

Original Research Paper

Petrology, geochemistry and chemical nature of the Gofit and Mohammadabad manganese ore host rocks, in the Late Cretaceous volcanic-sedimentary sequence southwest of Sabzevar

Shaghayegh Sadat Hashempour¹, Sajjad Maghfouri^{1*}, and Ebrahim Rastad¹

¹ Department of Geology, Faculty of Basic Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2022 May 09

Accepted: 2022 July 27

Available online: 2023 March 21

Keywords:

Gofit and Mohammadabad deposits

Volcano-Sedimentary Sequence

Late Cretaceous

Bimodal nature

Southwest of Sabzevar

ABSTRACT

The Gofit and Mohammadabad manganese deposits are located in the southwestern part of Sabzevar, within the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequences. This sequence is located inside a 100 km long folded structure with northeast-southwest trend. Mohammadabad manganese deposit located in the southeastern edge of the southern anticline in the unit 4 of regional stratigraphic column and Gofit manganese deposit is occurred in the southeastern edge of the northern anticline in the first unit of the regional stratigraphic column. The host rocks of Gofit and Mohammadabad deposits include red tuff and Marly tuff and limy tuff, respectively. According to geochemical studies, tectonic environment of manganese deposits in the southwest of Sabzevar is a rifting environment that has been formed in the Sabzevar back-arc basin. The rocks of the region have a wide range of basalt, rhyolite, dacite, olivine-basalt, andesite-basalt and trachy-andesite, which formed aligned with pyroclastic sediment and Late Cretaceous sedimentary units. Dacite rocks are the thickest felsic rock unit in the area. The values of major oxides, the pattern of rare earth elements (REE), and the changes in trace elements in spider diagrams indicate the bimodal and tholeiitic nature of the volcanic rocks of the region, which are deposited in extension environment with a mixed range from basalt to rhyolite.

1. Introduction

Manganese (Mn) deposits can be formed by various sedimentary, hydrothermal, hydrogenous, and supergene processes. Hydrothermal Mn ores formed by the precipitation of low-temperature hydrothermal solutions at the origin of generally stratabound to irregular orebodies and veins (Roy, 1992; Nicholson, 1992; Kuleshov, 2011; Maghfouri et al., 2019). In Iran, different types of Mn and Fe-Mn ore deposits are recognized in different geological settings, and they range from Precambrian/ Early Cambrian to Late Miocene/ Pliocene (Maghfouri et al., 2019). The

late Cretaceous volcano-sedimentary sequence in the southwest of the Sabzevar basin is one of the most favorable metallogenic areas in Iran for the exploration of manganese deposits which hosts several Mn deposits (e.g., Cheshmeh-Frezi; Benesbourd; Homaei; Nuddeh; Zeiheri; Gofit; Cheshmeh-saeifid, Mohammadabad; Danaei and Zakeri) (Maghfouri et al., 2017; Masoudi, 2008; Maghfouri, 2012; Nasrollahi et al., 2013; Taghizadeh, 2015; Maghfouri et al., 2015; 2016; 2018; 2021). Presently, no detailed investigation on the origin of the Mn mineralization from the Gofit and Mohammadabad

* Corresponding author: Sajjad Maghfouri; E-mail: s.maghfouri@modares.ac.ir

Citation:

Hashempour, Sh. S., Maghfouri, S., and Rastad, E., 2023. Petrology, geochemistry and chemical nature of the Gofit and Mohammadabad manganese ore host rocks, in the Late Cretaceous volcanic-sedimentary sequence southwest of Sabzevar. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(1), 127, 179-196. <https://doi.org/10.22071/gsj.2022.341490.1996>.

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

doi: 10.22071/gsj.2022.341490.1996

 dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.1.4.1



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

deposit is available. On the basis of field observations and new major, trace, and rare-earth element (REE) geochemical data, this paper aims at discussing the geochemistry and chemical nature of the Gofit and Mohammadabad manganese ore host rocks.

Since volcanic manganese deposits are formed in volcano-sedimentary sequences and the basis of their classification is the stratigraphy of the host rock sequence, it is obvious that by determining the composition and chemical nature of the volcanic rocks of the mineralization host sequence, it is possible to determine the mineralization type of manganese deposits. According to the previous studies, it is clear that most researchers have studied ophiolites in the north of Sabzevar, and few studies have been done in relation to volcano-sedimentary sequences and non-ophiolitic magmatism in the southwestern basin of Sabzevar. Since the Kal-Morgh Valley is the only geological section in the southwest of Sabzevar basin that has two manganese mineralization horizons exposed in two different strata units, in this research, an attempt has been made to investigate the geochemical and chemical nature of the sequences that host the manganese deposits of Gofit and Mohammadabad, in the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence southwest of Sabzevar.

2. Research methodology

In this research, in order to investigate the rock characteristics of the studied area, a survey was carried out perpendicular to the layering process in the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence, and 18 polished thin and thick sections were prepared. Supplementary investigations were carried out using a FEI/Philips XL30 scanning electron microscope at Tarbiat Modares University, Iran. In order to correctly characterize their chemical compositions, 20 samples were selected for major, trace, and rare-earth-elements (REE) analysis of volcanic rocks. Rock chips (~400 g) from each sample were carefully sampled, washed with distilled water at room temperature, and then dried. They were further crushed and powdered in tungsten carbide swing mill. Bulk-rock chemical analysis of major, trace, and REE elements were determined for 20 samples by XRF method and 20 samples by Mass Spectrometry (ICP-MS) method (at Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guizhou, China), the geochemical characteristics and nature of igneous rocks of the region have been investigated.

3. Results

Volcanic, sub-volcanic, pyroclastic and sedimentary rocks are exposed directly in the southwest of Sabzevar (Fig.1.b). Volcanic and sub-volcanic rocks are exposed in the form of lava and sill between pyroclastic and sedimentary units and include a wide range of combinations of rhyolite, trachyandesite, pillow basalts, porphyry dacite and alkali olivine basalt. The only intrusive

outcropping mass in the region is gabbro, which spreads in the form of a sill along with the general extension of the region (Fig. 2). Therefore, the igneous rocks of the region can be divided into three categories: volcanic-subvolcanic, pyroclastic, and intrusive, and the geochemistry of volcanic and sub-volcanic rocks is studied separately (Table 1).

4. Discussions

Today's geochemical criteria to distinguish ferromanganese deposits of various origins are well established. Major element ratios, trace element concentrations and also enrichment effects have been widely used to assess the origin of manganese deposits (Shah and Khan, 1999; Nakagawa et al., 2009; Polgári et al., 2012; Sasmaz et al., 2014). Analytical results of the major and trace elements of the Gofit and Mohammadabad Mn deposit is given in Table 1. Various diagrams have been used to determine the magmatic series of rocks in the region. In these diagrams, the rocks of the region show predominantly tholeiitic nature. Dacite and rhyolite samples are in the range of calc-alkaline series (Fig. 7. b). The similarity of the aforementioned evidence between gabbro sill and volcanic rocks shows that these igneous rocks are of the same origin, in other words, sub-volcanic mafic rocks are the internal equivalent of basaltic rocks in the region. According to the bimodal nature of some rock samples and the location of the samples in the range of back-arc extensional basins in the binary diagram of Th/Nb against Ce/Nb from Saunders and Tarney, (1991), it is clear that the volcano-sedimentary sequence southwest of Sabzevar was formed in the back-arc extensional basin. The general theory about magmatism and sedimentation in the Sabzevar area is the creation of extensional environment and the formation of a back-arc basin during the Late Cretaceous (Rossetti et al., 2010; Agard et al., 2011). The pattern of rare earth elements related to volcanic rocks has a uniform slope with negative anomalies of Rb, Nb, Sr and Ti. Depletion of HFSE elements such as Nb, Zr and Ti indicates the production of magma with a low MORB melting degree. The depletion of Nb and Ti can reflect the presence of minerals containing Ti (Pearce and Parkinson, 1996) or Ti-Nb (Reagan and Gill, 1989) in the origin. Also, this depletion indicates the formation of the aforementioned volcanic rocks near the volcanic arcs (Peter and Scott, 1999).

5. Conclusion

Gofit and Mohammadabad deposits in the southwest of Sabzevar basin are volcanogenic type deposits (Hashempour, 2021) and these deposits were formed in connection with the volcanic activities of the region. Therefore, in this article, an attempt was made to study the stratigraphic sequence of the host rocks. The host sequence of manganese mineralization in the southwestern region of Sabzevar

is composed of sedimentary, pyroclastic, lava and sub-volcanic intrusive rock units.

Late Cretaceous plutonic and volcanic igneous rocks in the southwest of Sabzevar include a collection of trachyandesite, dacite, rhyolite, gabbro, andesite and basalt rocks, which are seen in the Late Cretaceous sedimentary sequence. Volcanic and sub-volcanic rocks of this sequence have a bimodal nature and are mainly composed of mafic volcanic rocks (about 35 to 40%), which are accompanied by small amounts of dacite and rhyolite (about 15 to 20%). Therefore, according to the studies, the host sequence and

volcanic rocks along with manganese deposits in the southwestern region of Sabzevar can be considered bimodal mafic. So that in the geochemical diagram, the volcanic rocks of the region have a mixed spectrum from basalt to rhyolite and are of tholeiitic type, which indicates the bimodal nature of the igneous rocks of the southwest Sabzevar region. The magmatic studies and the nature of sub-volcanic gabbro sill of the region are completely consistent with the volcanic rocks, which studies showed that the volcanic and sub-volcanic rocks are of the same origin and were formed in a back-arc to arc extensional environment.

سنگ‌شناسی، ژئوشیمی و ماهیت شیمیایی سنگ‌های میزبان کانسارهای منگنز گف و محمدآباد، در توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین جنوب‌باختر سبزوار

شقایق سادات هاشم‌پور^۱، سجاد مغفوری^{۱*} و ابراهیم راستاد^۱

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

کانسارهای منگنز گف و محمدآباد در ناحیه جنوب‌باختر سبزوار و در توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین تشکیل شده‌اند. این توالی در داخل یک ساختار چین‌خورده به طول ۱۰۰ کیلومتر با روند شمال‌خاور - جنوب‌باختر قرار گرفته است که کانسار منگنز گف در یال جنوبی تاقدیس شمالی و در توالی سنگی واحد اول از ستون چینه‌شناسی ناحیه‌ای جنوب‌باختر سبزوار و کانسار منگنز محمدآباد در یال جنوبی تاقدیس جنوبی در توالی سنگی واحد چهار از ستون چینه‌شناسی ناحیه‌ای تشکیل شده‌اند. سنگ میزبان کانسارهای گف و محمدآباد به ترتیب توف قرمز و توف آهکی می‌باشند. محیط زمین‌ساختی کانسارهای منگنز ناحیه جنوب‌باختر سبزوار با توجه به بررسی‌های ژئوشیمیایی صورت گرفته، یک محیط کشتی است که مرتبط با زمین‌ساخت زون سبزوار تشکیل شده است. سنگ‌های منطقه دارای طیف ترکیبی گسترده‌ای از بازالت، ریولیت، داسیت، الوین بازالت، آندزیت بازالت و تراکی آندزیت می‌باشد که همراه با رسوبات آذرآواری و واحدهای رسوبی کرتاسه پسین تشکیل شده‌اند. سنگ‌های داسیتی سبترترین واحد سنگی فلسیک شناخته شده در منطقه هستند. مقادیر اکسیدهای اصلی، الگوی عناصر نادر خاکی و تغییرات عناصر کمیاب در نمودارهای عنکبوتی نشانگر ماهیت بایمودال (Bimodal) و تولیتی سنگ‌های آتشفشانی منطقه است که با داشتن طیف ترکیبی از بازالت تا ریولیت در محیط کشتی نهشته شده‌اند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

کانسارهای منگنز گف و محمدآباد

توالی آتشفشانی - رسوبی

کرتاسه پسین

ماهیت بایمودال

جنوب‌باختر سبزوار

۱- پیش‌نوشتار

ایران در بخش میانی کمربند کوهزایی درون قاره‌ای آلپ-همالیا، در مرز همگرایی صفحات اصلی عربستان و اوراسیا قرار گرفته است. در نتیجه توسعه و تکامل اقیانوس نئوتیس، مجموعه‌ای از رویدادهای ماگمایی در ایران رخ داده است که یکی از مهم‌ترین آنها در دوران کرتاسه پسین می‌باشد که با فروانش پوخته اقیانوسی از زمان کرتاسه پسین شروع شده و تا سنوزویک ادامه یافته است. به طور کلی، ماگماتیسم کرتاسه پسین نسبت به شارهای ماگمایی ائوسن بالایی در کمربند ماگمایی ارومیه-دختر (Hosseini et al., 2017) و همچنین در شمال‌خاور ایران (Alaminia et al., 2013) گسترده‌تری دارد. برخی از پژوهشگران بر این باورند که فروانش اقیانوس سیستان به سمت خاور در زیر بلوک افغانستان در زمان کرتاسه پسین مسئول پیدایش سنگ‌های کرتاسه در خاور ایران بوده است (Barrier and Vrielynck, 2008). اما به باور آلامینیا و همکاران (Alaminia et al., 2013) فروانش لیتوسفر اقیانوسی سبزوار به زیر اوراسیا عامل ایجاد ماگماتیسم کرتاسه پسین در شمال خاور ایران می‌باشد. باور عمومی این است که فروانش پوخته اقیانوسی سبزوار (به عنوان یک حوضه پشت قوسی به سن کرتاسه پسین) به زیر بلوک توران، باعث رخداد ماگماتیسم در امتداد زون سبزوار در طول کرتاسه پسین - ائوسن شده است (Rossetti et al., 2010).

