



<https://jssr.ui.ac.ir/?lang=en>

Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches University of Isfahan
E-ISSN: 2423-8007
Vol. 37, Issue 4, No. 85, Winter 2022, pp 135-162
Received: 28.04.2021 Accepted: 27.10.2021

Research Paper

Geochemical investigations of the Sangestan Formation, west of Yazd: using multivariate analysis to identify sediment source, sedimentary environment, and palaeoclimate conditions

Somaie Abbaszadeh

Ph.D. student, Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
abbaszadeh115@yahoo.com

Seyed Hossein Mojtahedzadeh *

Associate Professor, Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
hmojtahed@yazd.ac.ir

Abdolhamid Ansari

Associate Professor, Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
h.ansari@yazd.ac.ir

Kazem Mirdehghan

Master of Science, Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
k.mirdehghan@staff.yazd.ac.ir

Abstract

The Early Cretaceous succession in the southern part of Yazd Block begins with terrestrial sediments of the Sangestan Formation. Little attention has been paid to this formation and most studies have focused on its lithostratigraphy. In this study, some geochemical studies have been performed on this formation. Twenty seven siliciclastic samples were taken from the Sangestan Formation in two sections of Bidakhvid and Alavi Mountain in order to identify the type of siliciclastic sediments, the nature of the sediments, and palaeoclimate conditions. Mineralogical studies and modal analysis showed that the siliciclastic sediments have been classified as sandstone (arkose) and siltstone. The results of factor and cluster analysis depicted that the chemical composition of siliciclastic sediments is different in the study areas. Based on multivariate analysis, siltstones that have high positive values of Zr, V, U, Sc, Sr, REE, MgO, Fe₂O₃, TiO₂, and CaO elements are related to cement, while sandstones showed high positive values for K₂O, Na₂O, SiO₂, Al₂O₃ elements. The results showed that siltstone sediments have more calcite and iron cement than the sandstone samples. By studying the variations of these elements versus the profile of the Sangestan Formation, it was observed that the elements related to rock cement are concentrated in siltstones due to the increasing depth of the sedimentary basin or more extension related to rift event, and the entrance of new elements into the basin. Also, the results of weathering indices depicted that both rocks have been formed in the same climate conditions which is consistent with the palaeogeography of Yazd Block during the Early Cretaceous.

Keywords: Sangestan Formation, Yazd Block, Geochemistry, multivariate analysis, sedimentary environment, weathering index

Introduction

The Sangestan and Taft formations dating back to the Early Cretaceous were deposited in many locations of Yazd Block which is located in the western part of the Central-East Iranian Microcontinent.

In general, most studies have focused on the Taft Formation because it hosts lead and zinc deposits such as

Mahdiabad, Farahabad, Mansourabad, etc. (Mojtahedzadeh 2002; Maghfouri and Hosseinzadeh 2018; Maghfouri et al. 2019; Maghfouri et al. 2020). On the other hand, a few studies have been performed on the Sangestan Formation focusing on its stratigraphy and paleontology. Until now, the geochemistry of Sangestan sediments and their sedimentary environment have not been paid attention to.

*Corresponding author

Abbaszadeh S., Mojtahedzadeh S., Ansari A., & Mirdehghan, K. (2021). Geochemical investigations of the Sangestan Formation, west of Yazd: using multivariate analysis to identify sediment source, sedimentary environment, and palaeoclimate conditions. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 37(4), 135-162.



2423-8007 / © 2022

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



<http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.128346.1204>



<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.4.6.8>

The use of major, trace, and rare earth elements of siliciclastic sediments is very common in sedimentary geochemistry studies used by researchers to identify various purposes, including the tectonic setting, palaeoweathering conditions of the source area, and the nature of the source rock (Shadan and Hosseini-Barzi 2013; Wang et al. 2013; Nowrouzi et al. 2014; Salehi et al. 2014; Zaid et al. 2015; Moallemi et al. 2017; Okon et al. 2017; Periasamy and Venkateshwarlu 2017; Somasekhar et al. 2018; Abubakar et al. 2019; Etesampour et al. 2019; Sci et al. 2019; Xu et al. 2019).

Multivariate statistical methods have been utilized to determine the relationship between several elements and the nature of sediments; something impossible by univariate statistical analysis. Despite the advantage of multivariate statistical methods, they have not been paid considered in siliciclastic geochemistry and they have been used only in a few studies.

The main purpose of this study is to evaluate the composition and petrography of siliciclastic rocks of the Sangestan Formation, the relationship between the composition of the sediments and the deepening of the sedimentary basin, the relation between the nature of the sediments and the major and trace elements by multivariate analysis, and the climate conditions in Yazd Block during the Early Cretaceous.

Material & Methods

After field observation, sampling was performed from the Sangestan Formation at the Bidakhavid and Alavi Mountain sections. Seventeen samples (nine siltstone and eight sandstone samples) from Alavi Mountain and 10 samples (three siltstone and seven sandstone samples) were collected from Bidakhavid.

Sixteen thin sections from siliciclastic samples were studied petrographically by the Olympus model polarizing microscope. The point counting of more than 500 points per thin section was performed on twelve sandstone samples by the Gazzi-Dickinson method.

Twenty-seven samples of siliciclastic rocks of the Sangestan Formation were selected for geochemical objectives. The preparation steps of the samples which include the cutting of the samples in order to obtain an un-weathered surface, crushing, and grinding to achieve the particle sizes under 200 mesh were performed at Yazd University. Then, the representative samples were analyzed by Zarazma Mineral Studies Company (Iranian company). To determine the major oxide elements, the samples were fused by lithium metaborate and dissolved in dilute nitric acid and, finally, determined by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES). An ICP-OES 735 instrument in Australia was used to analyze the samples. Moreover, the rare earth elements (REE) and other trace elements were determined by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS). The instrument used was an ICP-MS Agilent series HP 4500 in the United States.

SPSS and GCDkit software were used to carry out multivariate statistical studies and to plot ternary diagrams,

respectively. In addition, Rockwork 14 software was used to draw the stratigraphic column.

Discussion of Results & Conclusions

The preliminary study of thin sections showed that the siliciclastic samples of the Sangestan Formation include sandstone and siltstone in the two studied sections. Sandstone samples are often medium-grained, with a small percentage of coarse-grained, moderately rounded and immature. Modal analysis was performed on sandstone samples for more detailed studies. The main constituents are quartz grains (56% and rock fragments (less than 1%), as well as feldspar (25%).

Siltstone samples are similarly composed of quartz, feldspar, and rock fragments. They have about 52% quartz, most of which is monocrystalline, and only less than 1% is polycrystalline quartz. The amount of feldspar is less than sandstone samples and they constitute about 16% of the rock volume. Similar to the sandstone samples, a few rock fragments were observed in siltstone samples.

Furthermore, on the basis of the classification of Folk (1980), sandstone samples of the Sangestan Formation showed arkosic composition. This result was validated by geochemical data confirmed by the geochemical classification of Herron (1988).

In factor analysis, the positive and large factor loadings demonstrate a significant correlation between the variable and corresponding factor in the matrix. The results of factor analysis identified two first factors which discriminated the elements associated with the main constituents of siliciclastic sediments and those related to the cement of siliciclastic sediments.

For example, factor 1 showed positive factor loadings with Zr, V, U, Sc, Sr, REE MgO, Fe₂O₃, TiO₂, CaO and negative factor loading with Cr, Na₂O, SiO₂, and Al₂O₃. This factor depicted that the cement of rocks was formed from carbonate, iron oxide, and so on whereas the main constituents of siliciclastic samples were formed from elements such as Na₂O, SiO₂, and Al₂O₃. Furthermore, the results of the hierarchical cluster analysis shown in the dendrogram confirmed those of factor analysis.

In order to evaluate the changes of these groups of elements, they were plotted along the sedimentary log. The results showed that the elements which are associated with the framework constituents of siliciclastic samples are more in sandstone rocks than siltstone rocks. Conversely, the elements related to the cement of siliciclastic sediments are more in siltstones than sandstone rocks. Thus, it can be interpreted that the time of siltstone deposition was probably accompanied by an increase in the depth of the basin and the presence of more cement in the basin. Finally, the results of (A-CN-K) Al₂O₃-(CaO*+Na₂O)-K₂O ternary diagram and diagram which was proposed by Suttner and Dutta (1986) depicted that these sediments have been deposited in arid to semi-arid climatic conditions.



مقاله پژوهشی

بررسی اختصاصات ژئوشیمیایی رخساره‌های سنگی سازند سنگستان در غرب استان یزد با استفاده از آنالیز چندمتغیره به منظور تعیین منشأ رسوبات، روند تغییرات عناصر در محیط رسوبی و شرایط آب‌وهوایی

سمیه عباس‌زاده، دانشجوی دکتری گروه اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

abbaszadeh115@yahoo.com

سید حسین مجتهدزاده^{id*}، دانشیار گروه مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

hmojtahed@yazd.ac.ir

عبدالحمید انصاری، دانشیار گروه اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

h.ansari@yazd.ac.ir

کاظم میردهقان، کارشناس ارشد گروه اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

k.mirdehghan@staff.yazd.ac.ir

چکیده

توالی کرتاسه پیشین در حوضه جنوب یزد، با رسوبات تخریبی سازند سنگستان آغاز می‌شود که ناهمواری‌های گرانیت شبرکوه و یا سازند شمشک را در حوضه جنوب یزد می‌پوشاند. تاکنون توجه چندانی به ژئوشیمی سازند سنگستان نشده و بیشتر مطالعات، بر چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی توصیفی آن متمرکز بوده است. در این تحقیق، مطالعات ژئوشیمی روی این سازند انجام شد. به منظور شناسایی دقیق جنس رسوبات سیلیسی آواری این سازند، منشأ رسوبات و شرایط آب‌وهوایی در زمان تشکیل این سازند، پس از بازدید صحرایی، ۲۷ نمونه سیلیسی آواری از سازند سنگستان و از دو برش بیداخوید و کوه علوی، در غرب استان یزد برداشت شد. مطالعات مقاطع نازک و آنالیز دانه‌شماری نشان داد که نمونه‌های مورد مطالعه از نوع ماسه‌سنگ آرکوزی و سیلتستون است. برای انجام مطالعات ژئوشیمیایی از آنالیز فاکتوری و خوشه‌ای استفاده شد که به خوبی ماسه‌سنگ‌ها را از سیلتستون‌ها تفکیک کرده است و نشان داد که این دو نوع سنگ در این منطقه، از لحاظ ترکیب شیمیایی عناصر کمیاب نیز متفاوت است. علاوه بر آن، براساس آنالیزهای چندمتغیره در سیلتستون‌ها، عناصر Zr, V, U, Sc, Sr, MgO, Fe₂O₃, TiO₂, CaO, REE مقادیر مثبت بالایی دارد و در سیمان سیلتستون‌ها متمرکز است. ماسه‌سنگ‌ها مقادیر مثبت بالایی از عناصر K₂O, Na₂O, SiO₂, Al₂O₃ را نشان داده است که این عناصر، اجزای اصلی ماسه‌سنگ‌ها را تشکیل می‌دهد. نتایج نشان داد سیلتستون‌ها مقادیر بیشتری سیمان آهکی و آهن نسبت به ماسه‌سنگ‌ها دارد که در تطابق با مطالعات پتروگرافی است. با مطالعه تغییرات این عناصر نسبت به عمق سازند سنگستان مشاهده شد عناصر مرتبط با سیمان سنگ، بیشتر در سیلتستون‌ها و در قسمت عمیق‌تر حوضه تشکیل شده است که به علت بازشدگی بیشتر آن در اثر پدیده تشکیل ریفت، افزایش عمق حوضه رسوبی، ورود عناصر جدید به حوضه و فعالیت‌های شیمیایی بیشتر است. همچنین، نتایج شاخص‌های هوازدگی نشان داد که هر دو نوع سنگ در شرایط آب‌وهوایی یکسان (خشک گرمسیری) تشکیل شده است که با نتایج جغرافیای قدیمی بلوک یزد در زمان کرتاسه در تطابق است.

واژه‌های کلیدی: سازند سنگستان، مطالعات کانی‌شناسی، آنالیز چندمتغیره، محیط رسوبی، شاخص هوازدگی

* نویسنده مسئول

عباس‌زاده، س.؛ مجتهدزاده، ح.؛ انصاری، ع. و میردهقان، ک. (۱۴۰۰). بررسی اختصاصات ژئوشیمیایی رخساره‌های سنگی سازند سنگستان در غرب استان یزد با استفاده از آنالیز چندمتغیره به منظور تعیین منشأ رسوبات، روند تغییرات عناصر در محیط رسوبی و شرایط آب‌وهوایی، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۳۷(۴): ۱۳۵-۱۶۲.



مقدمه

کربناته برای رسوبات کرتاسه پیشین در نظر گرفته شد (Safaei et al. 2020).

استفاده از ژئوشیمی عناصر اصلی و کمیاب رسوبات آواری، امری بسیار رایج در مطالعات ژئوشیمی رسوبی است که محققان برای اهداف مختلف از آن استفاده کرده‌اند که از آن جمله، می‌توان به جایگاه تکتونیکی و شرایط آب و هوایی قدیمی ناحیه منشأ و ماهیت سنگ منشأ اشاره کرد (Shadan and Hosseini-Barzi 2013; Wang et al. 2013; Nowrouzi et al. 2014; Salehi et al. 2014; Zaid et al. 2015; Moallemi et al. 2017; Okon et al. 2017; Periasamy and Venkateshwarlu 2017; Somasekhar et al. 2018; Abubakar et al. 2019; Etesampour et al. 2019; Sci et al. 2019; Xu et al. 2019 علاوه بر آن، از ژئوشیمی رسوبی به منظور شناسایی محیط ته‌نشست رسوبات، جورشدگی هیدرولیکی آن‌ها و درجهٔ مچوریتی رسوبات استفاده شده است (Armstrong-Altrin et al. 2015; Zand-Moghadam et al. 2018; Haruna and Ojo 2019; Khan et al. 2019; Patra and Shukla 2020). در روش‌های آماری چندمتغیره می‌توان به منشأ رسوبات مختلف پی برد و همچنین، ارتباط بین چندین عنصر را باهم مشخص کرد که چنین امری در آنالیزهای تک‌متغیره امکان‌پذیر نیست. باوجود مزیت‌های این روش‌ها، به استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره برای مطالعهٔ رسوبات سیلیسی آواری با استفاده از داده‌ای ژئوشیمی، تاکنون چندان توجه نشده و تعداد محدودی مطالعه با استفاده از این روش‌ها انجام شده است (Ohta 2004; Zaid and Al Gahtani 2015; Haque and Roy 2020).

