضه‌های دریایی کم‌ژرفای بسته درون قاره‌ای مرتبط با مناطق فرورانش و تحت شرایط آب و هوایی خشک تشکیل شده است.

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 شرکت محترم املاح معدنی ایران که برای نمونه‌برداری از معدن سولفات سدیم گرماب همکاری داشته‌اند، تشکر می‌شود. از دست اندرکاران محترم فصلنامه علمی علوم زمین و داورانی که ارزیابی مقاله حاضر را قبول می‌فرمایند، قدردانی می‌شود.

با توجه به کانی‌شناسی نهشته‌های تبخیری در کانسار سولفات سدیم گرماب (بیشتر گلوبریت، انیدریت، ژپیس و هالیت)، شورابه‌های حوضه تبخیری منطقه گرماب غنی از $\text{Na}-(\text{Ca})-\text{SO}_4-\text{Cl}$ بوده است. از آن جایی که ترکیب شورابه‌های حوضه‌های تبخیری به ترکیب سنگ‌شناسی حوضه زهکشی احاطه کننده یک دریاچه شور بستگی دارد (Hardie and Eugster, 1970; Eugster, 1980)، در منطقه گرماب با توجه به کانی‌شناسی کانسار و ترکیب شیمیایی شورابه تبخیری، ترکیب سنگ‌های حوضه زهکشی به احتمال خیلی زیاد از نوع سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری-نفوذی فلسیک تا مافیک (بیشتر حدواسط)، شیل‌های پیریتی و خاکستر آتشفشان‌های حدواسط بوده است. وجود نوار آتشفشانی-نفوذی طرود-چاه شیرین با سنگ‌های آتشفشانی-آذرآواری-نفوذی فلسیک تا مافیک (بیشتر حدواسط) در شمال و نزدیکی بلافصل منطقه گرماب این فرضیه را تایید می‌کند. در حوضه‌های رسوبی-تبخیری درون قاره‌ای، نهشت رسوبات پیش از کافت‌زایی، همزمان با تشکیل کافت و پس از کافت‌زایی صورت می‌گیرد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که بیشتر نهشته‌های تبخیری بزرگ به طور معمول در مرحله پس از کافت‌زایی رسوب می‌نمایند (Warran, 2010). بنابراین در ناحیه گرماب نیز نهشته‌های تبخیری به احتمال زیاد در مرحله پس از کافت‌زایی نهشته شده است. گلوبریت مهم‌ترین کانی سولفات سدیم در ناحیه گرماب است و به همراه انیدریت، ژپیس و هالیت به شکل‌های عدسی، لایه‌ای و بلورهای منشوری پراکنده در توالی رسوبی-تبخیری-آذرآواری-نفوذی با سنگ‌شناسی مارن‌های گچ‌دار، شیل بیتومین‌دار، مادستون، ماسه‌سنگ و کنگلومرا تشکیل شده است. مشاهدات صحرائی در معدن گرماب نشان می‌دهند که در توالی رسوبی-تبخیری ائوسن بالایی، گلوبریت و انیدریت بیشترین همیافتی را با شیل‌های بیتومین‌دار دارد. نهشت شیل‌های بیتومین‌دار در حوضه‌های رسوبی درون قاره‌ای کم‌ژرفا، بسته و شور نیز مهم است. وجود تناوبی از شیل‌های بیتومین‌دار با کانی‌های تبخیری در حوضه نشان می‌دهد که چنانچه دمای بالا و غذای کافی وجود داشته باشد، برخی از موجودات پلانکتونی و گیاهان ممکن است افزایش یابند. وجود شیل‌های بیتومین‌دار غنی از کروژن بیانگر ژرفای زیاد آب دریا و شرایط آب و هوایی مرطوب است. از سوی دیگر، کانی‌های سولفات سدیم و لایه‌های انیدریت، ژپیس و هالیت در پلایاها، دریاچه‌ها و دریاچه‌های کم‌ژرفای شور که از مواد آلی فقیر و دارای شرایط آب و هوای خشک هستند، تشکیل می‌شوند. زمانی که روابط میان شیل‌های غنی از مواد آلی و تبخیری‌ها مطالعه گردد، مشاهده می‌شود که یک سامانه پیش‌رونده-پس‌رونده فعال وجود دارد که در آن رسوب شیل بیتومین‌دار با رسوب تبخیری‌ها