حوضه رسوبی جنوب‌باختر زون ساختاری سبزوار، توالی‌های آتشفشانی - رسوبی پس از کرتاسه تغییر شکل یافته و یک ساختار چین‌خورده به عرض ۸ تا ۱۴ کیلومتر و طول حدود ۱۰۰ کیلومتر را تشکیل داده است (شکل ۱-ا). روند کلی این ساختار شمال‌خاور - جنوب‌باختر است که از روند کلی زون سبزوار پیروی می‌کند (مغفوری و همکاران، ۱۳۹۳) (شکل ۱). بر طبق بررسی‌های انجام گرفته توسط مغفوری (۱۳۹۱) توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین در جنوب‌باختر سبزوار میزبان کانه‌زایی‌های متعدد منگنز است که هریک دارای جایگاه چینه‌شناسی مخصوص به خود می‌باشند (شکل ۱-ب). این کانسارها و اندیس‌های منگنز را می‌توان از جهت موقعیت چینه‌ای در ستون چینه‌شناسی ناحیه‌ای جنوب‌باختر سبزوار، سن نسبی و جنس سنگ میزبان به دو گروه پایینی و بالایی تقسیم نمود (مغفوری و همکاران، ۱۳۹۳) (شکل ۲). نظر به تشکیل کانسارهای منگنز آتشفشان‌زاد در توالی آتشفشانی - رسوبی و همچنین طبقه‌بندی آنها بر مبنای توالی ترکیبی چینه‌شناسی میزبان، بدیهی است تعیین ترکیب و ماهیت شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی توالی میزبان کانسارهای مورد مطالعه می‌تواند مشخص‌کننده نوع تیپ کانی‌زایی کانسارهای منگنز و همچنین چگونگی

* نویسنده مسئول: سجاد مغفوری؛ E-mail: s.maghfouri@modares.ac.ir

ماخذنگاری:

هاشم‌پور، ش. س.، مغفوری، س. و راستاد، ا.، ۱۴۰۲، سنگ‌شناسی، ژئوشیمی و ماهیت شیمیایی سنگ‌های میزبان کانسارهای منگنز گف و محمدآباد، در توالی آتشفشانی - رسوبی کرتاسه پسین جنوب‌باختر سبزوار. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳(۱)، ۱۲۷-۱۹۶. <https://doi.org/10.22071/gsj.2022.341490.1996>

doi: 10.22071/gsj.2022.341490.1996



doi: 10.22071/gsj.2022.341490.1996

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/>)

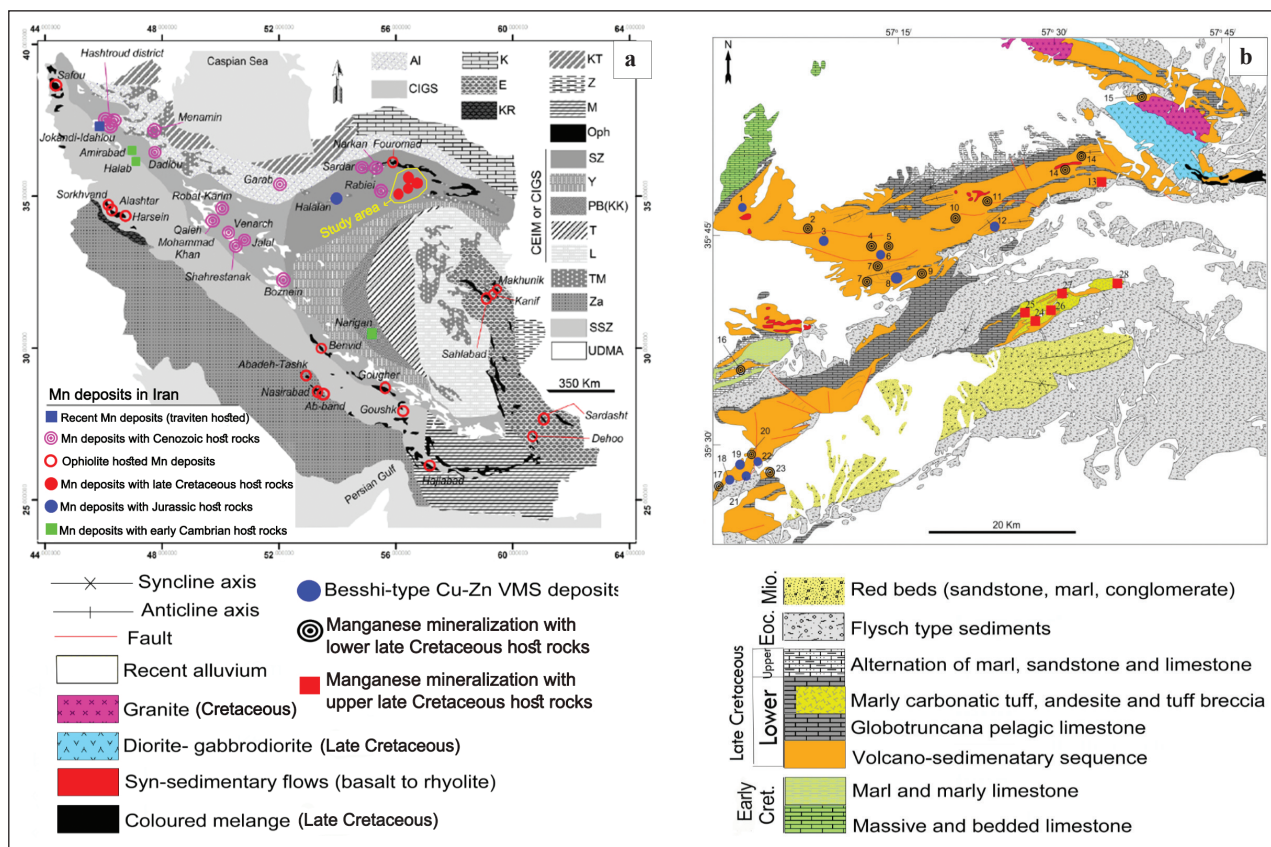
۳- زمین‌شناسی

کشش لیتوسفر اقیانوسی سبزواری و ماگماتیسزم موزوویک مرتبط با آن به ویژه در طول کرتاسه، در چهار دهه اخیر به طور گسترده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است (Lindenberg et al., 1983; Spies et al., 1983; Shojaat et al., 2003; Rossetti et al., 2010; Omrani et al., 2013; Moghadam et al., 2014, 2016; Ghasemi and Rezaei, 2015; Jamshidi et al., 2015; Maghfouri et al., 2016; Kazemi et al., 2019). منطقه مورد مطالعه بخشی از بلوک ایران مرکزی است که قسمت مرکزی زون سبزواری را تشکیل می‌دهد (شکل ۱-ا). (Rossetti et al., 2010). زون سبزواری دارای بقایای ماگماتیسزم و رسوب‌گذاری با سن بیشتر از ۱۰۰ میلیون سال را در خود ثبت کرده است که از اوایل کرتاسه با فوران سنگ‌های بازالتی شروع شده و با رسوب‌گذاری کنگلومرا و فعالیت‌های ماگمایی به شکل فوران‌های بازالتی و/یا گنبدی فلسیک (مانند ریولیت‌ها) تا کواترنری ادامه می‌یابد (Lindenberg et al., 2021; 2018; 2017; Maghfouri et al., 2016; 1983). مقطع چینه‌شناسی از سنگ‌های غیرافیولیتی کرتاسه پسین نشان می‌دهد که تمامی واحدهای آتشفشانی-رسوبی توسط توده‌های نفوذی داسیت، گنبدی ریولیتی، گرانیتوئیدهای کم‌ژرفا و سیل‌های گابروبی قطع شده‌اند. توالی آتشفشانی-رسوبی کرتاسه پسین در منطقه مورد مطالعه به‌طور عمده شامل رسوبات دریایی کم‌ژرفا با میان‌لایه‌هایی از سنگ‌های آتشفشانی است که در داخل ساختار چین‌خورده با روند شمال‌خاور-جنوب‌باختر قرار دارند (شکل ۱-ب).

گسترش و پراکندگی آنها در منطقه مورد مطالعه باشد. با توجه به بررسی‌های گذشته مشخص می‌شود که بیشتر پژوهشگران به مطالعه افیولیت‌ها و سنگ‌های همراه آنها در شمال سبزواری پرداخته‌اند و در رابطه با توالی‌های آتشفشانی-رسوبی و ماگماتیسزم غیرافیولیتی در حوضه جنوب‌باختر سبزواری، مطالعات اندکی صورت گرفته است و از آنجا که دره کال‌مرغ تنها مقطع زمین‌شناسی از منطقه جنوب‌باختر سبزواری است که دو افق کانه‌زایی منگنز در دو واحد چینه‌ای متفاوت در آن رخنمون دارند، در این پژوهش سعی شده است به بررسی ژئوشیمیایی و ماهیت شیمیایی توالی‌های میزبان ذخایر منگنز گت و محمدآباد، در توالی آتشفشانی-رسوبی کرتاسه پسین جنوب‌باختر سبزواری پرداخته شود.

۲- روش پژوهش

در انجام این پژوهش، برای بررسی ویژگی‌های سنگی منطقه مورد مطالعه در جهت عمود بر روند لایه‌بندی در توالی آتشفشانی-رسوبی کرتاسه پسین پیمایش صورت گرفته و از نمونه‌های اخذ شده از آنها، تعداد ۱۸ مقطع سنگ‌شناسی مورد مطالعه میکروسکوپی قرار گرفته‌اند. افزون بر آن، با تجزیه ۲۰ نمونه از سنگ‌های ولکانیک به روش XRF و ۲۰ نمونه به روش ICP-MS (آزمایشگاه ژئوشیمی دانشگاه Guizhou چین) ویژگی‌های ژئوشیمیایی و ماهیت سنگ‌های آذرین منطقه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱- (a) نقشه پراکندگی کانسارهای منگنز ایران براساس سن سنگ میزبان در زون‌های ساختاری ایران (آقاجانی، ۱۳۸۳؛ Maghfouri et al., 2019). (b) نقشه زمین‌شناسی منطقه جنوب‌باختر سبزواری و پراکندگی تیپ‌های مختلف کانه‌زایی منگنز و مس در منطقه (با تغییرات از مغفوری و همکاران (Maghfouri et al., 2019)).

Figure 1. a) Distribution map of manganese deposits according to the age of host rocks within the main tectonic zones of Iran (modified after Aghanabati, 2004; Maghfouri et al., 2019). b) Geological map of the southwestern region of Sabzevar and the distribution of different types manganese and copper mineralization in the region (modified from Maghfouri et al., 2019).

- 1: Garab; 2-3: Kalateh-Lala; 4: Cheshmeh-Frezi; 5: Benesbourd; 6: Cheshmeh-Frezi; 7: Gostareh Khavar Zamein; 8-9: Nudeh; 10: Homaei; 11: Zei- heri; 12: Chun; 13: Mohammadabad; 14: Goft; 15: Staj; 16: Cah-Setareh; 17: Nakhlak; 18: Gha- tarbounch; 19: Garmab-e-paein; 20: Asbkoshan; 21: Salamroud; 22: Izadpanah; 23: Karami; 24: Cheshmeh-saeid; 25-26: Zakeri; 27: Danaei and 28: Doulatabad.

- واحد ۱ (Unit1) شامل توف، لیتیک کریستال توف نازک لایه، ریولیت (شکل ۳-ا)، توف آندزیتی، گدازه آندزیتی، توف قرمز، واحد تراکی آندزیتی آمیگدالوئیدال دار (شکل ۴)، گدازه آتشفشانی همراه با بازالت‌های بالشی (شکل ۳-ج) و منشورهای داسیت پورفیر می‌باشد (شکل ۳-ب).