در این پژوهش، براساس یافته‌های به‌دست‌آمده از ویژگی‌های صحرایی، کانی‌شناسی و مطالعات ژئوشیمی رسوبات سیلیسی آواری سازند سنگستان، تلاش شده است جنس دقیق رسوبات و نحوهٔ ارتباط آن‌ها با عمیق‌شدن حوضهٔ رسوبی مشخص شود. همچنین سعی شده است با استفاده از آنالیز چندمتغیره، ارتباط بین عناصر و منشأ رسوبات شناسایی شود و در پایان با استفاده از داده‌های ژئوشیمی، تلاش شده شرایط آب و هوایی در زمان کرتاسه پیشین در بلوک یزد مشخص شود.

گفتنی است در بین سازند سنگستان، یک لایه گدازهٔ بازالتی (و در بعضی جاها دو لایه گدازه) با ضخامت قابل توجه نیز وجود دارد که در منطقهٔ غرب بلوک یزد گسترش بیشتری

خرده‌قارهٔ ایران مرکزی، شامل سه بلوک لوت، طبس و یزد است که بلوک یزد در قسمت غربی آن قرار دارد (Alavi 1991). این بلوک از غرب با گسل دهشیر-بافت و از شرق با بلوک پشت بادام و گسل انار محدود شده است (شکل ۱). دو سازند سنگستان و تفت، متعلق به کرتاسهٔ زیرین در این بلوک، گسترش چشمگیری دارند. سازند سنگستان برای اولین بار در نقشهٔ چهارگوش یزد به این عنوان نام‌گذاری شده است (Nabavi 1972). چینه‌شناسی و بیواستراتی گرافی مقطع تیپ آن، در منطقهٔ خارکوه، ۳۵ کیلومتری جنوب شرقی روستای علی‌آباد قرار داشته که به‌طورکامل مطالعه شده است (Azar and Aboutorab 1981). به‌طورکلی مطالعات انجام‌شده دربارهٔ رسوبات کرتاسه پیشین، در حوضهٔ جنوب یزد بر سازند تفت متمرکز بوده است؛ زیرا میزان ذخایر بزرگ سرب و روی، مانند مهدی‌آباد، فرح‌آباد، منصورآباد و ... است (Mojtahedzadeh 2002; Maghfouri and Hosseinzadeh 2018; Maghfouri et al. 2019; Maghfouri et al. 2020). در مقابل، دربارهٔ سازند سنگستان مطالعات چندانی صورت نگرفته است. یادآوری می‌شود بیشتر این مطالعات بر چینه‌شناسی و دیرینه‌شناسی رسوبات کرتاسه پیشین متمرکز بوده و در آن‌ها کمتر به ژئوشیمی و بررسی محیط رسوبی پرداخته شده است. چینه‌شناسی کرتاسهٔ زیرین در نواحی غرب و جنوب غرب یزد را (Khosro Tehrani and Vaziri Moghadam 1993) بررسی کرد. براساس مطالعهٔ آن‌ها، مقاطع چینه‌شناسی کوه تهر و کوه معین‌آباد از سازندهای سنگستان و تفت به سن کرتاسهٔ پیشین، از لحاظ ضخامت و تا حدودی لیتولوژی با هم تفاوت دارند. براساس مطالعهٔ (Wilmsen et al. 2015)، سازند سنگستان که در شش مقطع مختلف مطالعه شده، از رسوبات سیلیسی آواری (کنگولومرا، ماسه‌سنگ و سیلتستون) تشکیل شده است. علاوه بر آن، محیط تشکیل این سازند، مخروط افکنه، رودخانه‌های مارپیچ و محیط دریایی محدودشده، تشخیص داده شد. در مطالعه‌های دیگر، سازند سنگستان به‌همراه دیگر سازندهای کرتاسه پیشین، در حوضهٔ جنوب یزد از نظر چینه‌شناسی و دیرینه‌شناسی بررسی و مدل پلتفرم

سازند تفت با ترکیب سنگ آهک اوریتالین دار به صورت تدریجی روی سازند سنگستان قرار گرفته است. سنگ‌های تشکیل شده در آب‌های عمیق، سازند دره زنجیر بالاترین قسمت توالی کرتاسه پیشین را تشکیل داده است که به‌طوردیگر، شیب سازند تفت را می‌پوشاند (Wilmsen et al. 2015). این سنگ‌ها از سنگ‌آهک اسپیکولیتی و مارن‌های آب‌های عمیق تشکیل شده و شامل آمونیت‌های فراوانی است (Ghorbani 2019).

توالی کرتاسه پیشین، در مناطق بیداخوید و کوه علوی، شامل سازندهای سنگستان و تفت است. سازند سنگستان در برش‌های مورد مطالعه با ناپیوستگی آذرین پی، بر روی گرانیت شیرکوه قرار گرفته است. نتایج برداشت زمین‌شناسی نشان داد که ضخامت این سازند در برش بیداخوید حدود ۱۳۰۵ متر و در برش کوه علوی حدود ۱۳۴۲ متر است. همان‌طور که در ستون چینه‌شناسی، برش‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شود (شکل ۲)، سازند سنگستان با کنگلومرا آغاز می‌شود و با ماسه‌سنگ‌های درشت‌دانه و ریزدانه با رنگ‌های مختلف ادامه پیدا می‌کند (شکل ۳). در هر دو منطقه مورد مطالعه، در بین لایه‌های تخریبی سازند سنگستان، یک افق گدازه بازالتی برونزد دارد که به صورت هم‌شیب با سایر لایه‌های این سازند قرار گرفته است (شکل ۳). با نزدیک‌تر شدن به سمت سازند تفت، سیلستون‌ها تشکیل شده که به رنگ قرمز و خاکستری تیره مشاهده شده‌اند. در افق‌های بالایی این سازند، یک لایه نازک سنگ آهک قرار گرفته و سپس یک لایه سیلستون قرمز روی این لایه آهکی نهشته شده است. در نهایت، روی این لایه سیلستونی، لایه‌های کربناتی سازند تفت به صورت هم‌شیب نهشته شده است. این روند مشابه در هر دو برش بیداخوید و کوه علوی دیده شد که در شکل ۳ نشان داده شده است.

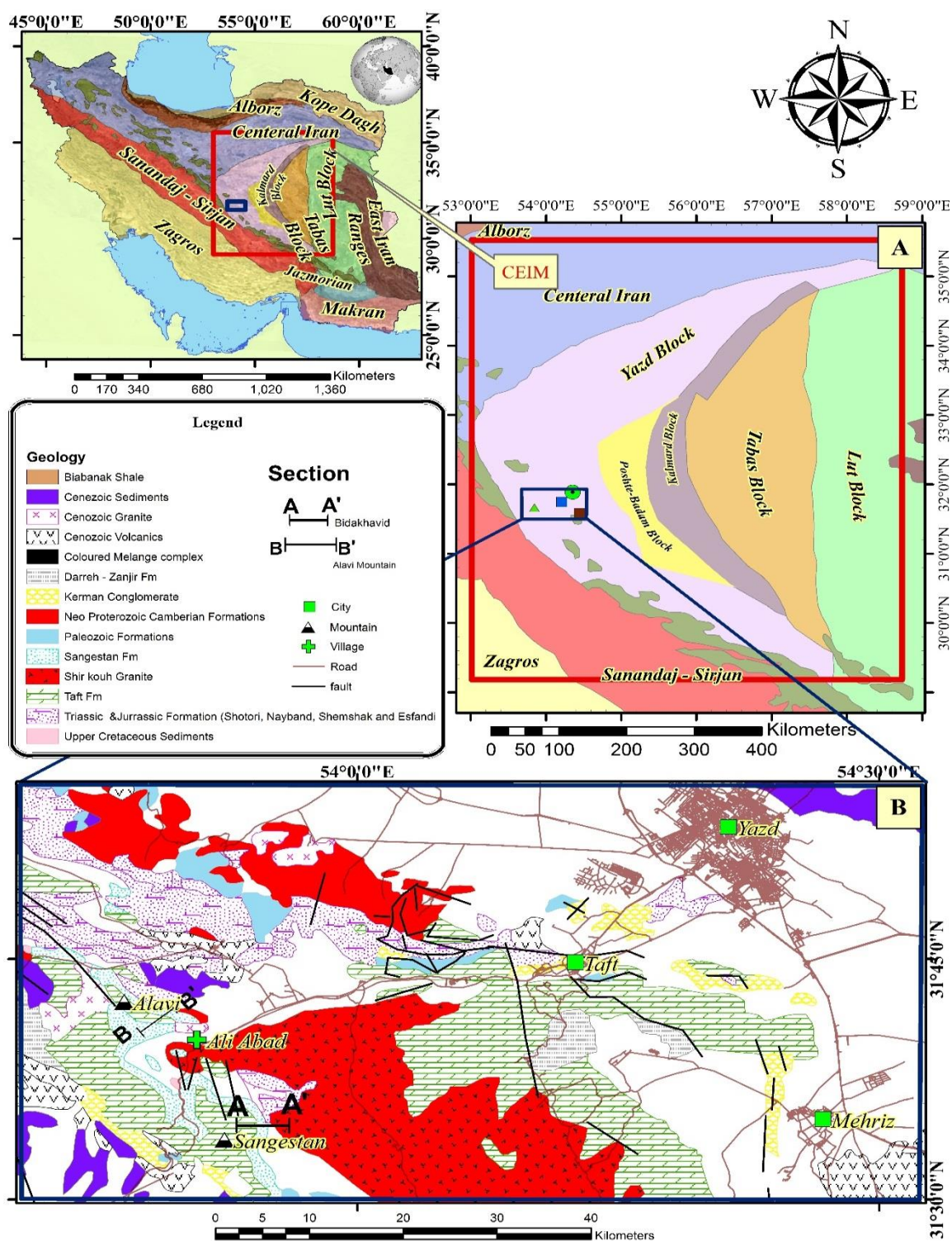
دارد. این گدازه بازالتی در مقاله مستقلی به تفضیل بررسی شده است (Abbaszadeh et al. 2021). تشکیل مجموعه سازندهای سنگستان، تفت و گدازه‌های بازالتی در کرتاسه پایینی، در یک حوضه ریفت درون‌قاره‌ای دانسته شده است. مقاله حاضر نگاهی به این موضوع هم داشته و به دنبال دلایلی برای تصحیح و تکمیل فرضیه تشکیل ریفت درون‌قاره‌ای در این ناحیه بوده است.

راه‌های دسترسی و زمین‌شناسی ناحیه مورد مطالعه

رسوبات سیلسی آواری سازند سنگستان در دو مقطع بیداخوید و کوه علوی بررسی شد که در نقشه زمین‌شناسی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خضرآباد قرار دارد. منطقه بیداخوید در جنوب شرقی روستای علی‌آباد از توابع شهرستان تفت و در طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۵۴ دقیقه و ۲۷ ثانیه و در عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۴ دقیقه و ۳۲/۶ ثانیه قرار دارد. همچنین منطقه کوه علوی در شمال غربی روستای علی‌آباد و طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۴۸ دقیقه و ۵۵/۷ ثانیه و در عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۴۱ دقیقه و ۳۶/۴ ثانیه قرار دارد. این مناطق و راه‌های دسترسی به آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

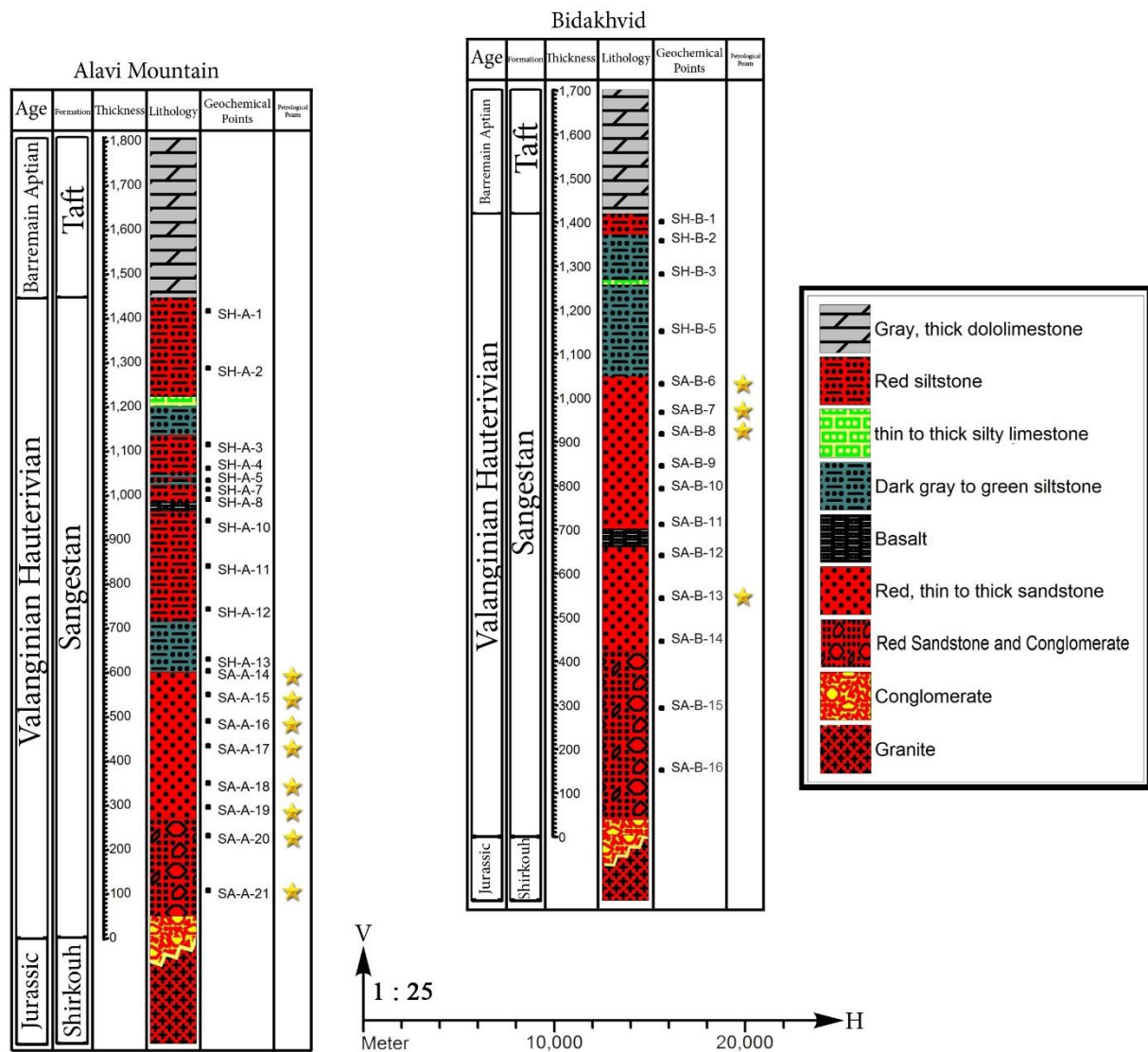
از لحاظ زمین‌شناسی، قدیمی‌ترین رخنمون‌های سنگی، متعلق به دوران پرکامبرین است که شامل شیل، ماسه‌سنگ، سیلستون سبزرنگ و سبز مایل به خاکستری و به‌طور فرعی، لایه‌های دولومیتی قهوه‌ای، متمایل به زرد سازند کهر است.