کتابنگاری

- بریریان، م.، قرشی، م.، طالبیان، م.، شجاع طاهری، ج.، ۱۳۷۵، پژوهش و بررسی نوزمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه-گسلش در گستره سمنان، گزارش سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۲۶۶ص.
- بهار فیروزی، خ.، عارفی‌پور، س.، احمدی، ع.، صادقی، ا.، ۱۳۹۶، نقشه و گزارش زمین‌شناسی کلاته آبگرم (6761HISE)، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- شبانیان، ا.، ازقندی، م.، سلمانلو، ع.، ۱۳۹۴، گزارش زمین‌شناسی ساختاری معدن سولفات سدیم گرماب، شرکت معدنی املاح ایران، گزارش داخلی و منتشر نشده، ۲۵ ص.
- شیخ الاسلامی، م.ر.، جوادی، ح.ر.، اسدی سرشار، م.، آفاحسینی، ا.، کوه پیماء، م.، وحدتی دانشمند، ب.، ۱۳۹۳، دانشنامه‌ی گسله‌های ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۵۸ ص.
- صفایی، م.، قلمقاش، ج.، ۱۳۹۰، شرح نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ سمنان، اداره زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی استان سمنان، ۷۹ ص.

References

- Afshar, A., Norouzi, G.H., Moradzadeh, A., and Riahi, M.A., 2018. Application of magnetic and gravity methods to the exploration of sodium sulfate deposits, case study: Garmab mine, Semnan, Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 586–596. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.10.003>.
- Aghanabati, A., Hamed, A.R., Samadian, M.R., Nabavi, M.H., Alavi-Naini, M., and Shahrabi, M., 1994. Geological quadrangle of Semnan, 1:250,000 series, No. G5, Geological Survey of Iran, Tehran.

- Alavi-Naini, M., 1997. Geological quadrangle of Jam, 1:100,000 series, No. 6761, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Armstrong-Altrin, J.S., and Machain-Castillo, M.L., 2016. Mineralogy, geochemistry, and radiocarbon ages of deep sea sediments from the Gulf of Mexico. *Journal of South American Earth Sciences* 71, 182-200. DOI:10.1016/j.jsames.2016.07.010.
- Bahar-Firouzi, K., Arefipour, S., Ahmadi, A., and Sadeghi, A., 2017. *Geological map and report of Kalate Abgarm (6761HISE), scale 1:25000, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. (In Persian)*.
- Berberian, M., 1983. Structural evolution of the Iranian Plateau; Contribution to the seismotectonic of Iran, Part IV: Continental deformation in the Iranian Plateau. Geological Survey of Iran, Report 52, 19-68.
- Berberian, M., Ghorashi, M., Talebian, M., and Shoja-Taheri, J., 1996. *Research and study of neotectonic and earthquake-fault risk in Semnan area, Geological Survey of Iran, 266 p. (In Persian)*.
- Blackburn, W.H., Metcalf, R.V., and Ragland, P.C., 1994. Geochemical evolution of the Precambrian Old Rag granite, Virginia, USA: testing a U/Th exploration model. *Chemical Geology* 111, 177-206.
- Brand, U., Morrison, J.O., and Campbell, I.T., 1998. Strontium in sedimentary rocks. In encyclopedia of Geochemistry, edited by Clare P. Marshall and Rhodes W. Fairbridge. Kluwer, Academic, Dordrecht, 712 pp. ISBN 0-421-75500-9.
- Brewer, P.G., 1975. Minor elements in seawater. In: J.P. Riley and G. Skirrow (Editors), *Chemical Oceanography*, 1. Academic Press, New York, N.Y., 2nd ed., 451—489.
- Eckardt, F.D., 2001. The origin of sulphates: An example of sulphur isotopic applications. *Progress in Physical Geography*, 25, 512–519. <https://doi.org/10.1177/030913330102500403>.
- Eugster, H.P., 1980. Geochemistry of evaporitic lacustrine deposits. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 8, 35–63. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.08.050180.000343>.
- Eugster, H.P., 1985. Oil shales, evaporites and ore deposits, *Geochimica et Cosmochimica, Acta*, 49, 619-635. DOI:10.1016/0016-7037(85)90158-9.
- Garver J.I., Royce P.R., and Smick T.A., 1996. Chromium and nickel in shale of the Taconic Foreland: a case study for the provenance of fine-grained sediments with an ultramafic source. *Journal of Sedimentary Research*, 66, 100–106. <https://doi.org/10.1306/D42682C5-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- Girty, G.H., Ridge D.L., Knaack, C.H., Johnson, D., and AL-Riyami, R.K., 1996. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite Sierra Nevada, California. *Journal of Sedimentary Research* 66, 107-118.
- Golonka, J., 2004. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. *Tectonophysics*, 381 (1-4), 235-273. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2002.06.004>.
- Gromet, L.P., Dymek, R.F., Haskin, L.A., and Korotev, R.L., 1984. The North American shale composite: Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 2469-2482. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90298-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90298-9).
- Gu, A., and Eastoe, C.J., 2021. The origins of sulfate in Cenozoic non-marine evaporites in the basin and range province, Southwestern North America. *Geosciences*, 11 (11), 455. <https://doi.org/10.3390/geosciences11110455>.
- Hardie, L.A., and Eugster, H.P., 1970. The evolution of closed-basin brines. *Mineralogical Society America Special Paper* 3, 273–290.
- Hayashi, K.I., Fujisawa, H., Holland, H.D., and Ohmoto, H., 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 4115–4137. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00214-7).
- Henderson, P., 1984. *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, New York, 510 p.
- Khalili, M., and Torabi, H., 2003. The exploration of sodium-sulphate in Aran playa, Kashan, central Iran. *Carbonates and Evaporites*, 18, 120–124. <https://doi.org/10.1007/BF03176233>.
- Liu, C.L., Jiao, P.C., Wang, M.L., 2007. Sedimentation of glauberite and its effect on potash deposits formation in Lop Nur Salt Lake, Xinjiang, China. *Mineral Deposits* 26 (3), 322–329. 10.16111/j.0258-7106.2007.03.009.
- Mao, L.J., Mo, D.W., Yang, J.H., Guo, Y.Y., and Lv, H.Y., 2014. Rare earth elements geochemistry in surface floodplain sediments from the Xiangjiang River, middle reach of Changjiang River, China. *Quaternary International*, 336, 80-88. DOI:10.1016/j.quaint.2014.01.052.
- Mees, F., 1998. The alteration of glauberite in lacustrine deposits of the Taoudenni-Agorott basin, northern Mali. *Sedimentary Geology*, 117, 193–205. DOI:10.1016/S0037-0738(98)00042-6.
- Mostafaie, K., and Ramazi, H.R., 2015. Application of electrical resistivity method in sodium sulfate deposits exploration, case study: Garmab, Iran. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)*, 6 (2), 479-487. <https://inns.pub.net/application-of-electrical-resistivity-method-in-sodium-sulfate-deposits-exploration-case-study-garmab-iran/>.
- Oni, S., Olatunji, A., and Ehinola, O., 2014. Determination of provenance and tectonic settings of Niger Delta clastic facies using well-Y, Onshore Delta State, Nigeria. *Journal of Geochemistry*, 4, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2014/960139>.
- Rahimpour-Bonab, H., and Abdi, L., 2012. Sedimentology and origin of Meyghan lake/playa deposits in Sanandaj-Sirjan zone, Iran. *Carbonates and Evaporites*, 27, 375–393. DOI:10.1007/s13146-012-0119-0.