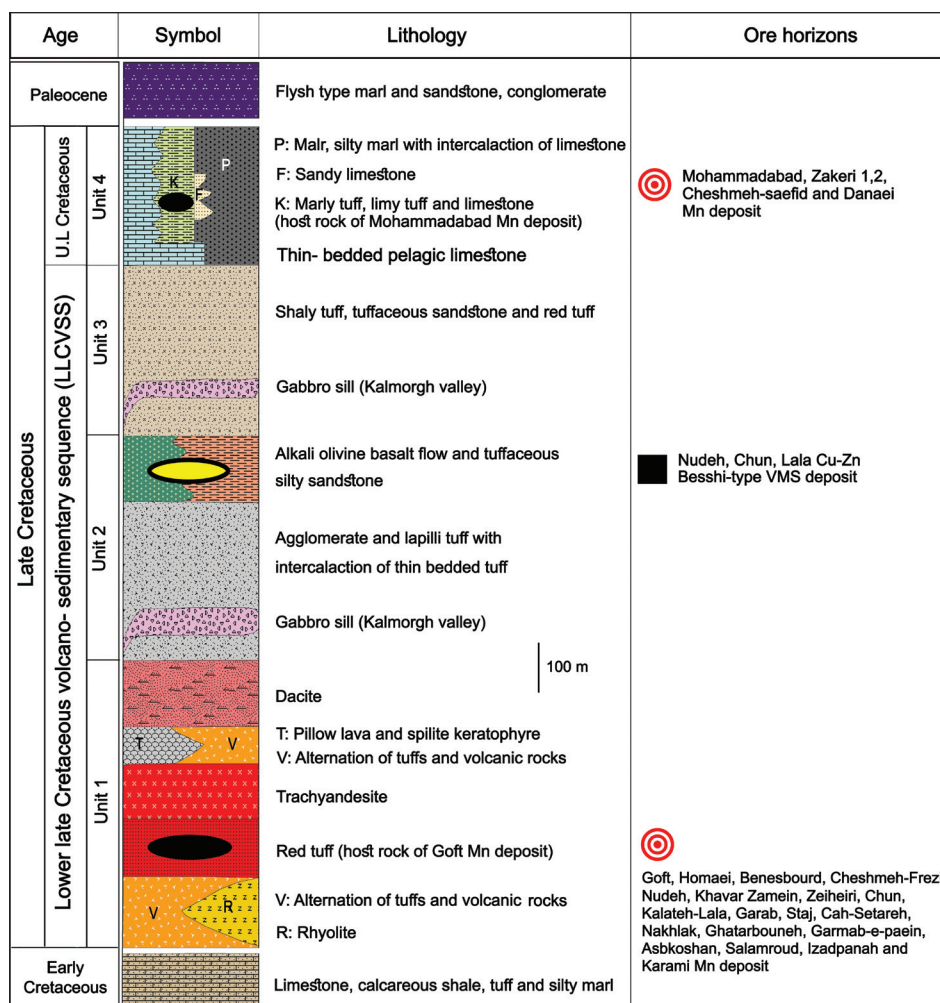
- واحد ۲ (Unit2): این واحد از آگلومرا توف با میان لایه‌هایی از توف نازک لایه، لایلی توف با میان لایه‌هایی از توف نازک لایه سبز (شکل ۵)، سیل گابروی (شکل ۴)، توف نازک لایه سبز پیریت دار و ماسه سنگ سیلتی توفی، کریستال لیتیک توف با میان لایه‌هایی از توف ریولیتی، توف ماسه‌ای نازک لایه، گدازه الیون بازالت، ماسه سنگ سیلتی- توفی، شیل و توف- شیلی تیره تشکیل شده است (شکل ۲).

- واحد ۳ (Unit3): این واحد دارای دو عضو مشتمل بر الف) توف- شیلی، ماسه سنگ توفی با میان لایه‌هایی از توف نازک لایه سبز و ب) ماسه سنگ توفی با میان لایه‌هایی از توف ماسه‌ای می‌باشد (شکل ۲).

- واحد ۴ (Unit4): این واحد از آهک‌های نازک لایه پلاژیک گلوبوترونکانادار، آندزیت، توف برش، ماسه سنگ توفی- مارن، سیلت مارنی با میان لایه‌هایی از آهک، ماسه سنگ توفی و توف تشکیل شده است (شکل ۲).

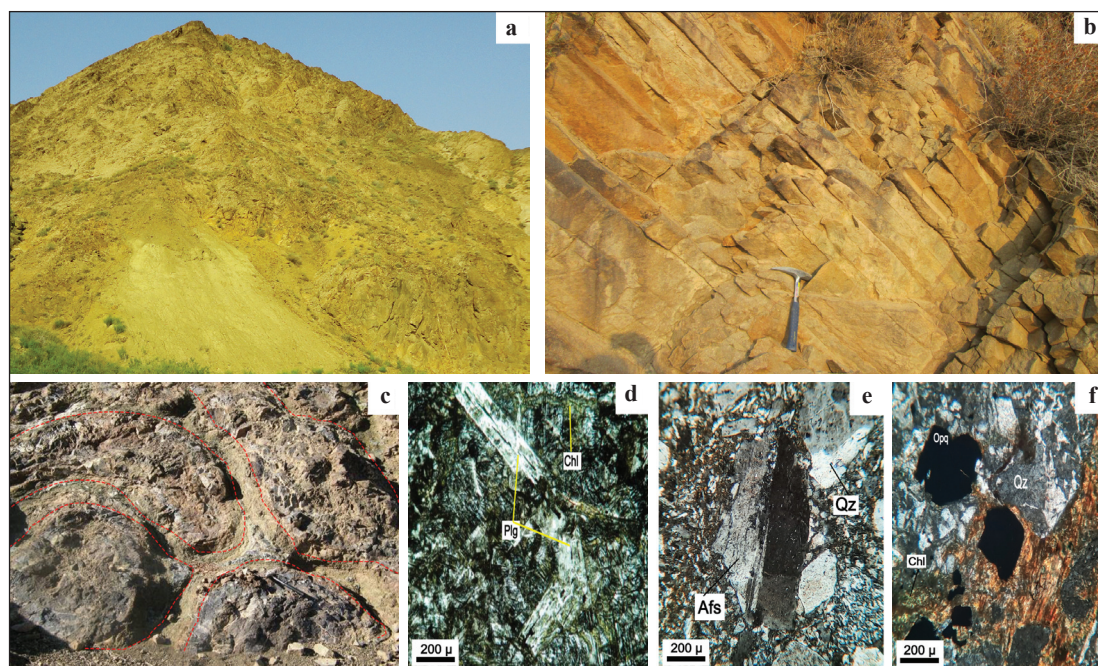
مطالعات کاظمی و همکاران (Kazemi et al., 2019) بر اساس روش U-Pb روی کانی‌های زیرکن موجود در سنگ‌های گرانیتیویدی و سنگ‌های آتشفشانی از ناحیه جنوب‌باختر سبزوار، سن کرتاسه پسین (Ma 76-102) را برای آنها مشخص کرده است یعنی زمانی که پوسته اقیانوسی سبزوار در حال فرو رانش بوده و کمان‌های جزیره‌ای جدید تشکیل شده است. برخورد ایران مرکزی با بلوک توران در دوران پالئوژن به بسته شدن اقیانوس کرتاسه سبزوار و بروز دافولیت ملائزها در اطراف خرد قاره ایران مرکزی انجامیده است.

سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه پسین از آذرآواری‌های (پیروکلاستیک‌ها) ریزدانه، درشت‌دانه و از گدازه‌های ریولیتی، داسیتی تا بازالتی تشکیل شده‌اند که موازی با روند ساختاری منطقه شمال‌خاور- جنوب‌باختر می‌باشند. بخش رسوبی این توالی شامل توف‌های سیلیسی، چرت، شیل و ماسه سنگ است که دارای میان لایه‌هایی از آهک‌های گلوبوترونکانادار و مارن می‌باشند. توالی آتشفشانی- رسوبی کرتاسه پسین در حوضه جنوب‌باختر سبزوار به چهار واحد اصلی (units 1 to 4) قابل تقسیم است (مغفوری، ۱۳۹۱) که واحدهای ۱، ۲ و ۳ مربوط به بخش زیرین کرتاسه پسین و واحد ۴ مربوط به بخش بالایی کرتاسه پسین می‌باشد (شکل ۲) در ادامه به اختصار به سنگ‌شناسی آنها اشاره می‌شود:



شکل ۲- ستون چینه‌شناسی عمومی از واحدهای سنگی کرتاسه در منطقه جنوب‌باختر سبزوار، و جایگاه تیپ‌های مختلف کانه‌زایی مس و منگنز بر روی آن (مغفوری، ۱۳۹۱). ترکیب سنگ‌شناسی واحدهای چهارگانه دارای طیف ترکیبی از سنگ‌های آذرین مافیک تا فلسیک می‌باشد.

Figure 2. The general stratigraphic column of the late Cretaceous units in the southwestern region of the Sabzevar, and the position of different types of copper and manganese mineralization (Maghfouri, 2012). The lithological composition of the four units has a range of composition from mafic to felsic igneous rocks.



شکل ۳- a) رخنمونی از گنبد ریولیتی در توالی آتشفشانی- رسوبی کرتاسه پسین. b) تصویر رخنمون از داسیت‌های منشوری رخنمون یافته در داخل رودخانه کال‌مرغ. c) تصویر رخنمون از بازالت‌های بالشی، که بین بالش‌ها دگرسان شده‌اند. این سنگ در واحد یک ستون چینه‌شناسی دیده می‌شود. d) تصویر میکروسکوپی از بازالت‌های بالشی که دارای پلاژیوکلازهای (Plg) کلریتی شده (Chl) در زمینه میکروکریستالین تا شیشه‌ای می‌باشند. e) تصویر میکروسکوپی از واحد ریولیتی که کانی درشت بلور آلکالی فلدسپار (Afs) و کوآرتز (Qz) در زمینه‌ای شیشه‌ای از کوآرتزهای ریز بلور قرار گرفته‌اند. f) تصویر میکروسکوپی از واحد داسیتی که کانی‌های پیروکسن دگرسان شده و بخش‌هایی از آن توسط کلریت (Chl) جانشین شده است.

Figure 3. a) The outcrop of rhyolitic dome in late Cretaceous volcanic-sedimentary sequence. b) The outcrop view of prismatic dacites exposed inside the Kal-Morgh River. c) General view of pillow basalts, which have been altered between pillows. This rock is seen in the unit 1 of a stratigraphic column. d) Microscopic photographs of pillow basalts that have chloritized (Chl) plagioclase (Plg) in microcrystalline to glassy context. e) Microscopic photographs of the rhyolite unit where the coarse crystal mineral of alkali feldspar (Afs) and quartz (Qz) are placed in a glassy matrix of fine crystal quartz. f) Microscopic photographs of the dacite unit where pyroxene minerals have been altered and parts of it have been replaced by chlorite (Chl).

پسین نفوذ کرده‌اند. به طور کلی دیوریت‌ها بایستی مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی در زمان کرتاسه پسین باشند.

۴- کانی‌سازی

در ناحیه جنوب‌باختر سبزوار تعداد قابل توجهی از کانسارها و اندیس‌های معدنی مس و منگنز وجود دارند که دارای جایگاه چینه‌شناسی ویژه می‌باشند (شکل ۲). این کانسارها و اندیس‌های منگنز بر اساس نوع ماده معدنی، موقعیت چینه‌شناسی و سنگ میزبان به دو گروه تقسیم می‌شوند (شکل ۲):

الف) کانه‌زایی منگنز در بخش زیرین کرتاسه پسین: این افق در نخستین واحد از بخش زیرین توالی آتشفشانی- رسوبی کرتاسه پسین قرار دارد (شکل ۲) که به طور عمده شامل رسوبات ژرف دریایی با میان لایه‌هایی از سنگ‌های آتشفشانی است که در داخل تاقدیسی با روند شمال‌خاور- جنوب‌باختر رخنمون دارند. میان لایه‌های سنگ‌های آتشفشانی این بخش از آذرآواری‌های ریزدانه، درشت‌دانه با ترکیب آندزیتی تشکیل شده‌اند (Maghfouri et al., 2016). بخش رسوبی- آذرآواری این توالی شامل توف‌های ماسه‌ای سیلیسی شده، توف قرمز رنگ (میزبان کانه‌زایی منگنز در کانسارهای گت، نوده، بنسبرد و چشمه‌فریزی (شکل ۲))، چرت، شیل و ماسه‌سنگ است که دارای میان لایه‌هایی از مارن می‌باشد و در محیط رسوبی