توالی کرتاسه پیشین، بیشترین رخنمون را در مناطق مورد مطالعه نشان می‌دهد. به‌طور کلی، این توالی با رسوبات کنگلومرای و ماسه‌سنگی سازند سنگستان شروع می‌شود که به صورت ناپیوستگی آذرین پی، ناهمواری‌های گرانیت شیرکوه با سن ژوراسیک را می‌پوشاند و یا اینکه به صورت ناپیوستگی دگرشیب، روی رسوبات سازند شمشک قرار گرفته است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی بلوک یزد در زون‌های ساختاری ایران (A) (اقتباس از (Alavi 1991) به‌همراه راه‌های دسترسی و نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده مناطق مورد مطالعه (B) اقتباس از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خضرآباد و یزد (Hajmolla- Ali 1993; (Haj Mola ali and Majidifard 2000).

Fig 1- Geographical location of Yazd block in structural zones of Iran (A), access roads and the simplified geological map and access of the studied areas taken from geological maps of Yazd and Khezerabad (1:100000) (B)

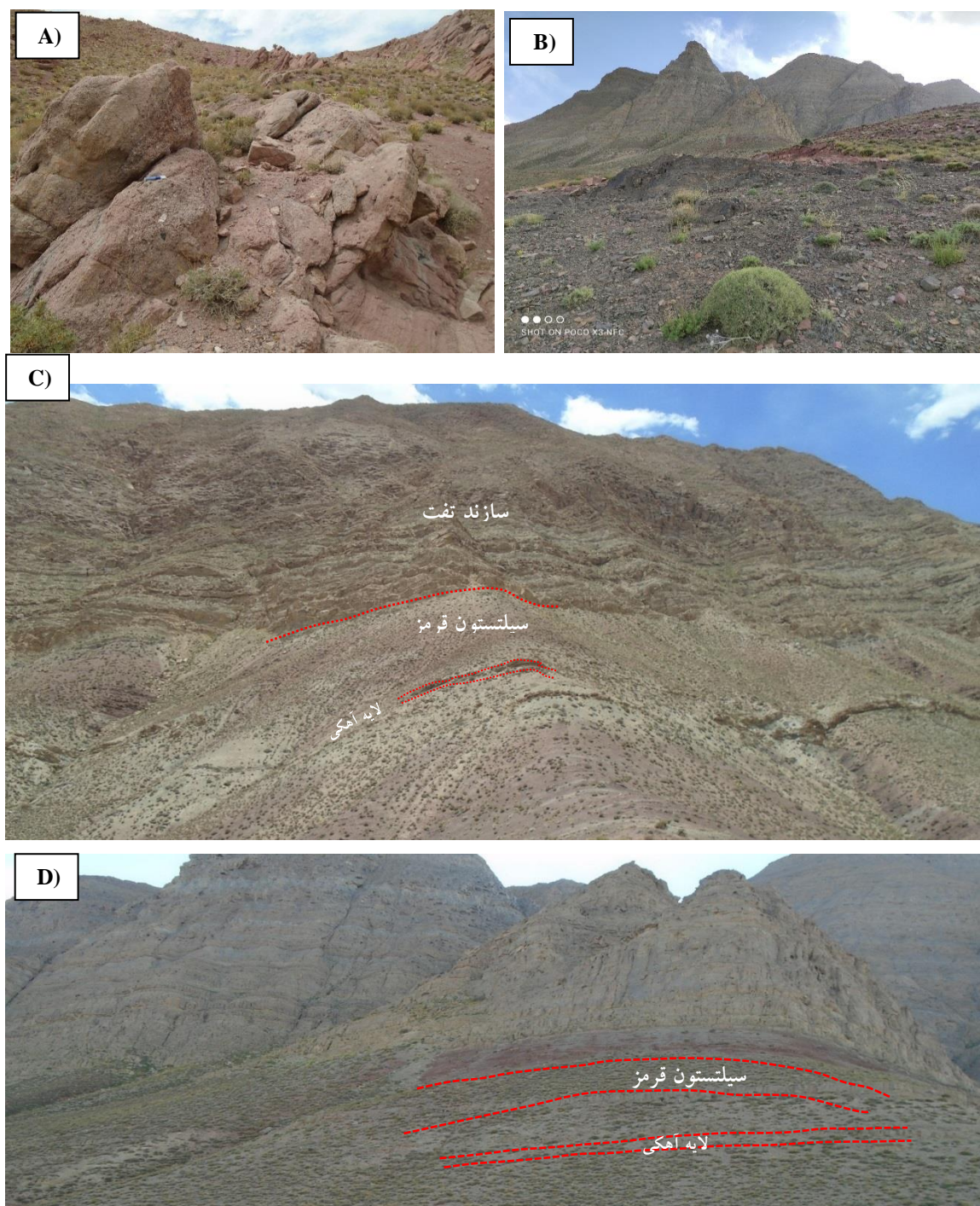


شکل ۲- ستون چینه‌شناسی تهیه‌شده از سازند سنگستان در برش‌های پیداخوید و کوه علوی؛ محل برداشت نمونه‌های ژئوشیمی با مربع و نمونه‌های پترولوژیکی با ستاره مشخص شده است

Fig 2- The stratigraphic column of Sangestan formation in Bidakhvid , Alavi Mountain sections, the location of geochemical samples and petrological samples have been shown in rectangle and star, respectively.

پیشین با ناپیوستگی آذرین پی بر روی آن قرار گرفته است (Az-Mikaelians et al. 2020). این گرانیته از نوع پرآلومین و نوع S است و از سه واحد جداگانه گرانودیوریتی، مونزوگرانیته و لوکوگرانیته با مرز واضح تشکیل شده است (Sheibi et al. 2012). نقشه زمین‌شناسی مناطق مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

رسوبات کنگلومرای کرمان به سن کرتاسه پسین- پالئوسن، از مهم‌ترین واحدهای سنگی دوران سنوزوئیک در محدوده مناطق مورد مطالعه است. مهم‌ترین ماگماتیسم در نزدیکی مناطق مورد مطالعه، باتولیت شیرکوه با سن ۱۵۹Ma- ۱۸۶ با روش پتاسیم-آرگون روی فلدسپات است که باعث دگرگونی مجاورتی رسوبات قدیمی‌تر شده و رسوبات کرتاسه



شکل ۳- تصاویر صحرایی از مناطق پژوهش: A. وجود لایه‌های ماسه‌سنگ قرمز در برش کوه علوی (دید به سمت شمال)، وجود افق بازالتی بین لایه‌های تخریبی سازند سنگستان در برش بیداخوید (دید به سمت جنوب غربی)، نمای از لایه‌های انتهایی سازند سنگستان و مرز هم شیب با سازند تفت در برش کوه علوی (دید به سمت جنوب متمایل به جنوب غربی) (C)، برش بیداخوید (دید به سمت جنوب غربی) (D).

Fig 3- Field images of study areas: A) the existence of red sandstone in Alavi Mountain section (view to north), **B)** Basalt horizon within Siliciclastic layers of Sangestan formation in the Bidakhavid section (view to the southwest), the photo of the last layers of Sangestan formation which located in conformation with Taft formation in Alavi Mountain section (view to southwest) **(C)**, and Bidakhavid section (view to southwest) **(D)**.

روش انجام پژوهش

پس از بازدیدهای صحرائی، نمونه برداری از رسوبات سیلیسی آواری سازند سنگستان در هر دو برش چینه‌شناسی به‌منظور مطالعات سنگ‌شناسی و ژئوشیمی انجام شد. از برش کوه علوی، ۹ نمونه سیلتستون و ۸ نمونه ماسه‌سنگ و از برش بیداخوید ۳ نمونه سیلتستونی و ۷ نمونه ماسه‌سنگی برداشت شد. از بین نمونه‌های برداشت‌شده، ۱۶ نمونه برای تهیه مقطع نازک انتخاب و با میکروسکوپ پلاریزان مدل الیمپوس (Olympus) مطالعه شد. شمارش نقطه‌ای برای نام‌گذاری دقیق ۱۲ نمونه ماسه‌سنگی روی مقاطع و به روش گزی-دیکسون (Gazzi-Dickinson method) انجام شد. تقسیم‌بندی انواع پارامترهای نقطه‌شماری در جدول ۱ و نتایج حاصل از آن در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین نمونه‌های بررسی شده، براساس تقسیم‌بندی فولک (1980) نام‌گذاری شد.

برای انجام مطالعات ژئوشیمی، آماده‌سازی ۲۷ نمونه آواری در آزمایشگاه‌های دانشکده معدن و متالورژی دانشگاه یزد انجام شد. ابتدا نمونه‌ها برش داده شد تا سطح هوازده‌نشده و سالمی از نمونه انتخاب شود. پس‌از آن، نمونه‌ها با دستگاه

سنگ‌شکن فکی خرد شده تا به ابعاد مدنظر برای پودرکردن مناسب باشد. در نهایت، نمونه‌ها با آسیاب دیسکی پودر شد تا به اندازه ذرات زیر ۲۰۰ میکرون برسد. درحین آماده‌سازی نمونه‌ها، حداکثر دقت صورت گرفت تا نمونه‌ها از هرگونه آلودگی دور باشد. نمونه‌های پودر شده به آزمایشگاه زراژما فرستاده شد تا برای عناصر اصلی، فرعی و نادر خاکی آنالیز شود. نمونه‌ها ابتدا با بورات متالیتیم ذوب شده و پس‌از آن، با اسیدنیتریک رقیق حل شده است تا برای آنالیز عناصر آماده شود. برای تجزیه اکسید عناصر اصلی، از روش ICP-OES استفاده شده و سپس با دستگاه ICP-OES 735 ساخت شرکت Varian استرالیا خوانش شده است. همچنین برای آنالیز عناصر فرعی و نادر خاکی از روش ICP-MS استفاده شد که برای این امر از دستگاه Agilent Series4500 ساخت کشور آمریکا استفاده شده است.

برای انجام مطالعات آماری چندمتغیره از نرم‌افزار SPSS و برای رسم نمودارهای سه‌تایی از نرم‌افزار GCDkit استفاده شده است. علاوه‌بر آن، برای رسم ستون چینه‌شناسی از نرم‌افزار Rock work 14 استفاده شد.

جدول ۱- تقسیم‌بندی انواع پارامترهای نقطه‌شماری شده و علائم اختصاری آن‌ها

Table1- The classification of parameters used in modal analysis, and their abbreviations

Non-undulouse monocrystalline quartz	Qm non
Undulouse monocrystalline quartz	Qm un
Polycrystalline quartz	Qpq
Qpq>3 crystal units per grain	Qpq>3
Qpq2-3 crystal units per grain	Qpq2-3
Chert	Cht
Polycrystalline quartz (or Calcedonic) lithic fragments (Qpq+Cht)	Qp
Total quartzose grain (Qm+QP)	Qt
Total (Qmnon+Qm un) and Qpq used for Folk (1980) classification (Qm+QPQ)	Q
Plagioclase feldspar	P
Potassium feldspar	K
Total feldspar grain (P+K)	F
Sedimentary rock fragments	Ls
Metasedimentary rock fragments (Ls+(1-x)Lm)	Lsm
Unstable lithic fragments (Lv+Ls+Lsm)	L
Total Siliciclastic lithic fragments (L+Qp)	Lt
Total unstable rock fragments and Chert used for Folk (1980) classification (L+Cht)	RF
Accessory minerals	Acc
Cements	Cem

سنگستان در دو برش مورد مطالعه، شامل ماسه‌سنگ و سیلتستون است. نمونه‌های ماسه‌سنگی اغلب، متوسط‌دانه است و درصد کمی درشت‌دانه و دارای گردشگی متوسط و

بحث و تحلیل یافته‌های پژوهش

پetroگرافی و آنالیز مواد

بررسی اولیه مقاطع نازک نشان داد که نمونه‌های آواری سازند

خانواده میکا (سریسیت، موسکویت)، بیوتیت، کلریت و کانی فلزی است که در مجموع، در حدود ۲ درصد حجم سنگ را تشکیل داده‌اند. در شکل c ۴، کانی بیوتیت به رنگ قهوه‌ای و در شکل e ۴، کانی سریسیت به رنگ بنفش مشاهده می‌شود که رخ یک‌جهته دارد. سیمان در ماسه‌سنگ‌ها، شامل سیمان سیلیسی و اکسید آهن است که مقدار سیمان سیلیسی بیشتر است و به‌طور میانگین حدود ۱۲ درصد حجم سنگ را اشغال کرده است. همچنین سیمان اکسید آهن نیز به‌طور متوسط، حدود ۴٪ حجم سنگ را در بر گرفته است (شکل c ۴). نمونه‌های سیلتستونی نیز به‌طور مشابه از کوارتز، فلدسپات و کانی‌های فرعی تشکیل شده است و در حدود ۵۲ درصد کوارتز دارد که قسمت اعظم آن از نوع تک‌بلورین است و تنها کمتر از ۱ درصد آن را کوارتزهای چندبلورین تشکیل داده است. میزان فلدسپات این سنگ‌ها نسبت به ماسه‌سنگ‌ها کمتر است و حدود ۱۶ درصد حجم سنگ را تشکیل داده است. در این مقاطع نیز خرده‌سنگ به میزان بسیار کم و بیشتر از نوع سیلیسی بود و تنها در یک مقطع، خرده‌سنگ کربناته مشاهده شد که در مجموع کمتر از یک درصد، سنگ در سنگ وجود دارد. کانی‌های فرعی در مجموع حدود ۳ درصد سیلتستون‌ها را تشکیل داده و شامل سریسیت، موسکویت بوده است و در یک نمونه، فسیل آهکی نیز مشاهده شد. سیمان این سنگ‌ها، شامل سیمان کربناته و اکسید آهن است که به‌ترتیب حدود ۱۵ و ۱۴ درصد حجم سنگ‌های سیلتستونی را به خود اختصاص داده است.

علاوه بر مطالعات پتروگرافی برای طبقه‌بندی نمونه‌های ماسه‌سنگی سازند سنگستان، از نمودار فولک استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با توجه به تقسیم‌بندی فولک (Folk 1980) و درصد کانی‌های تشکیل‌دهنده، نمونه‌های ماسه‌سنگی سازند سنگستان از نوع آرکوز است و تنها یک نمونه در محدوده ساب‌آرکوز قرار گرفته است.