- Safai, M., and Ghalamghash, J., 2011. *Description of Semnan 1:250,000 geological map, Department of Geology and Mineral Exploration of Semnan Province, 79 p. (In Persian).*
- Shabaniyan, A., Azghandi, M., and Salmanlou, A., 2015. *Structural geology report of Garmab sodium sulfate mine, Amlah Mining Company of Iran, internal and unpublished report, 25 p. (In Persian).*
- Sheikholeslami, M.R., Javadi, H.R., Asadi Sarshar, M., Aghahosseini, A., Kouhpeima, M., and Vahdati Daneshmand, B., 2013. *Iran Faults Encyclopedia, Geological Survey of Iran, 558 p. (In Persian).*
- Sonnenfeld, P., 2000. The evolution of marine evaporites. In: Geertman RM (ed.) 8th World Salt Symposium, 1, 67–172. Amsterdam: Elsevier.
- Warren, J.K., 2010. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. *Earth-Science Reviews*, 98(3), 217-268. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.11.004>.
- Warren, J.K., 2016. *Evaporites: A Geological Compendium*. London, Springer, 1822 p. DOI:10.1007/978-3-319-39193-9_100-1.
- Wei, D.Y., 2001. On glauberite deposits in China. *Geology of Chemical Minerals* 23 (2), 75–82 (In Chinese with English abstract).
- Whitney, D.L., and Evans B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.
- Wignall, P.B., and Twitchett, R.J., 1996. Oceanic anoxic and the end Permian mass extinction. *Science* 272, 1155-1158. DOI: 10.1126/science.272.5265.1155.
- Yu, X.C., Wang, C.L., Liu, C.L., Zhang, Z.C., Xu, H.M., Huang, H., Xie, T.X., Li, H.N., and Liu, J.L., 2015. Sedimentary characteristics and depositional model of a Paleocene–Eocene Salt Lake in the Jiangling Depression, China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 33, 1426–1435. DOI:10.1007/s00343-015-4375-4.