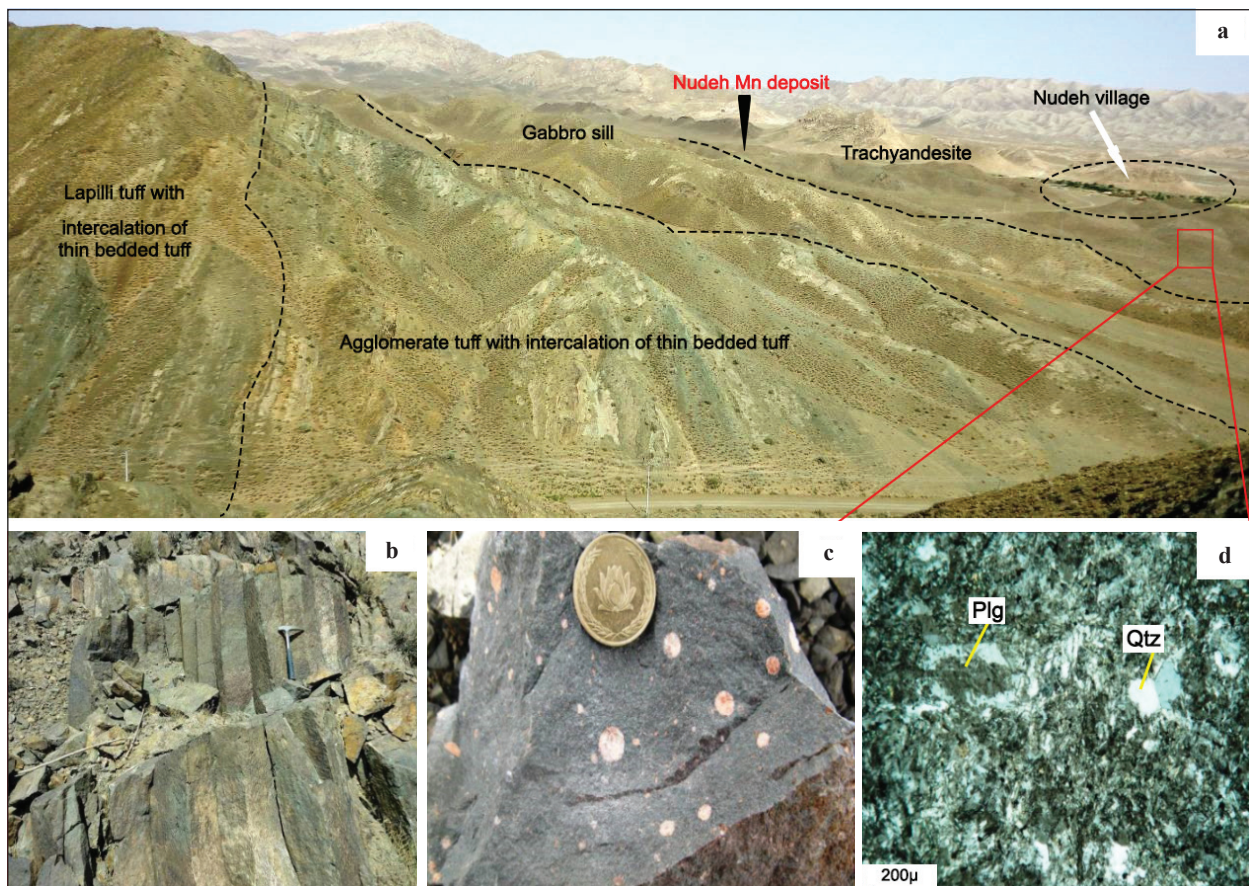
واحدهای سنگی کرتاسه پسین توسط ماسه‌سنگ، مارن و کنگلومرای آهکی پالئوسن به صورت ناپیوسته پوشیده می‌شود (شکل ۴). تنوع رخساره‌ای سنگ‌ها منعکس‌کننده شرایط محیط‌های رسوبی پرتلاطم است که در محیط‌های قوس جزیره‌ای به طور عمده مشاهده می‌شوند (McPhie et al., 1993).

کاظمی و همکاران (Kazemi et al., 2019) بر اساس ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و بافت، سنگ‌های پلوتونیک را به سه نوع دیوریت، گابرو دیوریت و گرانیت تقسیم‌بندی کرده‌اند. این سنگ‌ها به صورت استوک، سیل و دایک در سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی- رسوبی توالی کرتاسه پسین نفوذ کرده‌اند. سنگ‌های گرانیتی شمال خاوری روستای اسبکشان به صورت توده‌های بزرگ و کوچک به داخل واحدهای آتشفشانی- رسوبی کرتاسه پسین نفوذ کرده و سبب دگرسانی کلریتی و آرتیلتی در نزدیکی محل تماس شده‌اند. سنگ‌های گرانیتی حاوی بیگانه سنگ‌هایی (آنکلاو) از دیوریت هستند که تیره‌تر بوده و دارای مرزهای تیز با سنگ میزبان می‌باشند. در محیط‌های رفتی به دلیل نازک‌شدگی پوسته، ماگماتیسیم به صورت بایمودال بوده که به جایگیری کمپلکس‌های نفوذی گابرو و دیوریت در ۲ تا ۳ کیلومتری کف دریا می‌انجامد (Galley, 2003). در نقاط متعددی از منطقه مورد مطالعه توده‌های نفوذی- نیمه آتشفشانی دیوریتی دیده می‌شوند. وجه مشترک تمامی آنها در این است که فقط در توالی‌های آتشفشانی- رسوبی کرتاسه

کرتاسه پسین جای گرفته و تغییر رخساره جانبی با آهک‌های نازک لایه پلاژیک دارد (مغفوری و همکاران، ۱۳۹۳). این بخش شامل سری سنگ‌های ماسه‌ای با میان‌لایه‌هایی از میکروکنگلومرا، سنگ آهک‌های پلاژیک گلوبوترونکانادار، توف، ماسه‌سنگ و سنگ‌های آتشفشانی، سنگ آهک و مارن‌های تفکیک نشده است که به صورت هم‌شیب بر روی بخش زیرین قرار می‌گیرد. تعدادی از ذخایر اقتصادی منگنز در سنگ‌های بخش بالایی کرتاسه پسین توزیع شده‌اند که این کانسارها عبارتند از: کانسار محمدآباد، ذاکری ۱، ذاکری ۲، چشمه‌سفید و دانایی، که در واحدهای توف مارنی-کربناتی تشکیل شده‌اند (شکل ۲). سنگ‌های داسیت و آندزیتی در نزدیکی معدن پراکندگی دارند و برخی از سیل‌های آندزیتی در ناحیه معدنی دیده می‌شوند.

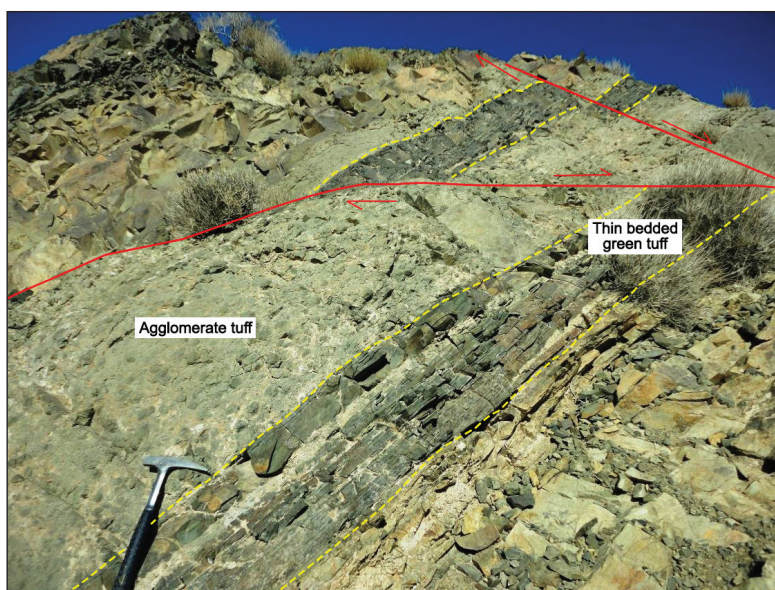
کشتی تشکیل شده‌اند (وحدتی دانشمند و سعیدی، ۱۳۷۷) (شکل ۱-ب و شکل ۲). برآورد ستبرای این واحد آتشفشانی-رسوبی به دلیل دیده نشدن قاعده آن و به هم ریختگی‌های زیاد زمین‌ساختی عملی نیست، ولی ستبرای بخش رخنمون یافته آن به کمک پیمایش‌هایی که در نقاط چین‌خورده و کمتر گسل خورده صورت گرفته است، حدود ۲۳۰۰ تا ۲۷۰۰ متر برآورد شده است (شکل ۲).

ب) کانه‌زایی منگنز در بخش بالایی کرتاسه پسین: این افق کانه‌دار در بخش بالایی توالی آتشفشانی-رسوبی کرتاسه پسین و در واحد ۴ از ستون چینه‌شناسی ناحیه‌ای قرار گرفته است (شکل ۲). این واحد رسوبی-آتشفشانی که در شمال روستای دولت‌آباد، شمال و جنوب روستاهای محمدآباد و عریان برونزد دارد در بین لایه‌های کربناته



شکل ۴- (a) نمای از واحدهای سنگی تراکی آندزیت، سیل گابرویی و آگلومرا و لاپیلی توف با میان‌لایه‌هایی از توف نازک لایه که در شمال باختر روستای نوده رخنمون دارند. (b) نمای نزدیک‌تر از واحد تراکی آندزیت که به حالت منشوری دیده می‌شوند. (c) تصویری از نمونه دستی واحد آمیگدالوئیدال‌دار، که حفرات توسط کلسیت و کوارتز پر شده است. (d) تصویر میکروسکوپی از واحد تراکی آندزیتی که فنوکریست‌های پلاژیوکلاز (Plg) و کوارتز (Qtz) در زمینه میکروکریستالین قرار گرفته‌اند.

Figure 4. a) A view of rock units of trachyandesite, gabbro sill and agglomerate and lapilli tuff with interbedded of thin layered tuff that are exposed in the northwest of Nudeh village. b) A closer view of trachyandesite unit seen in a prismatic state. c) A hand specimen of the amygdaloidal unit, where the cavities are filled by calcite and quartz. d) Microscopic photographs of trachyandesite unit where plagioclase (Plg) and quartz (Qtz) phenocrysts are placed in microcrystalline context.



شکل ۵- تصویر صحرایی از رخنمون واحدهای آذرآواری نازک لایه واحد ۲ توالی آتشفشانی- رسوبی کرتاسه پسین حوضه جنوب‌باختر سبزوار.

Figure 5. The outcrop of thin pyroclastic units of unit 2 of the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence in the southwest of Sabzevar Basin.

۵-۱- طبقه‌بندی و تعیین ترکیب شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی

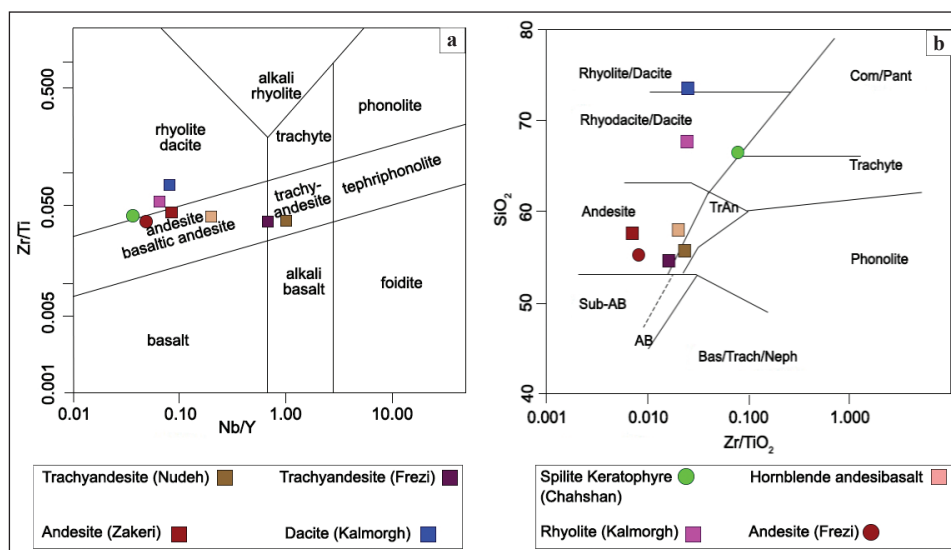
ترکیب شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه در نمودارهای Zr/Ti در برابر Nb/Y و Zr/TiO_2 در برابر SiO_2 از وینچستر و فلوید (Winchester and Floyd, 1977) دارای طیف ترکیبی از ریولیت‌ها تا بازالت‌های آلکان می‌باشند (شکل‌های ۶- a, b). موقعیت داده‌ها در این نمودارها، نشان دهنده بایمودال بودن سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه است. این گستره ترکیبی می‌تواند در اثر آلودگی و هضم پوسته قاره‌ای در طی بالا آمدن ماگمای مافیک در یک محیط کششی به وجود آمده باشد که سبب ایجاد سنگ‌های فلسیک تا حدواسط می‌شود (Pearce and Parkinson, 1996). این نمودارها، نام‌گذاری صحرایی و میکروسکوپی سنگ‌ها را تأیید می‌کنند.

۵- ژئوشیمی

سنگ‌های آتشفشانی، نیمه‌ژرف، آذرآواری و رسوبی به صورت گسترده در تاق‌دیس جنوب‌باختر سبزوار رخنمون دارند (شکل ۱- a). سنگ‌های آتشفشانی و نیمه‌ژرف به صورت گدازه و سیل در بین واحدهای آذرآواری و رسوبی رخنمون داشته و طیف ترکیبی گسترده‌ای از ریولیت، تراکی آندزیت، بازالت‌های بالشی، داسیت پورفیری و آلکالی الیون بازالت را شامل می‌شوند. تنها توده نیمه‌ژرف رخنمون یافته در منطقه، گابرو است که به صورت سیل و هم‌روند با امتداد کلی ناحیه در منطقه گسترش دارد (شکل ۲). بنابراین، سنگ‌های آذرین منطقه را می‌توان به سه دسته ولکانیکی، آذرآواری و نفوذی نیمه‌ژرف تقسیم نموده و ژئوشیمی سنگ‌های آتشفشانی و نیمه‌ژرف را به‌طور جداگانه مورد مطالعه قرار داد (جدول ۱).

شکل ۶- a) موقعیت سنگ‌های آتشفشانی منطقه جنوب‌باختر سبزوار در نمودار Nb/Y در برابر Zr/Ti از وینچستر و فلوید (Winchester and Floyd, 1977) (b) موقعیت سنگ‌های آتشفشانی منطقه جنوب‌باختر سبزوار در نمودار Zr/TiO_2 در برابر SiO_2 از وینچستر و فلوید (Winchester and Floyd, 1977).