نابالغ است. دانه‌ها دارای تماس‌های مستقیم و مضرس است و میزان رس در نمونه‌های ماسه سنگی کم است. برای انجام مطالعات دقیق‌تر، آنالیز مودال روی آن‌ها انجام شد. ذرات اصلی تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها نسبت به کل سنگ، به‌طور میانگین شامل ۵۶٪ کوارتز، ۲۵٪ فلدسپات و کمتر از ۱٪ خرده‌سنگ است (جدول ۲). در ابتدا تصویر یک ماسه‌سنگ آرکوزی نشان داده شده که در آن فلدسپات‌ها بیش از ۲۵ درصد حجم سنگ را تشکیل داده است. کوارتزهای تک‌بلوری نیز به رنگ شفاف در آن مشاهده می‌شود. سیمان اکسید آهن نیز فضای بین بلورها را پر کرده است که به رنگ تیره دیده می‌شود (شکل a ۴). در نمونه‌های ماسه‌سنگی مورد مطالعه، کوارتزهای مشاهده‌شده، اغلب به‌صورت تک‌بلوری (حدود ۵۴/۵٪) و به میزان کم کوارتزهای چندبلوری (۱/۵٪) است. در شکل b ۴، یک کوارتز چندبلوری نشان داده شده است. فلدسپات‌های موجود با رخ‌های دو‌جهته، بیشتر از نوع فلدسپات پتاسیم بوده و به میزان بسیار کم پلاژیوکلاز در آن مشاهده شد. سطح بعضی از فلدسپات‌های موجود به میزان کمی به کانی‌های رسی تجزیه شده است و به‌همین علت این بلورها، در بعضی موارد شفاف نیست و سطح مه‌آلود دارد. در شکل c ۴، یک بلور بزرگ فلدسپات دانه‌درشت، دارای رخ‌های واضح به‌همراه بلور کوارتز نشان داده شده است که بین آن‌ها را سیمان اکسید آهن پر کرده است. در این نمونه‌ها خرده‌سنگ چندانی مشاهده نشد و همان‌طور که بیان شد، کمتر از ۱ درصد از حجم سنگ‌ها را به خود اختصاص داده است. در شکل b ۴، خرده‌سنگ ماسه‌سنگی که تجمعی از بلورهای کوارتز و فلدسپات است، بین بلورهای کوارتز مشاهده شده است. چرت نیز کمتر از ۱ درصد حجم این سنگ‌ها را به خود اختصاص داده است. در شکل b ۴، چرت در گوشه سمت چپ پایین و در شکل f ۴، چرت در مرکز تصویر نشان داده شده است. از دیگر ذرات موجود در این سنگ‌ها، کانی‌های فرعی است که شامل کانی‌های

جدول ۲- نتایج دانه‌شماری نمونه‌های سیلیسی‌آواری سازند سنگستان در مناطق مورد مطالعه (اقتباس علائم اختصاری به کار رفته از جدول ۱)

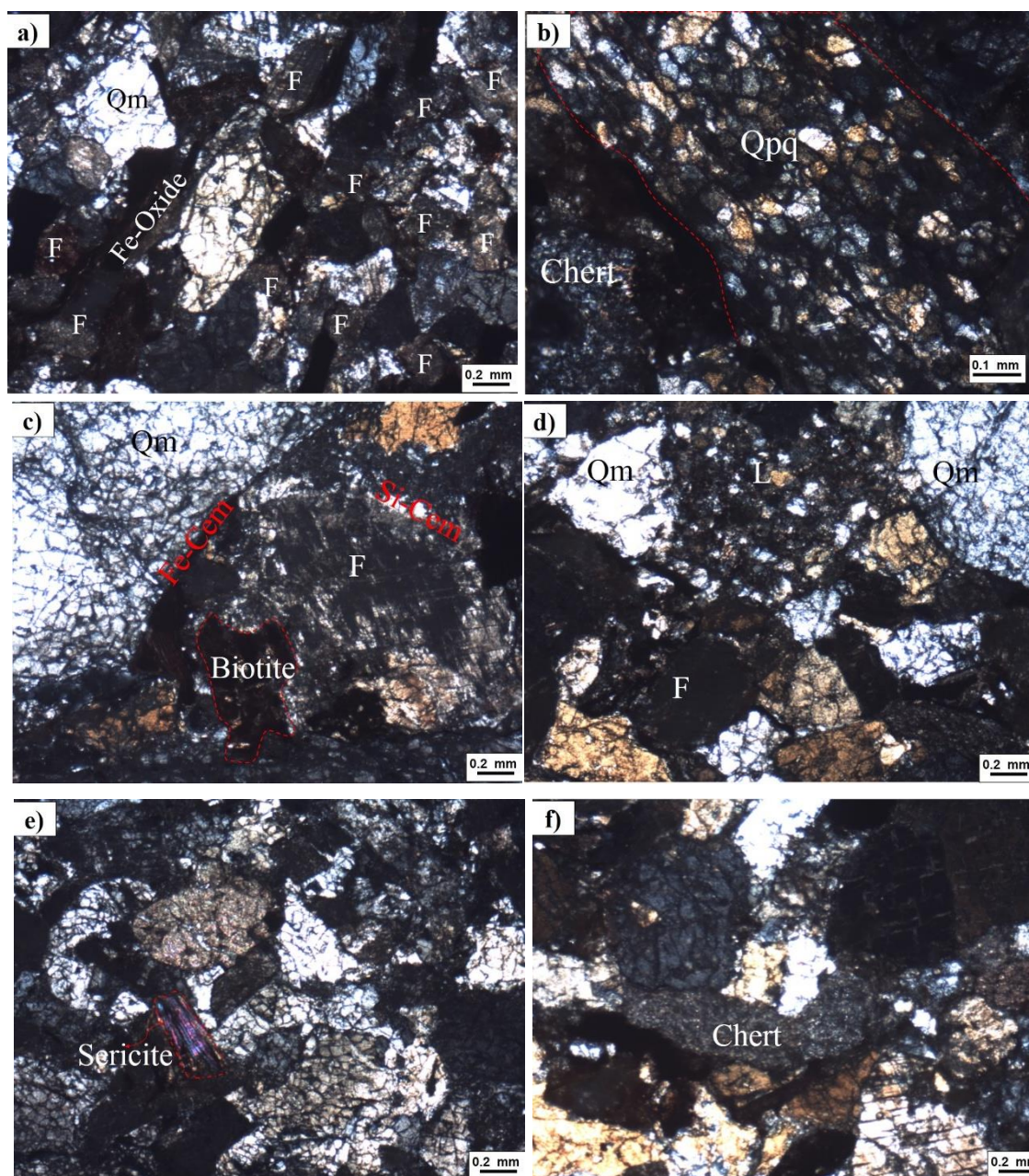
Table 2- The results of modal analysis of siliciclastic samples of Sangestan Formation in studied areas (Abbreviations have taken form Table 1)

SA-B-6	SA-B-13	SA-A-14	SA-A-17	SA-A-18	SA-A-19	SA-A-15	SA-B-8	SA-A-16	SA-A-21	SA-B-16	SA-B-7	Sample	
155	200	202	194	173	210	47	101	54	117	77	201	Qm un	
230	158	213	226	182	215	248	235	176	168	199	136	Qm non	
0	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	Qpq2-3	Q
0	0	0	0	0	0	26	0	3	40	25	22	Qpq>3	
44	25	35	30	28	46	0	2	31	18	14	1	P	F
96	90	101	98	90	99	143	202	141	141	126	175	K	
0	0	0	0	0	0	23	0	2	0	5	1	Cht	
0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	1	1	Ls	L
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Lsm	
1	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Lc	
0	2	0	0	0	0	0	6	11	4	14	0	Moscovite	Other minerals
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	0	Metal Mineral	Other minerals
5	0	0	2	0	4	0	0	0	0	0	0	Serisite	
0	12	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	Biotite	
0	0	0	0	1	0		1	0	0	0	0	Chlorite	
91	78	26	100	42	102	81	59	78	43	67	109	Cem-Si	Cem-ents
14	16	83	11	53	11	20	51	18	50	19	0	Cem-Hem	
636	581	666	663	573	687	626	657	517	622	581	668	Sum	
385	358	415	420	355	425	295	336	230	285	276	337	Qm	
0	0	2	2	1	0	26	0	3	40	25	22	Qpq	
0	0	2	2	1	0	49	0	5	40	30	23	Qt	
385	358	417	422	356	425	344	336	235	325	306	360	Qp	
385	358	417	422	356	425	321	336	233	325	301	359	Q	
140	115	136	128	118	145	143	204	172	159	140	176	F	
1	2	4	0	0	0	12	0	0	0	1	1	L	
1	2	6	2	1	0	61	0	5	40	31	24	Lt	
1	2	4	0	0	0	35	0	2	0	6	2	RF	
5	12	0	2	4	4	0	7	11	5	23	5	Acc	

جدول ۳- درصد محاسبه شده از نتایج نقطه‌شماری نمونه‌های ماسه‌سنگی سازند سنگستان برای استفاده در نمودار فولک

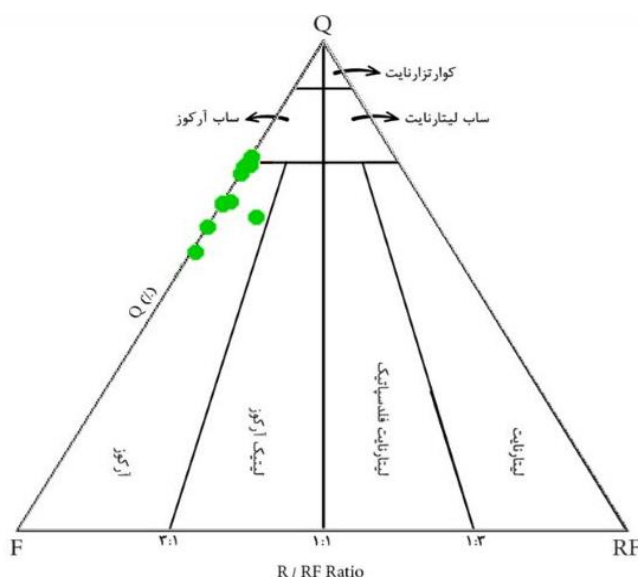
Table 3- Calculated percentage of modal analysis results of sandstone samples for using Folk diagram

RF	F	Q	Sample
0.37	32.77	66.85	SA-B-7
1.34	31.32	67.34	SA-B-16
0.00	32.85	67.15	SA-A-21
0.49	42.26	57.25	SA-A-16
0.00	37.78	62.22	SA-B-8
7.01	28.66	64.33	SA-A-15
0.00	25.44	74.56	SA-A-19
0.00	24.89	75.11	SA-A-18
0.00	23.27	76.73	SA-A-17
0.72	24.42	74.87	SA-A-14
0.42	24.21	75.37	SA-B-13
0.19	26.62	73.19	SA-B-6



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی از اجزای تشکیل دهنده ماسه‌سنگ‌های سازند سنگستان (a) ماسه‌سنگ با ترکیب سنگ‌شناسی از نوع آرکوز دارای کوارتز (Qm)، فلدسپات (F)؛ (b) وجود کوارتز چندبلوری (Qpq) به همراه چرت؛ (c) فلدسپات، کانی فرعی بیوتیت، سیمان‌های اکسید آهن و سیلیسی؛ (d) وجود خرده‌سنگ ماسه‌سنگی بین بلورهای کوارتز؛ (e) وجود سریسیت به‌عنوان کانی‌های فرعی موجود در ماسه‌سنگ‌ها؛ (f) وجود چرت در بین ذرات ماسه‌سنگ‌ها. تمامی تصاویر با استفاده از نور عبوری پلاریزه متقاطع گرفته شده است.

Fig 4- Photograph of sandstone components of Sangestan formation: a) the existence of monocrystalline and polycrystalline quartz, b) Arkose sandstone with monocrystalline quartz, Feldspar and lithic fragments, c) Feldspar with polysynthetic twinning, d) the existence of chert mineral in the sandstone samples, e) other minerals including sericite and metal minerals, f) Cement types consist of silicious and Fe-oxide cements. (Microscopic images were taken using crossed polarized light)



شکل ۵- ترکیب سنگ‌شناسی نمونه‌های ماسه‌سنگی سازند سنگستان براساس طبقه‌بندی فولک (Folk 1980)

Fig 5- Petrological composition of siliciclastic samples of Sangestan Formation based on Folk classification

سازند سنگستان در جدول ۴ و ۵ آورده شده است.

ژئوشیمی

مقادیر عناصر اصلی و فرعی به‌دست‌آمده از تجزیه شیمیایی کل سنگ (bulk) درباره ۲۷ نمونه رسوبات سیلیسی آواری

جدول ۴- غلظت عناصر اصلی رسوبات سیلیسی آواری سازند سنگستان در برش‌های کوه علوی و بیداخوید برحسب درصد وزنی .

Table 4- The Concentration of major elements siliciclastic sediments of Sangestan Formation in Alavi Mountain and Bidakhoid sections (w %).

(SiO ₂) _{adj}	Total	LOI	Cr ₂ O ₃	BaO	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	MnO	Fe ₂ O ₃ ^T	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Area	Unit
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
67.59	99.95	12.74	0.01	0.12	0.06	1.31	1.31	14.53	1.21	0.24	2.13	6.98	0.45	58.86	AM	SH-A-2
67.43	99.99	12.17	0.01	0.11	0.08	0.9	1.73	14.27	1	0.23	2.56	7.17	0.62	59.14	AM	SH-A-3
72.92	100	7.59	0.01	0.07	0.05	0.98	2.17	8.17	1.27	0.13	3.01	8.71	0.51	67.33	AM	SH-A-4
70.24	99.94	8.81	0.01	0.12	0.08	1.07	2.14	9.29	1.47	0.14	3.39	9.04	0.46	63.92	AM	SH-A-5
60.06	100	14.83	<0.01	0.02	0.08	1.1	1.88	17.48	1.2	0.35	2.84	8.63	0.45	51.14	AM	SH-A-7
67.31	100	11.45	<0.01	0.06	0.07	1.12	1.71	12.85	1.38	0.32	2.54	8.41	0.53	59.56	AM	SH-A-8
61.19	99.95	13	<0.01	0.04	0.09	1.47	1.56	15.12	1.46	0.32	3.53	9.58	0.6	53.18	AM	SH-A-10
63.64	100	13.05	<0.01	0.02	0.08	1.19	1.47	15.07	1.3	0.25	3.26	8.48	0.51	55.32	AM	SH-A-12
59.35	100	16.59	<0.01	0.08	0.05	1.08	1.25	20.33	0.97	0.27	2.49	6.94	0.49	49.46	AM	SH-A-13
82.84	99.96	2.29	0.02	0.1	0.03	2.52	1.76	1.04	0.65	0.03	1.51	9.02	0.18	80.81	AM	SA-A-14
84.88	99.96	1.25	0.02	0.11	0.02	2.84	1.52	0.18	0.25	<0.01	1.1	8.87	0.12	83.68	AM	SA-A-15
82.78	100	0.68	0.01	0.02	0.01	3.06	2.63	0.11	0.21	0.01	1.31	9.6	0.16	82.19	AM	SA-A-16
89.37	100	0.77	0.01	0.14	<0.01	2.09	1.7	0.1	0.11	<0.01	0.43	6.05	0.04	88.56	AM	SA-A-17
77.85	100	1.87	0.04	0.02	0.04	2.98	2.69	0.86	0.66	0.04	2.69	11.5	0.26	76.35	AM	SA-A-18
85.97	100	1.3	0.05	0.02	0.06	2.32	1.15	0.69	0.32	0.02	1.51	7.65	0.12	84.79	AM	SA-A-19
86.10	100	2.24	0.02	0.03	0.07	2.08	1.08	1.2	0.77	0.06	1.25	6.96	0.11	84.13	AM	SA-A-20
84.37	99.93	2.25	0.03	0.12	0.06	1.97	1.99	2.05	0.17	0.05	1.33	7.55	0.07	82.29	AM	SA-A-21
63.23	99.99	10.87	0.01	0.04	0.13	2.27	1.67	11.13	2.45	0.12	3.51	10.86	0.61	56.32	BKH	SH-B-1
63.13	100	10.91	0.01	0.04	0.13	2.3	1.68	11.07	2.45	0.12	3.59	10.87	0.62	56.21	BKH	SH-B-2
63.62	100	10.62	0.03	0.13	0.13	1.86	2.21	11.26	1.75	0.12	3.99	10.58	0.56	56.76	BKH	SH-B-5
84.96	99.97	1.41	0.07	0.03	0.06	2.99	1.61	1.55	0.06	0.05	0.91	7.5	0.08	83.65	BKH	SA-B-6
79.84	100	0.99	0.02	0.03	0.06	5.15	1.68	0.31	0.24	0.01	1.39	10.93	0.18	79.01	BKH	SA-B-7
81.65	100	1.01	0.02	0.03	0.06	4.75	1.51	0.27	0.2	<0.01	1.21	10	0.15	80.79	BKH	SA-B-8
82.94	99.91	1.53	0.05	0.19	0.06	1.45	3.57	1.47	0.23	0.05	0.94	8.92	0.05	81.4	BKH	SA-B-11
80.96	99.98	1.66	0.09	0.07	0.06	2.03	3.17	1.55	0.21	0.05	1.4	10.13	0.09	79.47	BKH	SA-B-13
81.70	99.99	2.41	0.04	0.02	0.05	1.23	3.03	2.7	0.21	0.08	1.31	9.1	0.14	79.67	BKH	SA-B-15
85.69	100	0.49	0.05	0.02	0.04	1.33	2.7	0.16	0.14	0.02	1.01	8.7	0.13	85.21	BKH	SA-B-16

AM: کوه علوی، BKH: بیداخوید، SH: سیلستون، SA: ماسه‌سنگ



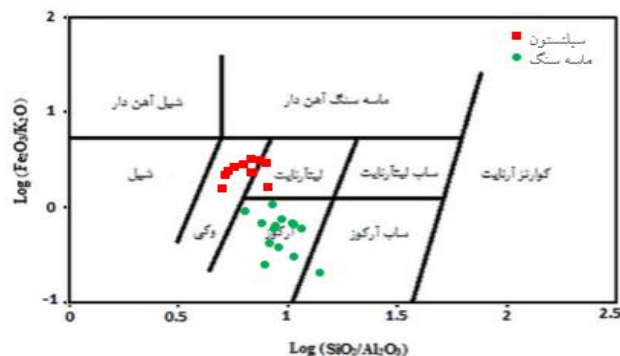
جدول ۵- غلظت عناصر فرعی رسوبات سازند سنگستان در دو برش بیداخوید و کوه علوی (برحسب ppm). (علامت اختصاری مشابه جدول ۱ است).

Table 5- The trace element concentrations of sediments of Sangestan Formation in two sections of Bidakhood and Alavi Mountain (ppm). (Abbreviations are similar to Table 1).

U	Th	Pb	Ta	Hf	Cs	Nb	Zr	Y	Sr	Rb	Zn	Sn	Cu	Ni	Co	Cr	V	Sc	Li	Area	
1.3	5.87	9	0.7	1.98	5.6	7.3	59	14.5	162.5	43	39	1	16	19	7.6	85	52	4.8	34	AM	SH-A-2
1.6	7.32	18	0.85	2.33	2.7	8.6	71	16.9	143.5	30	41	1.1	11	22	9.4	97	47	5.4	31	AM	SH-A-3
1.3	6.38	11	0.69	1.99	2.7	6.8	59	12.5	118	30	44	1	6	22	9.5	95	51	5	35	AM	SH-A-4
1.2	6.08	9	0.74	1.8	2.7	6.8	53	14.5	131.5	36	65	1	4	24	7.8	74	55	5.8	45	AM	SH-A-5
1.4	6.29	14	0.67	1.95	4	7.1	50	15.5	166.6	39	38	1.1	7	19	9.4	55	48	5.3	32	AM	SH-A-7
1.3	6.69	6	0.78	2.12	4.5	7.5	60	16.1	134.9	40	43	1	6	21	7.9	73	51	5.5	38	AM	SH-A-8
1.6	8.23	11	0.86	2.33	5.5	8.3	64	15.5	153.8	50	52	1.4	10	23	10.9	54	58	6.7	39	AM	SH-A-10
1.4	6.7	8	0.86	2.07	4.1	7.9	57	16	142.6	41	44	1.1	4	21	7.3	55	56	5.4	42	AM	SH-A-12
1.6	6.61	6	0.81	2.06	4	8.2	50	15.7	139	39	36	1.1	7	23	9.3	59	50	5.1	36	AM	SH-A-13
0.5	4.31	8	0.57	1.08	4.8	5.1	19	4.5	109.4	73	21	1.4	9	12	7.6	95	33	2.2	19	AM	SA-A-14
0.48	3.96	8	0.52	1.13	5.1	4.4	18	3.4	85.2	81	14	1.7	6	12	5.7	97	28	1	14	AM	SA-A-15
0.4	4.94	11	0.58	0.77	4.9	5	6	3.7	42.1	84	18	1.5	7	8	5.1	104	24	1.7	15	AM	SA-A-16
0.3	2.85	9	0.34	0.72	1.6	3.2	5	2.3	45	49	12	1.3	9	8	3.6	93	19	<0.5	19	AM	SA-A-17
0.6	7.34	16	0.75	1.15	7.8	6.6	17	7.8	59	92	37	2.2	12	19	9	194	42	3.4	15	AM	SA-A-18
0.5	4.62	13	0.56	0.98	4.8	4.8	12	4.7	37.1	86	28	2.4	10	15	5.7	187	30	1.8	15	AM	SA-A-19
0.5	3.82	18	0.5	0.98	3.1	4.3	12	4.9	67	63	26	1.5	9	8	5.9	71	30	1.5	22	AM	SA-A-20
0.5	3.47	10	0.41	0.87	4.5	3.7	7	5.2	55.9	56	27	1.2	5	11	6.4	105	18	<0.5	25	AM	SA-A-21
1.6	7.98	17	1.01	2.08	8.4	9.6	54	16.8	125.8	75	63	2	11	28	11.1	52	65	7.9	43	BKH	SH-B-1
1.6	8.38	17	1.07	2.15	7.8	9.2	54	16.8	125.5	74	63	1.8	12	28	11.3	52	64	8	43	BKH	SH-B-2
1.63	7.56	18	0.81	2	4.9	8.1	52	16.2	172.6	56	55	1.6	9	28	11	132	63	6.6	36	BKH	SH-B-5
0.3	3.04	8	0.39	0.74	1.5	3.8	6	3.9	42.8	63	6	1.6	7	14	2.7	161	17	<0.5	17	BKH	SA-B-6
0.4	5.05	16	0.62	0.96	6.7	5.2	12	4.5	32.5	120	12	1.9	5	8	3.1	51	25	1.5	8	BKH	SA-B-7
0.5	5.1	17	0.5	0.86	7.5	5.3	10	5	36.6	135	13	2	6	8	3.6	70	26	1.8	10	BKH	SA-B-8
0.49	3.29	5	0.51	0.93	1.6	4.6	11	7.6	79.8	41	11	1.5	8	12	5.1	139	22	1.2	22	BKH	SA-B-11
0.5	4.13	7	0.47	0.85	2.1	4.8	9	9.4	41.3	47	15	1.8	10	19	4.6	249	23	1.1	18	BKH	SA-B-13
0.5	5.25	8	0.59	0.82	2.1	5.3	6	11.6	34.1	37	13	1.6	6	10	3.5	131	23	1.8	27	BKH	SA-B-15
0.5	4.23	5	0.64	0.93	2	5.3	8	4	26.2	37	13	1.7	9	13	6.5	166	23	1.8	30	BKH	SA-B-16

نمونه‌های ماسه‌سنگی از نوع آرکوز است که با استفاده از دیاگرام ژئوشیمیایی نیز تأیید شد؛ اما نمونه‌های سیلتستونی در محدوده لیتارنایت و وک قرار گرفت. این مسئله، به علت آن است که نمونه‌های سیلتستونی آهن زیادی دارد که باعث شده نمونه‌ها از سمت آرکوز به لیتارنایت میل کند.

از نمودار لگاریتم نسبت Fe_2O_3 / K_2O به لگاریتم نسبت SiO_2 / Al_2O_3 برای طبقه‌بندی رسوبات تخریبی استفاده شد (Herron 1988). براساس این نمودار، نمونه‌های سیلیسی آواری سازند سنگستان به انواع آرکوز، لیتارنایت-وک تقسیم شد (شکل ۶). همان‌طور که در قسمت پتروگرافی بیان شد،



شکل ۶- نمودار تقسیم‌بندی سنگ‌های آواری سازند سنگستان در دو مقطع بیداخوید و کوه علوی (Herron 1988)

Fig 6- The siliciclastic sediments classification plot of Sangestan Formation in Bidakhavid and Alavi Mountain sections

پردازش داده‌ها

پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های ژئوشیمی معمولاً دارای مقادیر سنسورد (کمتر یا بیشتر از حد تشخیص دستگاه اندازه‌گیری) و مقادیر خارج از ردیف است. در این مطالعه، مقادیر SO_3 بیش از ۵۰ درصد مقادیر سنسورد داشت و از بین داده‌ها حذف شد؛ اما مقادیر سنسورد بقیه داده‌های مورد مطالعه از ۲۵٪ کمتر بود و با روش ساده، سه‌چهارم حد تشخیص دستگاهی جانشین شد. علاوه بر آن، داده خارج از ردیفی بین داده‌ها مشاهده نشد. همچنین، از آنجاکه، داده‌های ژئوشیمی به صورت ترکیبی گزارش شده است و مجموع آن‌ها باید به یک عدد ثابت برسد، فضای این داده‌ها بسته است (Buccianti and Grunsky 2014)؛ بنابراین، نتایج آنالیزهای چندمتغیره داده‌های ژئوشیمی در این فضا قابل اعتماد نیست. برای رفع این مشکل، باید تبدیل‌های مناسبی انجام شود تا داده‌ها باز شود (Aitchison and Egozcue 2005). تبدیل لگاریتمی یکی از روش‌هایی است که باعث باز شدن داده‌های ژئوشیمیایی می‌شود. سه نسبت‌های لگاریتمی مختلف برای این هدف وجود دارد که از بین آن‌ها، نسبت لگاریتمی clr برای داده‌های این مطالعه انتخاب شد که به صورت زیر تعریف می‌شود (Buccianti and Grunsky 2014):

$$clr(x) = \log \left[\frac{x_1}{g(x)}, \frac{x_2}{g(x)}, \dots, \frac{x_D}{g(x)} \right] \quad (1)$$

که در آن، $g(x)$ میانگین هندسی داده‌هاست.

آنالیزهای آماری چندمتغیره

در این مطالعه به جای روش‌های مرسوم بررسی‌های آماری ساده، از روش‌های آماری چندمتغیره استفاده شده است تا براساس آن بتوان رابطه عناصر در رسوبات را بهتر درک کرد و تغییرات هم‌زمان عناصر را بررسی کرد؛ بنابراین، براساس این روش‌ها می‌توان یکسان بودن منشأ رسوبات در دو منطقه مورد مطالعه را بررسی کرد؛ بنابراین، لازم است ابتدا توضیحات مختصری درباره دو روش آماری چندمتغیره (آنالیز

خوشه‌ای و آنالیز فاکتوری) داده و پس از آن نتایج آورده شود.

آنالیز فاکتوری

این روش که ابتدا روان‌شناس‌ها آن را به کار گرفتند، تغییرات بین مجموعه داده‌ها و ساختار داده‌های چندمتغیره را با استفاده از چند فاکتور نشان می‌دهد. واژه فاکتور در روان‌شناسی معادل فرآیندهای کنترل‌کننده در ژئوشیمی است (Reimann et al. 2002). این روش، یکی از آنالیزهای چندمتغیره معمول در مطالعات ژئوشیمیایی است که باعث تبدیل داده‌ها با ابعاد بزرگ (یا تعداد زیاد) به داده‌هایی با بعد کوچک (یا تعداد کم)، با استفاده از ماتریس واریانس/کوواریانس می‌شود. در این روش، چندین متغیر وابسته به یک متغیر مستقل تبدیل شده است و به این ترتیب، ابعاد کاهش پیدا می‌کند. براساس این روش، مجموعه متغیرهای ژئوشیمیایی به تعداد کمی فاکتور تبدیل می‌شود. در روش آنالیز فاکتوری، هر فاکتور نشان‌دهنده یک فرآیند زمین‌شناسی یا ژئوشیمیایی است که باعث همبستگی بین متغیرها در آن فاکتور می‌شود (Meigoony et al. 2014).

قبل از انجام آنالیز فاکتوری و برای از بین بردن اثر مقیاس، داده‌های پس از پیش‌پردازش، با استفاده از روش $Zscore$ استاندارد شد که در آن برای هر عنصر، میانگین داده‌ها از هر داده کم شده است و بر انحراف معیار تقسیم می‌شود. پس از انجام این آنالیز روی ۲۷ نمونه ماسه‌سنگ و سیلتستون، فاکتورهای مهم از لحاظ آماری با استفاده از نمودار صخره‌ای^۱ و جدول واریانس کلی^۲ استخراج شد که به ترتیب در شکل ۷ و جدول ۶ نشان داده شده است. براین اساس، ۵ فاکتور اول، بیش از ۸۶ درصد واریانس کل داده‌ها را به خود اختصاص داد. از طرفی دیگر، این ۵ فاکتور دارای مقدار ویژه بالاتر از ۱ بوده و بقیه فاکتورها روند ثابتی را نشان داده است و اهمیت چندانی ندارد. در مرحله سوم، تابع چرخش واریمکس^۳ روی

¹ Scree Plot

² Total Variance Table

³ Varimax

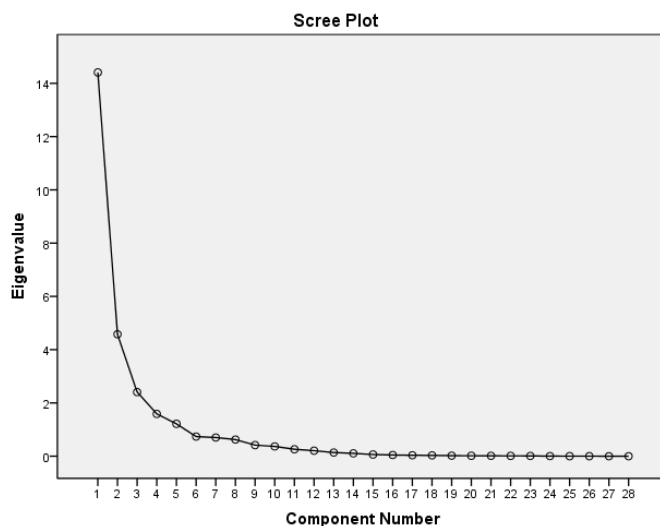


اجزای اصلی تشکیل‌دهنده سنگ‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که قرارگرفتن CaO به‌همراه TiO_2 و Fe_2O_3 در یک گروه، نشان‌دهنده وجود سیمان کربناته به‌همراه سیمان اکسید آهن و مواد تیتانیوم‌دار است. از طرفی، عناصر Na_2O ، SiO_2 ، Al_2O_3 نیز در یک گروه قرار گرفت و مقادیر ویژه منفی این فاکتور را تشکیل داد که نشان‌دهنده عناصر تشکیل‌دهنده اجزای اصلی ماسه‌سنگ‌ها است.