Figure 6. a) The position of volcanic rocks of southwest Sabzevar region in Nb/Y vs. Zr/Ti diagram from Winchester and Floyd (1977). b) The position of the volcanic rocks of the southwestern Sabzevar area in the diagram of Zr/TiO_2 vs. SiO_2 from Winchester and Floyd (1977).



جدول ۱- عناصر اصلی، فرعی و کمیاب آنالیز XRF و ICP-MS سنگ‌های کرتاسه پسین در حوضه جنوب‌باختر سبزوار.

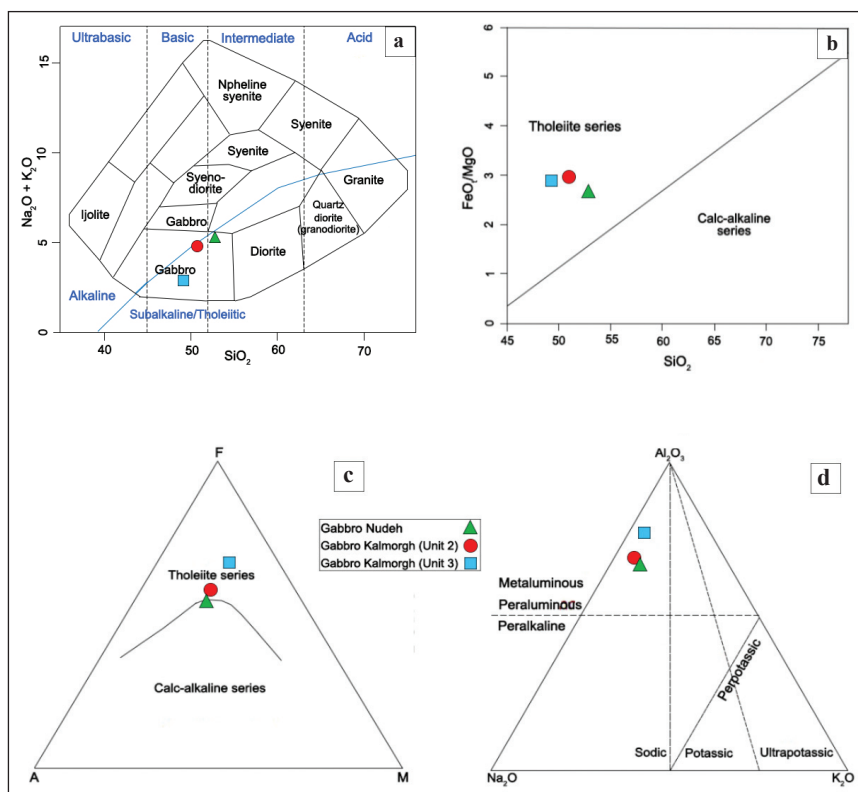
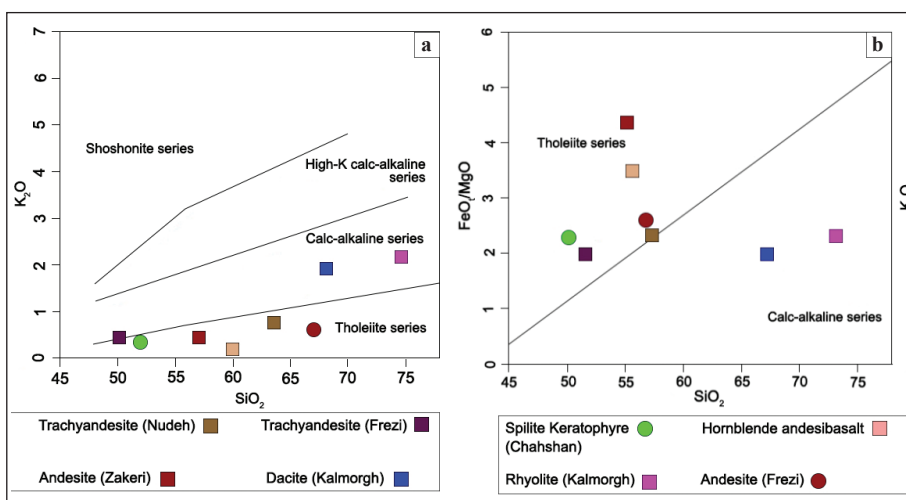
Table 1. Major, minor and rare elements of XRF and ICP-MS analysis of Late Cretaceous rocks in southwest Sabzevar basin.

Rocks	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)	TiO ₂ (%)	L.O.I	Zr (ppm)	Zn (ppm)	Yb (ppm)	Y (ppm)
Rhyolite	73.41	13.27	2.27	0.91	1.11	6.29	1.2	0.06	0.07	0.29	1.57	74.55	56.9	3.23	23.42
Trachyandesite	57.69	12.31	10.93	4.34	3.10	5.93	1.2	0.04	0.11	0.49	4.25	102.4	55.47	3.05	24.24
Spillite Kerathophyre	5.49	14.15	17	6.76	5.58	3.65	0.37	0.12	0.15	0.53	0.77	52.07	108.6	3.05	28.55
Dacite	67.56	14.84	3.58	1.8	2.54	4.99	0.97	0.16	0.07	0.36	2.27	89.11	82.20	4.34	35.70
Andesite	57.26	14.25	7.99	2.82	2.9	5.03	0.36	2.41	0.20	0.85	5.49	63.35	53.30	2.59	22.73
Trachyandesite	51.65	15.79	11.69	5.36	7.08	4.88	0.38	0.26	0.13	0.80	0.64	3.23	23.06	3.70	29.49
Gabbro (Nudeh)	49.15	15.88	13.92	4.31	9.41	2.34	0.82	0.21	0.17	1.08	3.13	29.31	107.8	1.82	16.47
Hornblende andesibsalt	55.65	17.86	8.7	2.28	6.03	3.58	1.27	0.12	0.13	0.36	3.32	57.63	65.59	1.32	10.18
Andesite	55.24	11.08	13.97	2.9	0.96	3.11	1.09	0.12	0.11	0.65	10.24	135.5	41.17	4.90	37064
Gabbro (Kalmorgh)	50.47	15.8	13.21	3.99	5.96	3.54	1.26	0.16	0.23	0.82	3.76	52.30	91.06	3.01	25.65
Gabbro (Kalmorgh)	52.61	15.03	11.75	4.03	6.59	3.46	1.76	0.18	0.10	0.78	3.82	36.77	58.17	2.05	17.15
Rocks	Tm (ppm)	Tl (ppm)	Th (ppm)	Tb (ppm)	Ta (ppm)	Sr (ppm)	Sn (ppm)	Sm (ppm)	Sc (ppm)	Sb (ppm)	Rh (ppm)	Rb (ppm)	Pr (ppm)	Pb (ppm)	Ni (ppm)
Rhyolite	0.47	0.06	0.74	0.55	0.14	45.72	0.28	2.41	13.21	0.36	-	7.39	1.60	3.95	3.63
Trachyandesite	0.45	0.12	2.64	0.7	0.19	164.5	-	3.70	11.08	0.16	-	27.27	3.47	1.21	1.68
Spillite Kerathophyre	0.46	0.03	0.41	0.66	0.07	22.16	-	2.55	22.08	0.33	-	2.05	1.52	3.61	1.97
Dacite	0.64	0.03	0.82	0.87	0.11	165.9	0.03	3.63	18.14	0.14	0.02	3.68	3.37	2.7	1.93
Andesite	0.37	0.2	1.41	0.58	0.07	46.86	-	2.71	24.08	0.43	-	0.88	2.13	1.05	3.66
Trachyandesite	0.52	0.01	1.52	0.68	0.08	88.73	-	3.15	19.09	0.72	0.02	1.01	2.33	1.99	5.99
Gabbro (Nudeh)	0.27	0.07	0.63	0.42	0.07	344.7	0.02	1.79	38.47	1.05	-	12.09	1.23	4.87	17.80
Hornblende andesibsalt	0.18	0.03	2.61	0.28	0.11	274.6	-	1.69	15.86	0.2	-	20.19	2.24	2.52	5.28
Andesite	0.69	0.04	1.61	0.94	0.15	63.12	0.05	3.90	8.34	0.25	0.03	23.05	2.87	1.37	5.74
Gabbro (Kalmorgh)	0.45	0.07	1.28	0.63	0.08	286.2	-	3.17	29.31	1.0	-	18.48	2.57	4.38	2.85
Gabbro (Kalmorgh)	0.29	0.06	0.28	0.40	0.05	276.3	0.02	1.49	36.32	0.2	-	14.22	0.87	1.93	12.88
Rocks	Lu (ppm)	Li (ppm)	La (ppm)	In (ppm)	Ho (ppm)	Hf (ppm)	Ge (ppm)	Gd (ppm)	Ga (ppm)	Eu (ppm)	Er (ppm)	Dy (ppm)	Cu (ppm)	Cs (ppm)	Cr (ppm)
Rhyolite	0.45	11.12	4.36	0.03	0.9	2.65	1.6	0.80	10.21	0.69	2.67	4.19	8.94	0.05	8.9
Trachyandesite	0.43	9.80	11.95	0.05	1.03	3.17	0.93	3.97	9.43	1.09	2.77	4.83	84.13	0.34	13.16
Spillite Kerathophyre	0.42	18.57	4.30	0.06	10.2	1.88	1.72	3.33	7.62	0.77	2.91	4.84	33.26	0.02	34.30
Dacite	0.59	5.44	6.23	0.09	1.29	3.19	1.47	4.31	14.34	1.19	3.91	6.25	64.72	0.07	8.71
Andesite	0.36	6.70	6.58	0.05	0.81	2.08	.065	3.03	9.85	0.85	2.32	4.02	368.1	0.05	4.88
Trachyandesite	0.50	7.05	6.94	0.09	1.06	3.02	1.33	3.7	11.28	0.77	3.18	5.02	176.1	0.02	8.78
Gabbro (Nudeh)	0.25	9.22	3.51	0.05	0.65	1.1	1.43	2.26	14.75	0.7	1.71	2.96	220.7	0.25	27.02
Hornblende andesibsalt	0.18	9.57	10.48	0.03	0.39	1.71	1.38	1.96	14.57	0.62	1.1	1.83	36.15	0.69	14.11
Andesite	0.66	12.96	8.82	0.06	1.48	4.73	1.36	4.68	10.71	0.83	4.36	7.08	10.70	0.05	20.31
Gabbro (Kalmorgh)	0.42	6.22	7.61	0.06	0.96	1.98	1.49	3.64	14.89	0.99	2.68	4.48	32.67	0.42	16.58
Gabbro (Kalmorgh)	0.27	7.17	2.10	0.05	0.61	1.25	1.74	2.05	13.91	0.57	1.79	2.92	15.4	0.15	12.73

میکروسکوپی می‌باشد. بر اساس نمودار یاد شده، ماهیت تولییتی بودن این سیل‌های نفوذی نیمه ژرف مشابه با سنگ‌های آتشفشانی منطقه می‌باشد (شکل ۸-ا). برای تعیین سری ماگمایی سیل‌های منطقه از نمودارهای مختلف استفاده شده است. نمودار سه‌تایی از AFM از ابروین و باراگار (Irvine and Baragar, 1971) و نمودار SiO_2 در برابر FeO/MgO از میاشیرو (Miyashiro, 1974) سیل‌های نیمه ژرف مافیک مانند سنگ‌های آتشفشانی، ماهیت تولییتی نشان می‌دهند (شکل ۸-ب و ج). مقدار Al_2O_3 - Na_2O - K_2O برای سیل‌های نیمه ژرف نشان می‌دهد که سنگ‌های یاد شده، مانند سنگ‌های آتشفشانی از نوع پرآلومینوس تا متآلومینوس می‌باشند (شکل ۸-د). تشابه شواهد یاد شده بین سیل‌های گابرویی و سنگ‌های آتشفشانی نشان‌دهنده هم‌منشأ بودن این سنگ‌های آذرین می‌باشد، به بیان دیگر، سنگ‌های نیمه‌ژرف مافیک معادل درونی سنگ‌های بازالتی موجود در منطقه می‌باشند.

شکل ۷-ا) موقعیت سنگ‌های آتشفشانی منطقه جنوب‌باختر سبزواری در نمودار Zr/TiO_2 در برابر SiO_2 از پکریلو و تیلور (Peccerillo and Taylor, 1976). موقعیت سنگ‌های آتشفشانی منطقه جنوب‌باختر سبزواری در نمودار FeO/MgO در برابر SiO_2 از میاشیرو (Miyashiro, 1974).

Figure 7. a) The position of the volcanic rocks of the southwestern region of Sabzevar in the diagram of Zr/TiO_2 vs. SiO_2 (Peccerillo and Taylor, 1976). b) The position of the volcanic rocks of the southwestern Sabzevar area in the FeO/MgO vs. SiO_2 diagram from Miyashiro (1974).



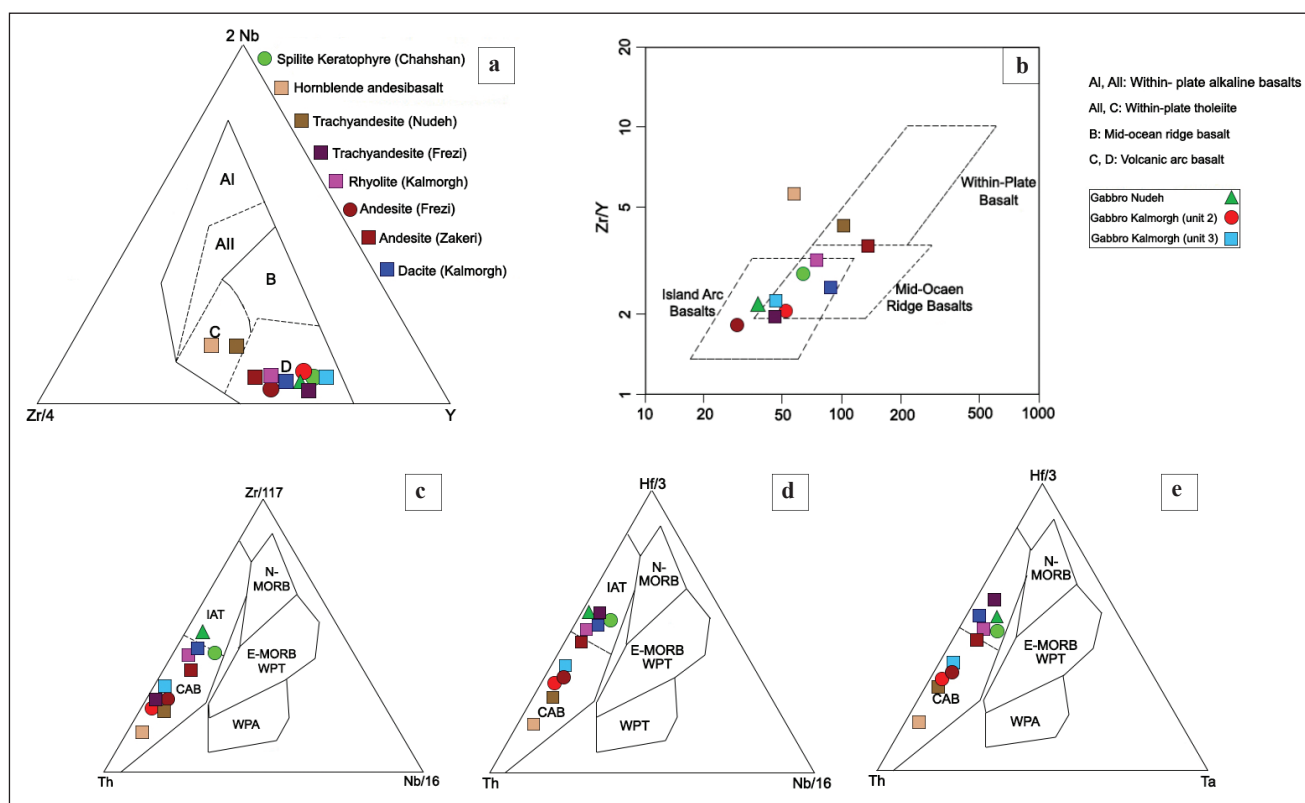
شکل ۸-ا) موقعیت سیل‌های گابرویی منطقه جنوب‌باختر سبزواری در نمودار $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ در برابر SiO_2 از کاکس و همکاران (Cox et al., 1979). (b, c) موقعیت نمونه‌های گابرویی منطقه جنوب‌باختر سبزواری در نمودارهای SiO_2 در برابر FeO/MgO و AFM که نشان دهنده ماهیت تولییتی این سنگ‌ها می‌باشد. (د) ماهیت متآلومینوس سیل‌های نیمه ژرف گابرویی.

Figure 8. a) The location of gabbro sill in southwest Sabzevar region in $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2 diagram (Cox et al., 1979). b, c) The position of gabbroic samples from southwest Sabzevar region in SiO_2 vs. FeO/MgO and AFM diagrams, which shows the tholeiitic nature of these rocks. d) Metaluminous nature of sub-volcanic gabbro sills.

۳-۵- تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ‌های آذرین

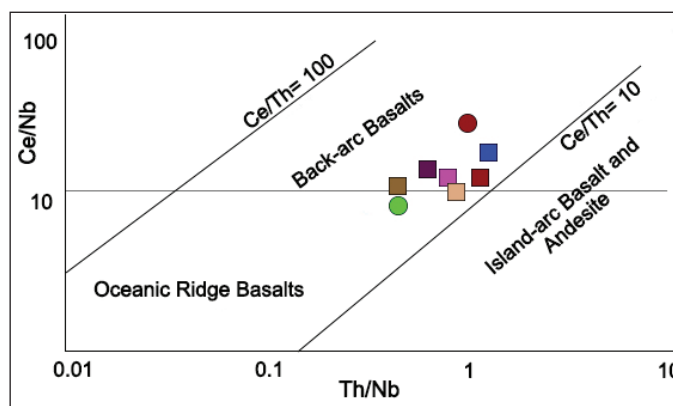
از آنجا که ارتباط خاصی بین شیمی عناصر اصلی و نادر با محیط زمین‌ساختی-ماگمایی سنگ‌ها وجود دارد، امروزه از نمودارهای ژئوشیمیایی برای تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ‌ها استفاده می‌شود. همان‌گونه که پیش‌تر عنوان شد، سنگ‌های منطقه دارای ترکیبی اسیدی تا بازیک با ویژگی تولیتی هستند. حجم اصلی سنگ‌ها را سنگ‌های بازالتی تا ریولیتی تشکیل می‌دهند (شکل ۹-۶). سنگ‌های آتشفشانی و سیل‌های گابرویی نیمه‌ژرف در نمودار سه تایی $Zr/4 - Y - 2Nb$ از مشید (Meschede, 1986) در محدوده بازالت‌های آتشفشانی قوسی (Volcanic arc basalts) (شکل ۹-۹) و در نمودار دو تایی Zr در برابر Zr/Y از پیرس (Pearce 1979) در محدوده بازالت‌های جزایر قوسی و بازالت‌های پشته‌های میان اقیانوسی قرار می‌گیرند (شکل ۹-۹). سنگ‌های آذرین توالی چینه‌شناسی جنوب‌باختر سبزوار در نمودار $TiO_2 - 10MnO - 10P_2O_5$ از مولن (Mullen, 1983) و نمودارهای $Hf/3 - Th - Ta$ و $Hf/3 - Th - Nb/16$ از وود (Wood, 1980) در محدوده بازالت‌های تولیتی جزایر قوسی (IAT) و بازالت‌های کالکوآلکالن (CAB) قرار می‌گیرند (شکل ۹-۹). بر اساس نظر پتر و اسکات (Peter and Scott, 1999) گدازه‌ها و سیل‌هایی

که در محدوده IAT و CAB قرار می‌گیرند، در حوضه‌های کششی نزدیک کمان‌های آتشفشانی تشکیل می‌شوند و از مذاب‌هایی حاصل می‌شوند که متأثر از پوسته اقیانوسی فرورونده می‌باشند. بنابراین، چنین محیط‌هایی، حوضه‌های کششی پشت قوسی (Back-arc) می‌باشند. از سوی دیگر، حضور سنگ‌های آلکالن در حوضه‌های اقیانوسی نشان می‌دهند که چنین سنگ‌های ولکانیکی در قاره‌هایی تشکیل می‌گردند که در مراحل اولیه از بازشدگی حوضه پشت قوسی قرار دارند (Peter and Scott, 1999). در نمودار دو تایی Th/Nb در برابر Ce/Nb از ساندروز و تارنی (Saunders and Tarney, 1991) سنگ‌های منطقه جنوب‌باختر سبزوار در محدوده حوضه‌های پشت قوسی قرار می‌گیرد (شکل ۱۰). بنابراین، با توجه به ماهیت بایمودال برخی از نمونه‌های سنگی و قرارگیری نمونه‌ها در محدوده حوضه‌های کششی پشت قوسی در نمودار دو تایی Th/Nb در برابر Ce/Nb (Saunders and Tarney, 1991) مشخص می‌گردد که توالی آتشفشانی-رسوبی جنوب‌باختر سبزوار در حوضه کششی پشت قوسی تشکیل گردیده است (شکل ۱۰). همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، نظریه عمومی در مورد ماگماتیسیم و رسوب‌گذاری در پهنه سبزوار نیز ایجاد محیط کششی و تشکیل یک ریف‌ت پشت قوسی در طی کرتاسه پسین می‌باشد (Rossetti et al., 2010; Agard et al., 2011).



شکل ۹- (a) موقعیت نمونه‌های آتشفشانی و سیل‌های گابرویی منطقه جنوب‌باختر سبزوار در نمودار سه تایی $Y - Zr/4 - 2Nb$ از مشید (Meschede, 1986). (b) موقعیت نمونه‌های آتشفشانی و سیل‌های گابرویی منطقه جنوب‌باختر سبزوار در نمودار دو تایی Zr در برابر Zr/Y از پیرس (Pearce, 1979). (c, d, e) نمودارهای سه تایی $Zr/117 - Th - Nb/16$ ، $Hf/3 - Th - Nb/16$ ، $Hf/3 - Th - Ta$ از وود (Wood, 1980). همه نمونه‌ها در محدوده بازالت‌های تولیتی جزایر قوسی (IAT) و بازالت‌های کالکوآلکالن (CAB) قرار می‌گیرند.

Figure 9. a) The location of volcanic samples and gabbro sill of southwest Sabzevar region in the $Y - Zr/4 - 2Nb$ ternary diagram from Meschede (1986). b) The position of volcanic samples and gabbro sill of southwest Sabzevar region in the binary diagram of Zr vs. Zr/Y from Pearce (1979). c, d, e) Ternary diagrams $Zr/117 - Th - Nb/16$, $Hf/3 - Th - Nb/16$, $Hf/3 - Th - Ta$ from Wood (1980). All samples fall within the range of island arc tholeiitic basalts (IAT) and calc-alkaline basalts (CAB).



شکل ۱۰- موقعیت نمونه‌های گابرویی و آتشفشانی توالی جنوب‌باختر سبزوار در نمودار دو تایی Th/Nb در برابر Ce/Nb از ساندروز و تارنی (Saunders and Tarney, 1991). همه نمونه‌ها در محدوده حوضه‌های پشت قوسی قرار می‌گیرند (راهنمای نمونه‌ها همانند شکل ۶).

Figure 10. The position of gabbroic and volcanic samples of southwest Sabzevar sequence in the binary diagram of Th/Nb versus Ce/Nb from Saunders and Tarney (1991). All samples are located in the range of back-arc basins (sample legend as in Figure 6).

الگوی عناصر کمیاب در سنگ‌های آتشفشانی منطبق بر الگوی BABB و IAT است (شکل ۱۲- b). این محیط‌های زمین‌ساختی (BABB و IAT) تهی‌شدگی در عناصر K, Pb, Th و غنی‌شدگی در عناصر Nb, Ta, La, Ce, Sr, Zr را نشان می‌دهند که این روند تغییر عناصر منطبق بر تغییر عناصر سنگ‌های آتشفشانی منطقه جنوب‌باختر سبزوار می‌باشد، الگوی REE به‌دست آمده از این سنگ‌های آتشفشانی نشان می‌دهد که الگوی تخت و کاملاً مسطح واحد یاد شده با ترکیبات تولیتی سازگار می‌باشد (شکل ۱۲- a).