مؤلفه‌های اصلی اعمال شده است و ماتریس بار فاکتورها (مقادیر ویژه هر فاکتور) مشخص شد. با مطالعه عناصر در هر فاکتور و مقدار بار آن، نتایج زیر به دست آمد:

در فاکتور اول، عناصر Cr, Na_2O ، SiO_2 ، Al_2O_3 دارای مقادیر ویژه منفی بالا و عناصر Zr, V, U, Sc, Sr, REE دارای مقادیر ویژه مثبت بالایی است.

باتوجه به توصیف کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده سیمان و



شکل ۷- نمودار صخره‌ای تعیین‌کننده تعداد فاکتور موردنیاز در روش آنالیز فاکتوری

Fig 7- The scree plot determining the number of factors required in the factor analysis method

است. نتایج حاصل از این تفکیک، به‌طور خلاصه در جدول ۷ نشان داده شده است.

علاوه بر آن، همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، مقادیر بار فاکتوری هم در سیلتستون‌های منطقه بیداخوید و هم در منطقه کوه علوی دارای بار مثبت بالا است. در مقابل، این مقادیر در ماسه‌سنگ‌های هر دو منطقه، دارای بار منفی بالا است. این مسئله نشان‌دهنده آن است که منشأ سیلتستون‌ها و ماسه‌سنگ‌ها در هر دو منطقه مورد مطالعه شبیه هم است.

در فاکتور سوم، عناصر با شدت میدان بالا^۴، دارای مقادیر

عناصر Y, MnO, CaO, REE دارای بار فاکتوری مثبت بالا در فاکتور دوم است و رابطه عکس با عناصر Cs, Rb, K_2O ، Al_2O_3 ، SiO_2 دارد که دارای بار فاکتوری منفی است. این فاکتور نیز نشان‌دهنده همراهی عناصر نادر خاکی با اکسیدهای کلسیم و منگنز است که بیانگر وجود عناصر نادر خاکی در سیمان سنگ است. از طرفی، عناصر لیتوفیل بزرگ یون نیز رفتاری شبیه اکسید پتاسیم نشان می‌دهد که مشخص می‌کند این عناصر در فیلسیلیکات‌ها تمرکز پیدا کرده است.

این دو فاکتور، عناصر تشکیل‌دهنده سیمان سنگ و عناصر مرتبط با اجزای اصلی ماسه‌سنگ‌ها را از هم تفکیک کرده

⁴ High field strength elements (HFSE)

مثبت برای عناصر Fe_2O_3 و P_2O_5 است. این فاکتور نشان‌دهنده همراهی اکسید آهن با فسفات‌ها است. در فاکتور پنجم، عناصر Ni و Co مقدار مثبت بالایی نشان داد که نشان‌دهنده وجود عناصر انتقالی در این فاکتور است.

ویژه مثبت بالایی است؛ درحالی‌که، BaO مقدار ویژه منفی را در این فاکتور نشان می‌دهد. این عناصر باتوجه‌به مقاومت بالایی که دارد، می‌تواند تا فاصله زیادی حمل شده و در حوضه تجمع پیدا کند. فاکتور چهارم، نشان‌دهنده بار فاکتوری

جدول ۶- نمایش مقادیر ویژه مربوط به هر فاکتور به‌همراه درصد واریانس تجمعی آن‌ها برای نمونه‌های رسوبات سازند سنگستان (عناصر بااهمیت به‌صورت پررنگ نشان داده شده است)

Table 6- The eigenvalue of Factors and their cumulative variance for sediments of the Sangestan Formation (Important elements are shown in bold)

Elements	F1	Elements	F2	Elements	F3	Elements	F4	Elements	F5
clrCr	-.907	clrCs	-.859	clrBaO	-.549	clrBaO	-.609	REE	-.248
clrNa2O	-.849	clrRb	-.845	clrSr	-.501	clrSr	-.379	clrY	-.176
clrSiO2	-.803	clrK2O	-.783	clrCaO	-.379	clrCu	-.290	clrK2O	-.161
clrAl2O3	-.699	clrAl2O3	-.542	clrMnO	-.297	clrCo	-.277	clrRb	-.154
clrCu	-.542	clrSiO2	-.474	clrP2O5	-.233	clrSiO2	-.245	clrTh	-.126
clrK2O	-.530	clrCu	-.344	clrYb	-.180	clrNa2O	-.201	clrCs	-.110
clrRb	-.438	clrTh	-.336	clrZr	-.122	clrNb	-.140	clrP2O5	-.099
clrBaO	-.260	clrTa	-.315	clrNi	-.112	clrV	-.139	clrAl2O3	-.094
clrTa	-.126	clrCo	-.167	clrMgO	-.098	clrCr	-.099	clrSiO2	-.093
clrNi	-.007	clrCr	-.155	clrY	-.074	clrTa	-.088	clrYb	-.089
clrNb	-.005	clrNb	-.140	clrU	-.041	REE	-.047	clrNb	-.063
clrP2O5	.058	clrV	-.075	clrCo	-.033	clrAl2O3	-.034	clrCaO	-.038
clrTh	.077	clrNa2O	-.066	clrCr	.048	clrK2O	-.020	clrNa2O	-.009
clrCs	.198	clrBaO	-.054	REE	.079	clrZr	-.008	clrBaO	.017
clrCo	.317	clrFe2O3	.114	clrCu	.088	clrU	.003	clrMnO	.035
clrMnO	.428	clrP2O5	.132	clrSiO2	.115	clrRb	.010	clrTiO2	.073
clrY	.466	clrSr	.154	clrFe2O3	.137	clrTh	.037	clrTa	.077
clrYb	.483	clrMgO	.158	clrK2O	.188	clrMgO	.094	clrU	.112
clrCaO	.578	clrTiO2	.260	clrRb	.213	clrCs	.133	clrSc	.116
clrSr	.651	clrSc	.279	clrV	.221	clrNi	.150	clrSr	.124
clrFe2O3	.700	clrZr	.308	clrNa2O	.229	clrSc	.164	clrMgO	.147
REE	.741	clrNi	.428	clrCs	.267	clrTiO2	.172	clrZr	.162
clrSc	.782	clrU	.481	clrTiO2	.283	clrMnO	.259	clrCu	.206
clrU	.817	REE	.512	clrAl2O3	.340	clrCaO	.292	clrCr	.207
clrTiO2	.860	clrCaO	.630	clrSc	.367	clrY	.299	clrFe2O3	.220
clrV	.862	clrMnO	.720	clrTa	.835	clrYb	.331	clrV	.233
clrZr	.880	clrYb	.734	clrTh	.881	clrFe2O3	.526	clrNi	.698
clrMgO	.913	clrY	.775	clrNb	.902	clrP2O5	.847	clrCo	.747
% of Cumulative Variance	37.4		59.02		72.72		80.90		86.41

جدول ۷- تفکیک عناصر موجود در سیمان و اجزای اصلی سنگ‌های آواری مناطق بیداخوید و کوه علوی

Table 7- The separation of elements in the cement components and in the principal components of siliciclastic sediments in Bidakhvid and Alavi Mountain areas

عناصر فرعی	عناصر اصلی	کانی	
REE, Zr, Y, V, Sc, Sr	CaO, MnO, MgO, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃	سیمان کلسیتی و آهن‌دار	سیمان (تفکیک برحسب درصد در تمام نمونه‌ها)
Rb, Cr, Cs	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , K ₂ O, Na ₂ O	کوارتز، فلدسپات و کانی‌های رسی	اجزای اصلی سنگ

جدول ۸- مقادیر بار فاکتوری برای رسوبات سیلیسی آواری در دو منطقه کوه علوی و بیداخوید

Table 8- The loading factor values for siliciclastic sediments in Bidakavid and Alavi Mountain areas

منطقه بیداخوید				Rock type	منطقه کوه علوی				Rock type
F2	Sample	F1	Sample		F2	Sample	F1	Sample	
-1.66	SA-B-8	-2.01	SA-B-6	ماسه‌سنگ	-1.61	SA-A-15	-0.98	SA-A-21	ماسه‌سنگ
-1.52	SA-B-7	-1.86	SA-B-13		-1.27	SA-A-14	-0.84	SA-A-17	
-0.19	SH-B-1	-1.49	SA-B-16		-1.24	SA-A-20	-0.69	SA-A-19	
-0.16	SH-B-2	-1.47	SA-B-11		-1.03	SA-A-16	-0.26	SA-A-18	
0.12	SH-B-5	-1.28	SA-B-15		-0.93	SA-A-19	-0.19	SA-A-16	
0.17	SA-B-6	-0.05	SA-B-7		-0.85	SA-A-21	0.04	SA-A-15	
0.76	SA-B-16	0.00	SA-B-8		-0.73	SA-A-18	0.11	SA-A-20	
0.81	SA-B-11	0.61	SH-B-5	سیلتستون	-0.35	SA-A-17	0.26	SA-A-14	سیلتستون
1.14	SA-B-13	1.07	SH-B-2		0.24	SH-A-10	0.56	SH-A-3	
1.70	SA-B-15	1.10	SH-B-1		0.28	SH-A-2	0.60	SH-A-4	
					0.61	SH-A-7	0.64	SH-A-5	
					0.74	SH-A-12	0.92	SH-A-8	
					0.77	SH-A-8	0.93	SH-A-2	
					0.77	SH-A-5	0.96	SH-A-7	
				0.91	SH-A-4	1.02	SH-A-13		
				1.01	SH-A-13	1.13	SH-A-12		
				1.50	SH-A-3	1.19	SH-A-10		

آنالیز خوشه‌ای

هدف از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای اغلب دسته‌بندی متغیرها یا مشاهدات، به گروه‌های هموزن چندمتغیره معنی‌دار است؛ به گونه‌ای که، اعضای هر گروه از اعضای گروه‌های دیگر متمایز باشد (Zhou et al. 2018)؛ به عبارت دیگر، تجزیه و تحلیل خوشه‌ای، فاصله بین هر جفت از اشیاء را برحسب متغیرهای پیشنهادی اندازه‌گیری و سپس اشیایی را گروه‌بندی می‌کند که نزدیک‌ترین فاصله را نسبت به یکدیگر دارد (Tullis and Albert 2013).

آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی، یکی از روش‌های تجزیه و تحلیل خوشه‌ای است که نتایج را به صورت یک نمودار درختی نشان می‌دهد. در این روش، ابتدا هر مشاهده داخل یک خوشه قرار می‌گیرد (n خوشه)، در مرحله دوم، دو مشاهده با نزدیک‌ترین فاصله نسبت به یکدیگر، به هم ملحق می‌شود و یک خوشه را تشکیل می‌دهد (n-1 خوشه). این

فرآیند آن قدر تکرار می‌شود تا خوشه‌های ایجاد شده نسبت به هم، کمترین شباهت را داشته باشد (Tullis and Albert 2013). این آنالیز با استفاده از الگوریتم وارد^۵ و روش مربع فاصله اقلیدسی^۶ روی داده‌های مورد مطالعه انجام گرفت.

نتایج حاصل از آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی، به صورت دندروگرام شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، دو گروه اصلی ایجاد شده است که البته در داخل این گروه‌ها، زیرگروه‌هایی نیز مشاهده می‌شود و نتایج این آنالیز تأییدکننده، نتایج آنالیز فاکتوری است. عناصر CaO, MnO, P₂O₅, Y همبستگی قوی را با هم نشان می‌دهند. همبستگی این گروه از عناصر نشان‌دهنده آن است که در سیمان کربناته تمرکز پیدا کرده و از دیاژنز اولیه متأثر شده است. این گروه با گروه عناصر Fe₂O₃, TiO₂, MgO

⁵ Ward

⁶ Squared Euclidean Distance

سنگ مرتبط است. روند تغییرات عناصر اصلی و فرعی نسبت به عمق، در دو منطقه بیداخوید و کوه علوی به طور جداگانه رسم شده است (شکل‌های ۸ و ۹). با توجه به شکل‌های فوق، مقدار اکسید آلومینیوم هم برای ماسه‌سنگ‌ها و هم سیلتستون‌ها در هر دو منطقه مورد مطالعه، نسبتاً ثابت است؛ اما مقدار سیلیس در هر دو منطقه، از طرف ماسه‌سنگ‌ها به سمت سیلتستون‌ها کاهش می‌کند. مقادیر K_2O و Na_2O نیز از روند تغییرات سیلیس تبعیت کرده و در ماسه‌سنگ‌ها بیشتر بوده است و مقدار آن به سمت سیلتستون‌ها کاهش می‌یابد. عناصر فرعی مانند Cr و Rb در دو منطقه مورد مطالعه، روند تغییراتی شبیه سیلیس دارد و مقدار آن‌ها به سمت سیلتستون‌ها کاهش می‌یابد. از طرفی، عناصر مرتبط با سیمان سنگ که شامل: CaO , MnO , MgO , TiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 است (جدول ۷)، از ماسه‌سنگ‌ها به طرف سیلتستون‌ها روند افزایشی دارد. این مقدار افزایشی، هم در سیلتستون‌های منطقه کوه علوی و هم در منطقه بیداخوید مشاهده می‌شود. علاوه بر آن، روند تغییرات عناصر فرعی REE, Y, V, Sc, Zr و Sr در دو منطقه مورد مطالعه نیز شبیه روند تغییرات CaO است و از ماسه‌سنگ‌ها به طرف سیلتستون‌ها افزایش می‌یابد.