۵-۶- الگوی REE در سیل‌های مافیک نیمه‌زرف

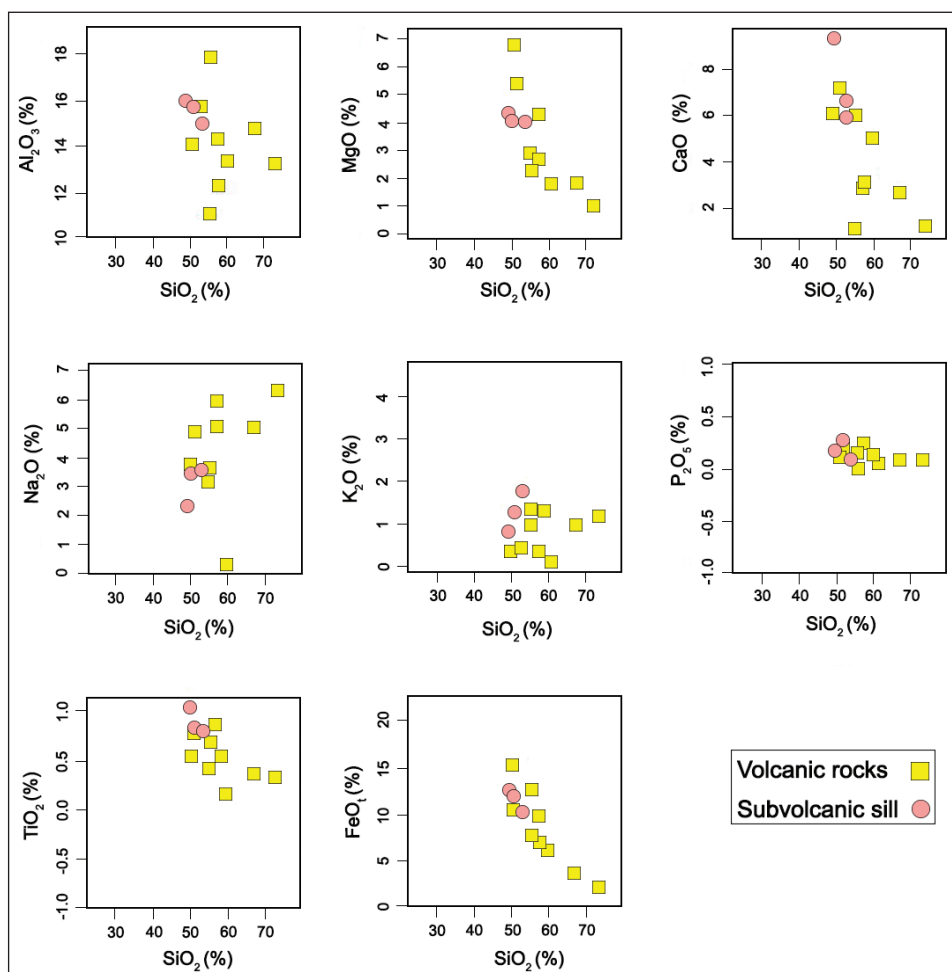
الگوی عناصر نادر خاکی و کمیاب سیل‌های گابرویی که نسبت به ترکیب گوشته اولیه و کندریت بهنجار شده‌اند، نشان‌دهنده تهی‌شدگی از عناصر HFSE مانند Nb, Th و غنی‌شدگی اندک U در سیل‌های نیمه زرف گابرویی می‌باشد (شکل ۱۳- a) حضور سنگ‌ها با مقدار Nb منفی از ویژگی‌های حوضه‌های BABB می‌باشد (Piercey, 2011). همچنین، این سنگ‌ها تهی‌شدگی از عناصر LILE مانند Ce و غنی‌شدگی اندکی از عناصر Sr و Ba را نشان می‌دهند (شکل ۱۳- a). الگوی عناصر نادر خاکی (REE) بهنجار شده نسبت به کندریت (Sun and McDonough, 1989) در سیل‌های گابرویی، نشان‌دهنده یک الگوی کاملاً مسطح منطبق بر ترکیبات تولیتی می‌باشد (شکل ۱۳- b). پیرسی (Piercey, 2011) بر این باور است که سنگ‌های با ماهیت تولیتی از عناصر HFSE تهی هستند. ولی سنگ‌هایی که با محیط‌های فلسیک پوسته قاره‌ای و سنگ رسوبی مرتبط می‌باشند، از لحاظ عناصر HFSE و REE غنی می‌باشند. بنابراین، غنی‌شدگی از عناصر K, Pb, Sr نشان‌دهنده آلودگی با پوسته قاره‌ای می‌باشد. ماگماتیسیم منطقه با توجه به مطالعات انجام شده از نوع تولیتی در جزیره قوسی تا کالک آلکالن در بخش‌های جنوبی است و با مهاجرت ماگماتیسیم به سمت شمال و شمال‌خاور حوضه و با گذشت زمان به ماگماتیسیم تماماً کالک آلکالن از نوع قوس حاشیه قاره‌ای تکامل یافته است (Kazemi et al., 2019).

۵-۴- ژئوشیمی عناصر اصلی

نمودارهای تغییرات اکسیدهای اصلی در برابر سیلیس (شکل ۱۱) نشان‌دهنده یک روند عادی در سنگ‌های منطقه بوده و بیانگر آن است که این گدازه‌ها و سیل‌ها هم‌منشأ می‌باشند. براساس این نمودارها، بیشتر اکسیدها با SiO_2 رابطه منفی نشان می‌دهند، به‌جز Na_2O و تا حدودی K_2O که با افزایش میزان سیلیس افزایش نشان می‌دهند. روند تغییرات Al_2O_3 و CaO مستقل از SiO_2 می‌باشد و این نشان از مصرف این دو عنصر در طی تبلور پلاژیوکلازها از ماگما می‌باشد که با ادامه تبلور، مقدار SiO_2 افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار SiO_2 مقدار MgO ، FeO ، TiO_2 کاهش می‌یابد که مربوط به تشکیل کانی‌های مگنتیت، اسفن و کلریت می‌باشد. با افزایش مقدار سیلیس مقدار P_2O_5 ثابت و نزدیک به صفر است که دلیل آن نبود کانی‌های فسفردار در سنگ‌های منطقه مورد مطالعه است (جدول ۱).

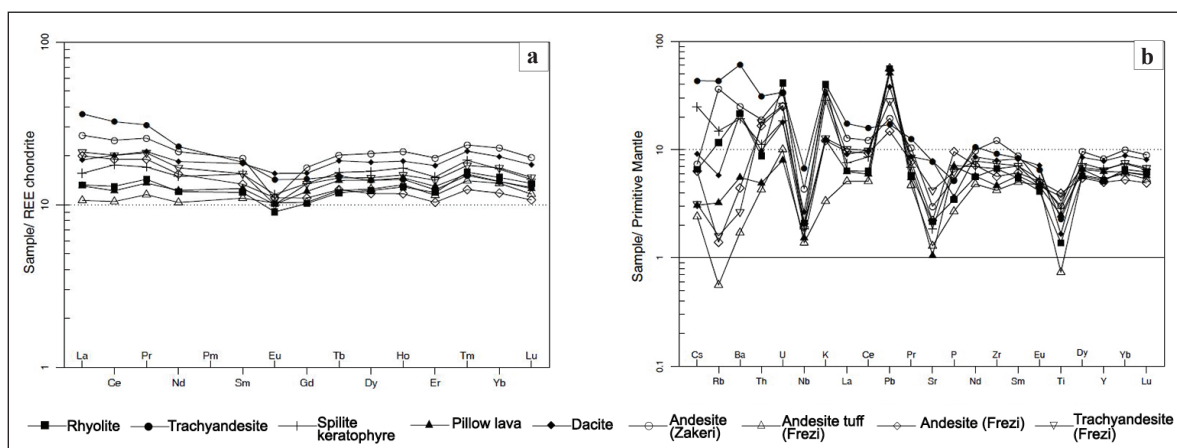
۵-۵- الگوی نمودارهای چند عنصری و REE در سنگ‌های آتشفشانی منطقه

الگوی عناصر نادر خاکی مربوط به سنگ‌های آتشفشانی دارای شیب یکنواخت با بی‌هنجاری منفی Nb, Sr, Rb, Ti می‌باشد (شکل ۱۲- b). تهی‌شدگی عناصر HFSE مانند Zr, Nb, Ti نشان‌دهنده تولید ماگما با درجه ذوب‌شدگی کم MORB می‌باشد. تهی‌شدگی Nb و Ti می‌تواند منعکس‌کننده حضور کانی‌های حاوی Ti باشد همچنین این تهی‌شدگی نشان‌دهنده تشکیل سنگ‌های آتشفشانی یاد شده در نزدیکی کمان‌های آتشفشانی است (Peter and Scott, 1999). بی‌هنجاری منفی Nb شاخص سنگ‌های قاره‌ای است و ممکن است نشان‌دهنده مشارکت پوسته در فرایندهای ماگمایی باشد (Rollinson, 1993). همچنین، الگوی REE به‌دست آمده از این سنگ‌های آتشفشانی که نسبت به کندریت متئوریتی استاندارد (Sun and McDonough, 1989) بهنجار شده است، نشان می‌دهد که الگوی تخت و کاملاً مسطح (شکل ۱۲- a) با بی‌هنجاری منفی Eu می‌باشد که این تهی‌شدگی از Eu ناشی از متبلور شدن پلاژیوکلازها می‌باشد (Peter and Scott, 1999).



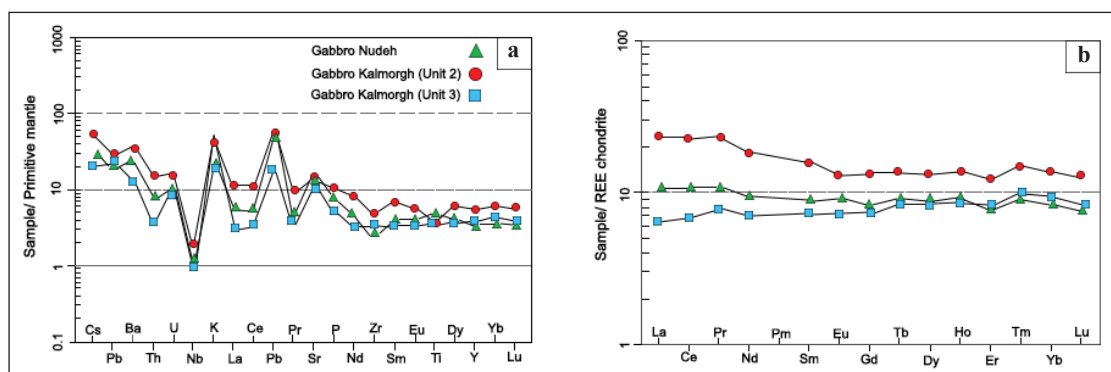
شکل ۱۱- روند عناصر در نمودارهای هارکر در نمونه‌های آتشفشانی و سیل‌های گابرویی منطقه مورد مطالعه.

Figure 11. Trend of elements in Harker diagrams of volcanic samples and gabbro sills.



شکل ۱۲- (a) نمودار عناصر نادر خاکی در سنگ‌های آتشفشانی توالی جنوب‌باختر سبزوار که به کندریت (Nakamura, 1974) بهنجار شده‌اند. (b) نمودار عناصر فرعی و کمیاب در سنگ‌های آتشفشانی توالی جنوب‌باختر سبزوار که به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) بهنجار شده‌اند.

Figure 12. a) Rare earth elements diagram in volcanic rocks of southwest Sabzevar sequence normalized to chondrite (Nakamura, 1974). b) Minor and trace elements chart in the volcanic rocks of southwest Sabzevar sequence normalized to primary mantle (Sun and McDonough, 1989).



شکل ۱۳- (a) نمودار عناصر فرعی و کمیاب در سیل‌های نیمه ژرف توالی جنوب‌باختر سبزوار که به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989) بهنجار شده‌اند. (b) نمودار عناصر نادر خاکی در سیل‌های مافیک نیمه ژرف توالی جنوب‌باختر سبزوار که به کندریت (Nakamura, 1974) بهنجار شده‌اند.

Figure 13. a) Trace and rare elements chart in the sub-volcanic sills of southwest Sabzevar sequence normalized to primary mantle (Sun and McDonough, 1989). b) Rare earth elements diagram in sub-volcanic mafic sills of southwest Sabzevar sequence normalized to chondrite (Nakamura, 1974).

۶- نتیجه‌گیری

بنابراین، با توجه به مطالعات سنگ‌شناسی و چینه‌نگاری انجام گرفته، توالی میزبان و سنگ‌های آتشفشانی همراه کانسارهای منگنز در منطقه جنوب‌باختر سبزوار را می‌توان از نوع بایمودال مافیک در نظر گرفت و مطالعات ژئوشیمیایی انجام گرفته بر روی واحدهای سنگی نیز تأیید کننده همین مطلب می‌باشد به‌طوری‌که در نمودارهای ژئوشیمیایی سنگ‌های آتشفشانی منطقه دارای طیف ترکیبی از بازالت تا ریولیت بوده و از نوع تولیتی می‌باشند که این نشان دهنده بایمودال بودن سنگ‌های آذرین منطقه جنوب‌باختر سبزوار است از سوی دیگر، نظر به این‌که بیشتر سنگ‌های گدازه‌ای دارای طیف مافیک می‌باشند، از این رو، ترکیب سنگ‌شناختی سنگ‌های این منطقه از نوع بایمودال مافیک خواهد بود. ماگمای والد تولیتی با ذوب بخشی از یک منبع تخلیه شده (نوع MORB یا منبع گوشته تهی‌شده)، که توسط جریان سیالات از اسلب (Slab) اقیانوسی آب‌زدایی شده نئوتیس متاسوماته شده، نشأت گرفته است. مطالعات ماگمایی و ماهیت ژئوشیمیایی سنگ‌های گابرویی نیمه ژرف منطقه به طور کامل منطبق بر ماهیت ژئوشیمیایی سنگ‌های آتشفشانی است که نشان‌دهنده هم‌منشأ بودن آنها می‌باشد و می‌توان چنین نتیجه گرفت که سنگ‌های آتشفشانی و سنگ‌های نیمه ژرف در یک محیط کشتی پشت قوسی تا قوسی تشکیل شده‌اند.

نظر به این‌که کانسارهای منگنز منطقه گفت و محمدآباد از نوع کانسارهای آتشفشان‌زاد می‌باشند (هاشم‌پور و همکاران، ۱۴۰۰) و این کانسارها در ارتباط با فعالیت‌های آتشفشانی منطقه تشکیل شده‌اند، از این رو، در این مقاله سعی گردید تا توالی چینه‌ای سنگ‌های میزبان و همراه کانسارهای منگنز و مس جنوب‌باختر سبزوار مورد مطالعه قرار گیرد. همان‌گونه که اشاره شد، توالی میزبان کانی‌زایی منگنز در منطقه جنوب‌باختر سبزوار از واحدهای سنگی رسوبی، آذرآواری، گدازه و نفوذی نیمه‌ژرف تشکیل شده است. توالی میزبان و سنگ‌های همراه در ستون چینه‌شناسی کانسارهای منطقه مورد مطالعه با حدود ۲۳۰۰ تا ۲۷۰۰ متر سترا حاوی حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد سنگ‌های رسوبی است که به طور عمده از نوع تخریبی و کربناتی است. سنگ‌های آذرین آتشفشانی و پلوتونیک کرتاسه پسین در جنوب‌باختر سبزوار شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های تراکی آندزیت، داسیت، ریولیت، گابرو، گابرو دیوریت، دیوریت و گرانیت می‌باشند که در توالی رسوبی کرتاسه پسین، به‌ویژه در لابه‌لای سنگ‌های آذرآواری دیده می‌شوند. سنگ‌های آتشفشانی و نیمه‌ژرف این توالی ماهیت بایمودال داشته و به‌طور عمده از نوع سنگ‌های آتشفشانی مافیک (حدوداً ۳۵ تا ۴۰ درصد) تشکیل شده است که با مقادیر کمی داسیت و ریولیت (حدوداً ۱۵ تا ۲۰ درصد) همراهی می‌شود.