نمونه‌برداری از قاعده سازند سنگستان و با ماسه‌سنگ‌ها شروع شده و در پایان با نمونه‌برداری از سیلتستون‌ها پایان یافته است. هرچه به طرف سازند کربناته تفت نزدیک‌تر شویم، ماسه‌سنگ‌های ریزدانه و سیلتستون‌ها تشکیل شده است که نشان‌دهنده افزایش عمق حوضه رسوبی و فاصله از ساحل است؛ بنابراین، ذرات ریزتر و مقاوم‌تر، این فاصله را طی کرده و در حوضه رسوبی ته‌نشست کرده‌اند. در نتیجه، افزایش سیمان در سیلتستون‌ها با افزایش عمق حوضه رسوبی و تأثیر بیشتر فعالیت‌های شیمیایی مرتبط است. در اثر این فعالیت‌ها، عناصر با شدت میدان بالا نیز به همراه اکسیدهای آهن و تیتانیوم، بین ذرات اصلی سنگ قرار گرفته و سیمان

نیز همبستگی نشان می‌دهد. عناصر انتقالی (Ni, V, Sc, Co) با اکسیدهایی مانند TiO_2 و Fe_2O_3 نشان‌دهنده همراهی آن‌ها با اکسیدها است که می‌تواند به صورت ذرات معلق در سطح آن‌ها در حین فرآیندهای ژئوشیمیایی جابه‌جا شوند. همراهی زیرکونیوم و عناصر نادر خاکی نشان‌دهنده آن است که زیرکن، نقش اساسی در تفریق عناصر نادر خاکی دارد. همراهی آن‌ها با اکسید کلسیم نشان‌دهنده آن است که این عناصر در سیمان سنگ‌ها بیشتر یافت می‌شود. اکسیدهای SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O عناصر لیتوفیل یون بزرگ^۷ مانند Cs, Rb, K با هم همبستگی بالایی نشان می‌دهند. همراهی Al_2O_3 با اکسید پتاسیم نشان‌دهنده تأثیر کانی‌های غنی از پتاسیم مثل ایلیت در توزیع آلومینیوم است و اینکه کانی‌های رسی، ترکیب عناصر اصلی را کنترل می‌کند. از طرفی همراهی اکسید سدیم با اکسید آلومینیوم در این سنگ‌ها، به وجود سدیم در ساختار آلومینوسیلیکات‌ها برمی‌گردد. همراهی سیلیس با اکسید آلومینیوم نشان‌دهنده آن است که فلدسپات‌ها و سیلیس، از کانی‌های اصلی سنگ بوده و جزء سیمان آن قرار نگرفته است.

همان‌طور که مشاهده شد، دو گروه عناصر مرتبط با اجزای اصلی ماسه‌سنگ‌ها و عناصر مرتبط با سیمان آن‌ها، با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره به خوبی تفکیک شدند. به‌منظور بررسی روند این عناصر در ماسه‌سنگ‌ها، سیلتستون‌ها، ارتباط بین عمق حوضه رسوبی و نحوه تشکیل رسوبات در سازند سنگستان، روند تغییرات عمقی عناصر مطالعه می‌شود.

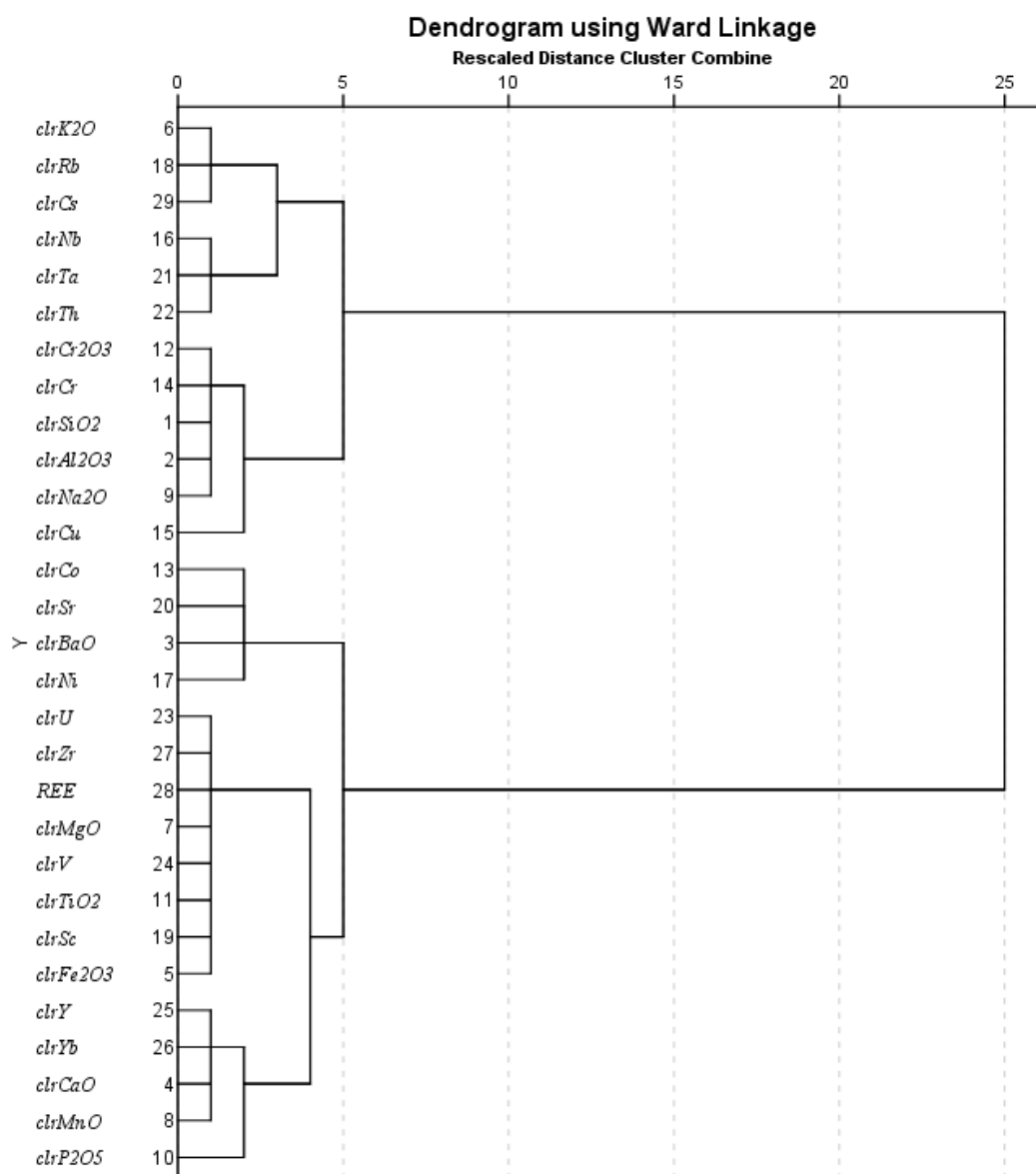
روند تغییرات عناصر

با استفاده از آنالیزهای چندمتغیره، عناصر به دو گروه عناصر مرتبط با سیمان سنگ و عناصر مرتبط با اجزای اصلی سنگ تقسیم شد. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، عناصر

⁷ Large Ion Lithophile Elements (LILE)

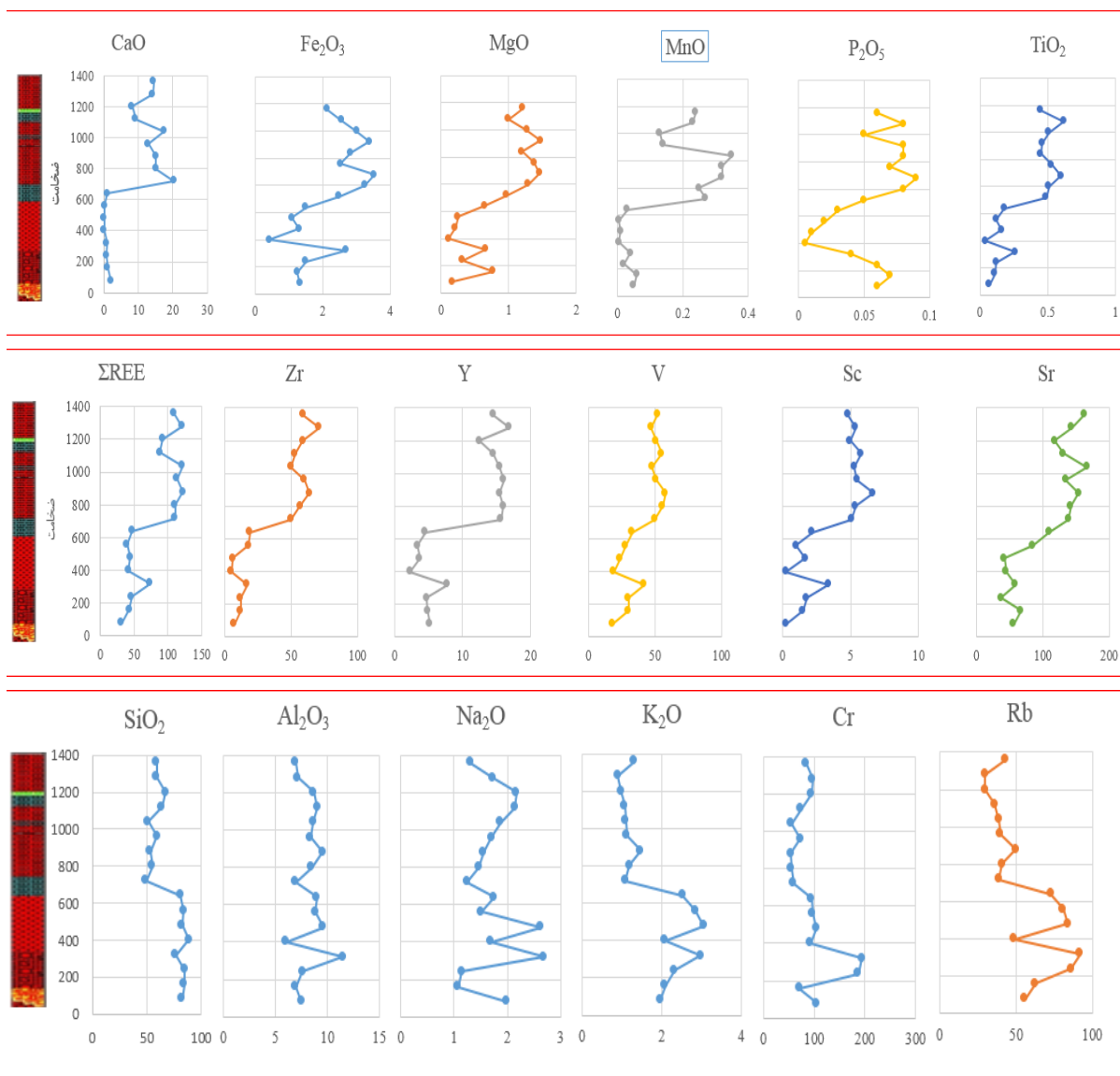
آنالیزهای چندمتغیره و سنگ‌شناسی نیز مشاهده شد، این عناصر همراه با سیمان تشکیل شده است؛ بنابراین، می‌توان چنین تفسیر کرد که احتمالاً زمان تشکیل سیلتستون‌ها و افزایش مقدار سیمان بین آن‌ها، مقارن با بازشدگی بیشتر حوضه، گسترش ریفت، افزایش عمق آن و افزایش فعالیت‌های شیمیایی و فیزیکی است.

سنگ را تشکیل داده‌اند. در این مرحله از تکامل حوضه رسوبی، عناصر انتقالی مثل Ni و Co احتمالاً به صورت بار معلق، REE ها، احتمالاً به علت شروع فعالیت‌های هیدروترمالی از طریق بازشدگی‌های عمیق پوسته‌ای، در سیستم ریفت درون قاره‌ای احتمالی در این زمان، به همراه عنصر تخریبی مانند Zr به علت مقاومت بالا در حوضه تشکیل شده است (Chen and Robertson 2020). همان‌طور که در نتایج



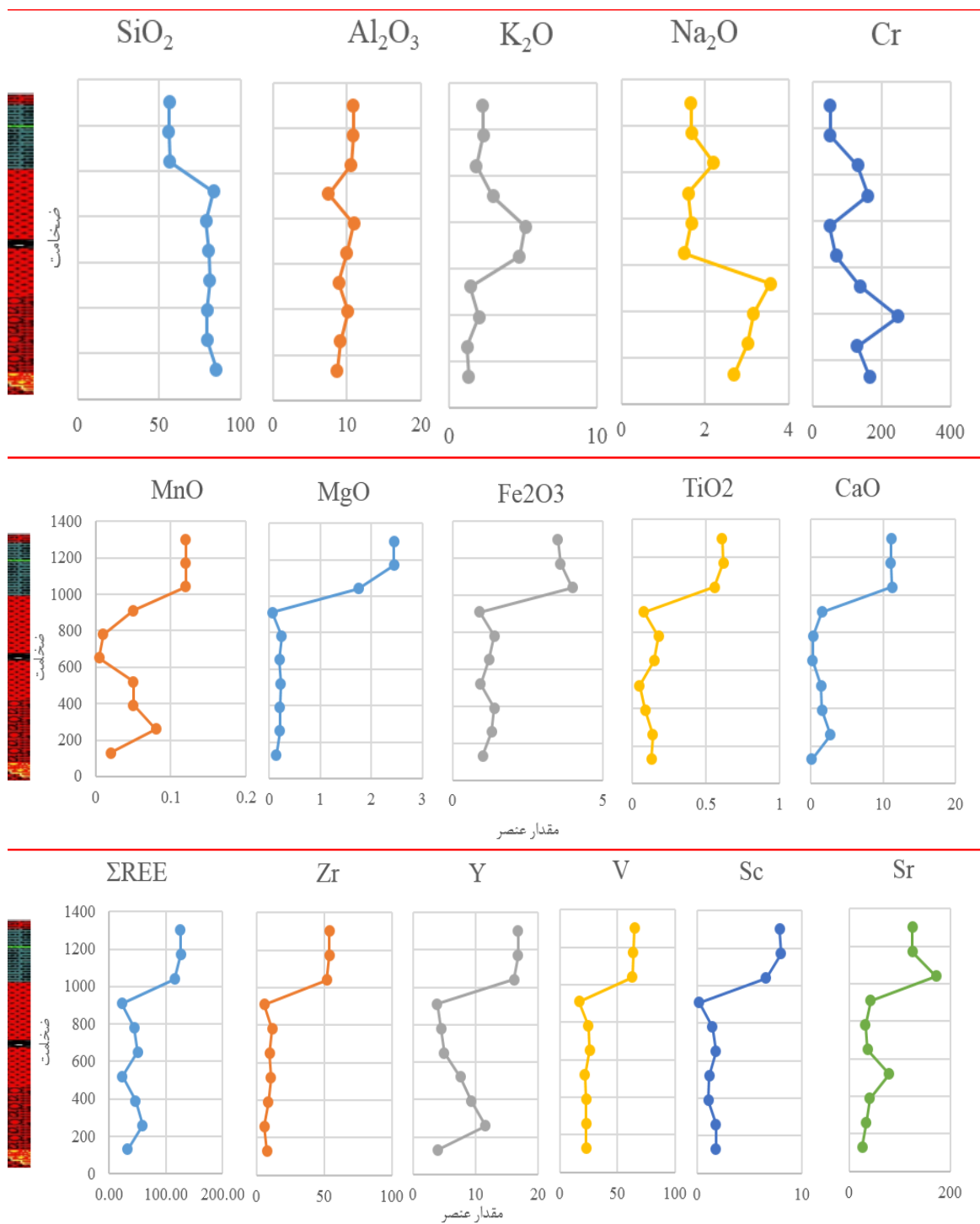
شکل ۸- دندروگرام حاصل از روش آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی بر روی رسوبات سیلیسی آواری سازند سنگستان

Fig 8- The dendrogram obtained from the hierarchical cluster analysis on siliciclastic sediments of Sangestan Formation



شکل ۹- روند تغییرات عمقی عناصر اصلی و فرعی در ماسه‌سنگ‌ها و سیلتستون‌ها در منطقه کوه علوی

Fig 9- Depth change trends of major and trace elements in sandstones and siltstones in the Alavi Mountain region



شکل ۱۰- روند تغییرات عناصر اصلی و فرعی در ماسه‌سنگ‌ها و سیلتستون‌ها در منطقه بیداکوید

Fig 10- Depth change trends of major and trace elements in sandstones and siltstones in the Bidakhavid area

مقدار CaO^* ماسه‌سنگ‌ها کمتر از مقدار Na_2O و برعکس مقدار آن در سیلتستون‌ها بیشتر به دست آمد. از این‌رو، برای ماسه‌سنگ‌ها مقدار CaO^* محاسبه شده است و برای سیلتستون‌ها مقدار Na_2O مولی در نظر گرفته شد.