کتابنگاری

- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران. وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- مغفوری، س.، ۱۳۹۱، زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژئز کانه‌زایی مس در توالی آتشفشانی رسوبی کرتاسه پسین در جنوب‌غرب سبزوار، با تاکید بر کانسار نوده، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، ۳۱۲ صفحه.
- مغفوری، س.، راستاد، ا.، موسیوند، ف.، ۱۳۹۳، جایگاه چینه‌ای، خاستگاه و ویژگی‌های افق‌های کانه‌زایی منگنز در توالی آتشفشانی- رسوبی کرتاسه پسین، جنوب- جنوب‌غرب سبزوار، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، ج. ۶، ش. ۲، ص. ۲۰۱ تا ۲۱۶.
- هاشم‌پور، ش. س.، مغفوری، س.، راستاد، ا.، ۱۴۰۰، زمین‌شناسی، رخساره‌های کانسنگی، ژئوشیمی و ژئز کانسارهای منگنز گف و محمدآباد در توالی آتشفشانی- رسوبی کرتاسه پسین، جنوب‌غرب سبزوار، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، ۲۶۲ صفحه.
- وحدتی دانشمند، ف. و سعیدی، ع.، ۱۳۷۷، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ دارین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B., and Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process, *Geol. Mag.*: page 1 of 34.
- Aghanabati, A., 2004. *Geology of Iran: Geological Survey of Iran 600. (in Persian)*.
- Alaminia, Z., Karimpour, M.H., Homam, M., and Finger, F., 2013. The magmatic record in the Arghash region (northeast Iran) and tectonic implications. *International Journal of Earth Sciences*, 102, 1603–1625.
- Barrier, E., and Vrielynck, B., 2008. Paleotectonic maps of the Middle East: Atlas of 14 maps. Middle East Basin Evolution (MEBE) Programme, CGMW, Paris, 1–14.
- Cox, K.G., Bell, B.G., and Pankhurst, R.J., 1979. The interpretation of igneous rocks. Unwin Hyman, London, and 450p.
- Galley, A.G., 2003. Composite synvolcanic intrusions associated with Precambrian VMS-related hydrothermal systems. *Miner. Depos.* 38, 443–473.
- Ghasemi, H., and Rezaei, M., 2015. Petrochemistry and tectonic setting of the Davarzan–Abbasabad Eocene Volcanic (DAEV) rocks, NE Iran. *Mineralogy and Petrology*, 109, 235–252.
- Hashempour, Sh., 2021. *Geology, ore faciess, geochemistry and genesis of the Gofit and Mohammadabad manganese deposits in the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence, SW Sabzevar. Unpublished M.Sc. thesis, University of Tarbiat Modares, Iran, p. 262 (in Persian with English abstract)*.
- Hosseini, M., Hassanzadeh, J., Alirezaei, S., Sun, W., and Li, Y., 2017. Age revision of the Neotethyan arc migration into the southeast Urumieh–Dokhtar belt of Iran: Geochemistry and U–Pb zircon geochronology. *Lithos*, 284–285, 296–309.
- Irvine, T.N., and Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 8, p.523–548.
- Jamshidi, K., Ghasemi, H., Troll, V.R., Sadeghian, M., and Dahren, B. 2015. Magma storage and plumbing of adakite-type post-ophiolite intrusions in the Sabzevar ophiolitic zone, northeast Iran. *Solid Earth*, 6, 49–72.
- Kazemi, Z., Ghasemi, H., Tilhac, R., Griffin, W., Shafaii Moghadam, H., O'Reilly, S., and Mousivand, F., 2019. Late Cretaceous subduction-related magmatism on the southern edge of Sabzevar basin, NE Iran. *Journal of the Geological Society*.
- Kuleshov, V.N., 2011. Manganese deposits: communication 2. Major epochs and phases of manganese accumulation in the earth's history. *Lithol. Min. Resour.* 46 (6), 546–565.
- Lindenberg, H.G., Gorler, K., and Ibbeken, H., 1983. Stratigraphy, structure and orogenetic evolution of the Sabzevar zone, the area of Oryan Khorasan, NE Iran. *Geological Survey of Iran, Report*, 51, 120–142.
- Maghfouri, S., 2012. *Geology, Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Cu Mineralization within Late Cretaceous Volcano-Sedimentary Sequence in Southwest of Sabzevar, with emphasis on the Nodeh Deposit. Unpublished M.Sc. thesis. University of Tarbiat Modares, Iran. p. 312 (in Persian with English abstract)*.
- Maghfouri, S., Mousivand, F., Rastad, E., and Lentz, D.R., 2021. Chemical composition of magnetite and chlorite from the stringer zone of the Nuddeh volcanogenic massive sulfide (VMS) deposit, Iran: geological implications; *Mineralogy and Petrology*; 115:241–256.
- Maghfouri, S., Rastad, A., and Mousivand, F., 2015. *Stratigraphic position, origin and characteristics of manganese mineralization horizons in the Late Cretaceous volcano-sedimentary sequence, south-southwest of Sabzevar. J. Econ. Geol. (Iran) 6, p. 2. (in Persian with English abstract)*.
- Maghfouri, S., Rastad, A., Mousivand, F., Lin, Y., and Zaw, Kh., 2016. Geology, ore facies and sulfur isotopes geochemistry of the Nuddeh Besshi-type volcanogenic massive sulfide deposit, southwest Sabzevar basin. *Iran. J. Asian Earth Sci.* 125, 1–21.
- Maghfouri, S., Rastad, E., Lentz, D.R., Mousivand, F., and Choulet, F., 2018. Mineralogy, microchemistry and fluid inclusion studies of the Besshi-type Nuddeh Cu–Zn VMS deposit. *Iran. Chemie der Erde* 78, 40–57.
- Maghfouri, S., Rastad, E., Mousivand, F., Choulet, F., and Lin, Y., 2017. Geological and geochemical constraints on the Cheshmeh-Frezi volcanogenic stratiform manganese deposit, southwest Sabzevar basin, Iran. *Ore Geology Reviews* 89, 96–113.

- Maghfouri, S., Rastad, E., Movahednia, M., Lentz, D.R., Hosseinzadeh, M.R., Yed, L., and Mousivand, F., 2019. Metallogeny and temporal-spatial distribution of manganese mineralizations in Iran: Implications for future exploration. *Ore Geology Reviews* 115.
- Masoudi, M., 2008. *Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of Benesboud Mn deposit in the southwest Sabzevar. M.Sc. Thesis. Tehran Islamic Azad University, Iran, 100 pp. (in Persian with English abstract).*
- Mcphie, J., Doyle, M., and Allen, R., 1993. Volcanic textures: A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks, National Library of Australia Cataloguing-in-Publication entry.
- Meschede, M., 1986. A method of discriminating between different type of mid ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb- Zr- Y diagram. *Chem. Geol.*, 56, 207- 218.
- Miyashiro, A., 1974. Nature of alkalic volcanic series. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 66:91-110.
- Moghadam, H.S., Corfu, F., Chiaradia, M., Stern, R.J., and Ghorbani, G., 2014. Sabzevar Ophiolite, NE Iran: Progress from embryonic oceanic lithosphere into magmatic arc constrained by new isotopic and geochemical data. *Lithos*, 210–211, 224–241.
- Moghadam, H.S., Rossetti, F., Lucci, F., Chiaradia, M., Gerdes, A., Lopez Martinez, M., Ghorbani, Gh., Nasrabady, M., 2016. The calc-alkaline and adakitic volcanism of the Sabzevar structural zone (NE Iran): implications for the Eocene magmatic flare-up in Central Iran. *Lithos*, 248-251, 517–535. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.01.019>
- Mullen, E.D., 1983. MnO/ TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters* 62, 53- 62.
- Nakagawa, M., Santosh, M., and Maruyama, S., 2009. Distribution and mineral assemblages of bedded manganese deposits in Shikoku, Southwest Japan: implications for accretion tectonics. *Gondwana Res.* 16, 609–621.
- Nakamura, N., 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 38, 757–775.
- Nasrollahi, A., Moosivand, F., and Ghasemi, H.A., 2013. Geochemical studies of primary, rare and rare earth elements (REE) and the origin of Nuddeh manganese deposit, southwest of Sabzevar. 17th conference of the Geological Society of Iran.
- Nicholson, K., 1992. Contrasting mineralogical-geochemical signatures of manganese oxides' guides to metallogenesis. *Econ. Geol.* 87, 1253–1264.
- Omrani, H., Moazzen, M., Oberhansli, R., Altenberger, U., and Lange, M. 2013. The Sabzevar blueschists of the North-Central Iranian micro-continent as remnants of the Neotethys-related oceanic crust subduction. *International Journal of Earth Sciences*, 102, 1491–1512.
- Pearce, J.A., 1979. The role of subcontinental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. In *Continental basalts and mantle xenoliths*, C.J. Hawksworth & M.J. Norry (Eds.). 230-249.
- Pearce, J.A., and Parkinson, I.J., 1996. Trace element models for mantle melting: application to volcanic arc petrogenesis. In: Prichard, H.M., Albaster, T., Harris, N.B.W., Neary, C.R. (eds.), *Magmatic Processes in Plate Tectonics*, 76, Geological Society of London Special Publication, 373-403.
- Peccerillo, A., and Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58:63-81.
- Peter, J.M., and Scott, S.D., 1999. Windy Craggy, Northwestern British Columbia: the world largest Besshi- type deposit in Barrie, Society of Economic Geologists, V.8.
- Piercey, S., 2011. The setting, style, and role of magmatism in the formation of volcanogenic massive sulfide deposits, *Miner Deposita*, 46:449–471.
- Polgári, M., Hein, J.R., Vigh, T., Szabó-Drubina, M., Fórizs, I., Bíró, L., Müller, A., and Tóth, A.L., 2012. Microbial processes and the origin of the Úrkút manganese deposit, Hungary. *Ore Geol. Rev.* 47, 87–109.
- Reagan, M.K., and Gill, J.B., 1989. Co-existing calc-alkaline and high niobium basalts from Turrialba volcano, Costa Rica: implication for residual titanites in arc magma source, *Journal of Geophysical Research* 94: 4619-4633.
- Rollinson, H. R., 1993. *Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation*. London, UK. 652 P.
- Rossetti, F., Nasrabady, M., Vignaroli, G., Theye, T., Gerdes, A., Razavi, M., and Moin Vaziri, H., 2010. Early Cretaceous migmatitic mafic granulites from the Sabzevar range (NE Iran): implications for the closure of the Mesozoic peri-Tethyan oceans in central Iran. *Terra Nova*, v 22, pp 26-34.
- Roy, S., 1992. Environment and processes of manganese deposition. *Econ. Geol.* 87, 1218–1236.
- Sasmaz, A., Turkyilmaz, B., Ozturk, N., Yavuz, F., and Kumral, M., 2014. Geology and geochemistry of Middle Eocene Maden complex ferromanganese deposits from the Elazığ-Malatya region, eastern Turkey. *Ore Geol. Rev.* 56, 352–372.
- Saunders, A.D., and Tarney, J., 1991. Back arc basins. In: Floyd, P.A. (Eds), *Oceanic Basalts*, Blackie and son Ltd., 219- 263.
- Shah, M.T., and Khan, A., 1999. Geochemistry and origin of Mn-deposits in the Waziristan ophiolite complex, north Waziristan, Pakistan. *Miner. Deposita* 34, 697–704.
- Shojaat, B., Hassanipak, A.A., Mobasher, K., and Ghazi, A.M., 2003. Petrology, geochemistry and tectonics of the Sabzevar ophiolite, North Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21, 1053–1067.

- Spies, O., Lensch, G., Mihm, A., 1983. Geochemistry of the post-ophiolitic Tertiary volcanics between Sabzevar and Quchan (NW Iran). Geodynamic project (Geotraverse) in Iran. Geological Survey of Iran, Report, 51, 264-289.
- Sun, S.S., and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes, in Saunders, A.D., and Norry, M.J., eds., Magmatism in the oceanic basins: Geological Society of London Spec. Pub. 42, p. 313-345.
- Taghizadeh, S., 2015. *Mineralogy, geochemistry and genesis of the Zakeri Mn deposit, Southwest of Sabzevar. Unpublished M.Sc. Thesis, University of Shahrud, Iran. p. 202 (in Persian with English abstract).*
- Winchester, J., and Floyd, P., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their diffraction products using immobile elements. Chemical geology. V. 20, p. 325- 343.
- Wood, D.A., 1980. The application of a Th- Hf- Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. Earth and planetary Science Letters 50, 11- 30.