اندیس‌های هوازُدگی، برای نمونه‌های سیلیسی آواری سازند سنگستان محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۹ مشاهده می‌شود. مقادیر شاخص‌های فوق، در محدوده کمتر از ۷۵ قرار داشته و نشان‌دهنده آن است که سنگ‌های منشأ، دچار هوازُدگی با شدت کم تا متوسط شده است. مقادیر این اندیس‌ها برای نمونه‌های ماسه‌سنگی و سیلتستونی در هر دو منطقه مورد مطالعه، نزدیک به هم است که نشان‌دهنده شرایط آب و هوایی یکسان در هنگام تشکیل آن‌ها بوده است.

علاوه بر آن، شرایط آب‌وهوایی دیرینه را می‌توان از طریق نمودار مثلثی $Al_2O_3-(CaO+Na_2O)-K_2O$ (A-CN-K) ارزیابی کرد (Nesbitt and Young 1984). در این نمودار، سنگ‌های غیر هوازده در زیر خط اتصال پلاژیوکلاز-فلدسپات قرار می‌گیرد. نمودار فوق، برای نمونه‌های سیلیسی آواری سازند سنگستان رسم شده است و در شکل ۱۱ نمایش داده شد. همان‌گونه در این شکل مشاهده می‌شود، نمونه‌ها نزدیک به خط اتصال پلاژیوکلاز-فلدسپات قرار گرفته و قسمت مرکزی آن را اشغال کرده است که نشان‌دهنده شرایط هوازُدگی ضعیف است؛ البته میزان هوازُدگی نمونه‌های ماسه‌سنگی، کمی نسبت به نمونه‌های سیلتستونی بیشتر است. این نتیجه با استفاده از نمودار ارائه شده توسط Suttner and Dutta 1986 برای تعیین آب‌وهوای گذشته نیز در تطابق است که نمونه‌های سیلتستونی در محدوده آب‌وهوای خشک و نمونه‌های ماسه‌سنگی در محدوده آب‌وهوای خشک تا کمی مرطوب قرار گرفت (شکل ۱۲).

محاسبه میزان هوازُدگی و تفسیر شرایط آب‌وهوایی دیرینه

ترکیب کانی‌شناسی و ژئوشیمی عناصر اصلی، از شدت هوازُدگی سنگ منشأ، اثر می‌پذیرد که نشان‌دهنده شرایط آب‌وهوایی است (Sci et al. 2019). به عبارت دیگر، بلوغ کانی‌های رسوبات با فرآیندهای هوازُدگی کنترل می‌شود؛ در حالی که، درجه تبدیل کانی‌های فلدسپات به کانی‌های رسی، در ارتباط با شرایط آب‌وهوایی قدیمی، هوازُدگی و رخداد‌های تکتونیکی است (Hou et al. 2018)؛ بنابراین، لازم است شاخص‌های دگرسانی پلاژیوکلازها^۸ (PIA (Fedo et al. 1995)، شاخص دگرسانی شیمیایی^۹ CIA (Nesbitt and Young 1982)، شاخص هوازُدگی شیمیایی^{۱۰} CIW (Harnois 1988) برای بررسی میزان هوازُدگی محاسبه شوند. مقادیر بالای اندیس‌ها (۷۵-۱۰۰) نشان‌دهنده هوازُدگی شدید است؛ در حالی که، هوازُدگی با شدت کم، در مقدار اندیس کمتر از ۶۰ مشاهده می‌شود (Zaid et al. 2015). این اندیس‌ها با رابطه‌های ۲ تا ۴ محاسبه می‌شود.

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O} \times 100 \quad (2)$$

$$PIA = \frac{Al_2O_3 - K_2O}{Al_2O_3 - K_2O + CaO^* + Na_2O} \times 100 \quad (3)$$

$$CIW = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + Na_2O + CaO^*} \times 100 \quad (4)$$

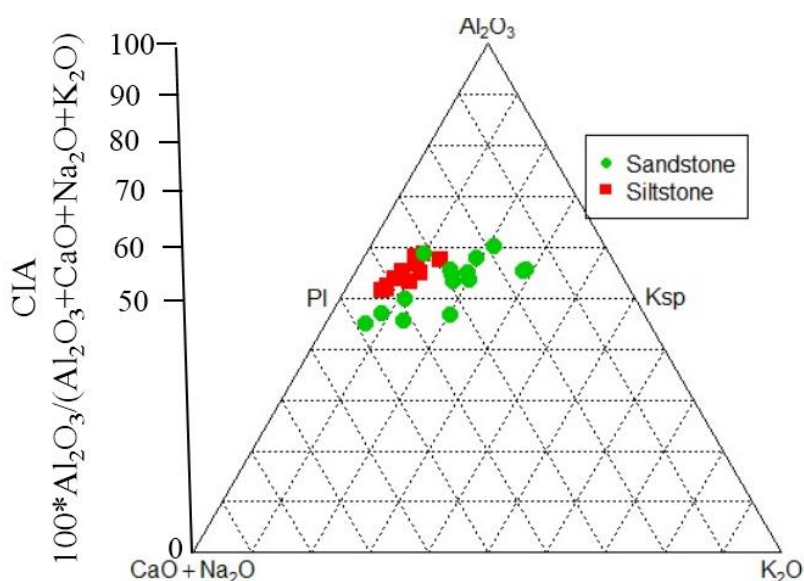
$$CaO^* = (MoleCaO - MoleP_2O_5 \times \frac{10}{3}) \quad (5)$$

در این محاسبه، CaO^* مقدار کلسیت در ارتباط با فاز سیلیکاته سنگ است؛ اما CaO در سیمان و خرده‌سنگ‌های کربناته نیز وجود دارد؛ بنابراین، مقدار CaO در فاز سیلیکاته با استفاده از مقدار P_2O_5 و رابطه ۵ محاسبه شد. اگر این مقدار کمتر از مقدار Na_2O بود، مقدار CaO موجود در شبکه سیلیکات‌ها محاسبه شده است؛ ولی اگر مقدار آن بیشتر از مقدار Na_2O بود، مقدار CaO^* معادل Na_2O در نظر گرفته می‌شود (McLennan 1993). برای نمونه‌های مورد مطالعه،

⁸ Plagioclase Index of Alteration

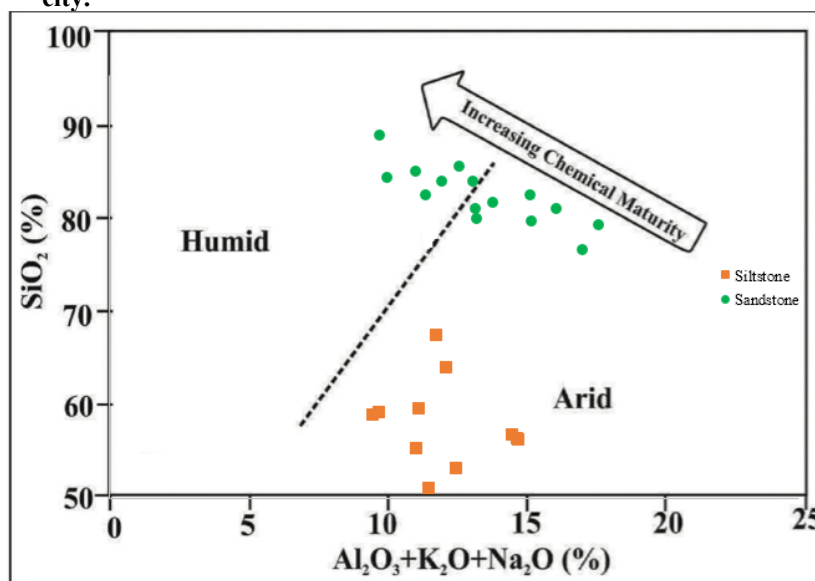
⁹ Chemical Index Alteration

¹⁰ chemical index of weathering



شکل ۱۱- نمودار مثلثی $Al_2O_3-(CaO+Na_2O)-K_2O$ (A-CN-K) نمونه‌های سیلیسی آواری سازند سنگستان در جنوب غربی شهر یزد (Nesbitt and Young 1984). PI: پلاژیوکلاز، Ksp: فلدسپات پتاسیم

Fig 11- The triangle plot (A-CN-K) $Al_2O_3-(CaO+Na_2O)-K_2O$ of siliciclastic samples of Sangestan formation in the southwest of Yazd city.

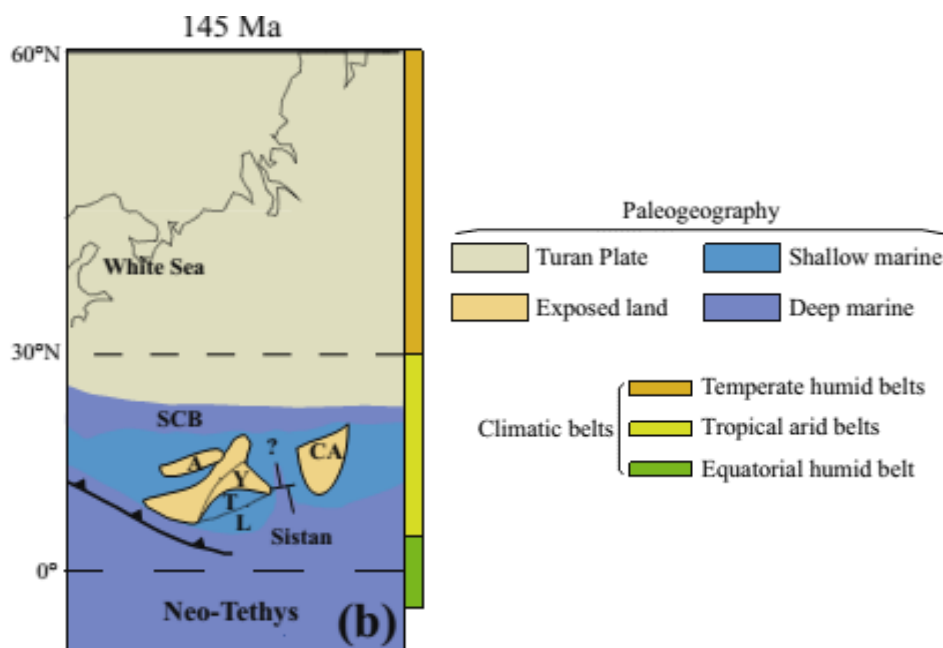


شکل ۱۲- نمایش شرایط آب‌وهوایی نمونه‌های سیلیسی آواری سازند سنگستان در زمان ته‌نشینی سنگ‌ها در مناطق مورد مطالعه (Suttner and Dutta 1986)

Fig 12- Climate conditions of siliciclastic samples of Sangestan formation in the deposition time of rocks

داده است. نتایج پالئومغناطیسی نشان داده است که بلوک یزد از لحاظ آب‌وهوایی، در کمربند خشک گرمسیری در زمان ژوراسیک پسین- کرتاسه پیشین قرار داشته است (شکل ۱۳).

نتایج آب‌وهوای دیرینل به‌دست‌آمده از رسوبات سیلیسی آواری سازند سنگستان، در تطابق با نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات پالئومغناطیسی است که Mattei et al. 2015 انجام



شکل ۱۳- بازسازی جغرافیای قدیمی خرده قاره ایران مرکزی (بلوک‌های لوت، طیس و یزد) در زمان کرتاسه پیشین (Mattei et al. 2015). Y: بلوک یزد، T: بلوک طیس، L: بلوک لوت، A: البرز، SCB: حوضه خزر جنوبی، CA: افغانستان مرکزی

Fig 13- The reconstruction of Central East Iranian Microcontinent including Lut, Tabas, and Yazd blocks in the early Cretaceous.

جدول ۹- مقادیر شاخص‌های هوازدگی رسوبات سیلیسی آواری سازند سنگستان در برش‌های بیداکوید و کوه علوی

Table 9- The weathering index Values of siliciclastic sediments of Sangestan Formation in Bidakhvid and Alavi Mountain sections

منطقه بیداکوید				Rock type	منطقه کوه علوی				Rock type
CIW	PIA	CIA	Sample		CIW	PIA	CIA	Sample	
58.48	44.81	46.67	SA-B-6	ماسه سنگ	65.67	57.61	54.77	SA-A-14	
77.44	63.30	55.48	SA-B-7		76.14	68.18	60.21	SA-A-15	
77.93	63.76	55.60	SA-B-8		68.07	58.98	55.10	SA-A-16	
51.49	47.20	47.20	SA-B-11		67.10	56.78	53.61	SA-A-17	
56.21	50.64	50.09	SA-B-13		66.12	58.95	55.75	SA-A-18	
48.21	44.67	45.03	SA-B-15	71.81	63.55	58.08	SA-A-19		
65.23	61.73	58.86	SA-B-16	64.73	55.73	53.50	SA-A-20		
66.40	60.82	57.71	SH-B-1	سیلتستون	52.40	44.48	45.63	SA-A-21	
66.29	60.61	57.53	SH-B-2		61.82	56.71	54.91	SH-A-2	
59.27	54.46	53.25	SH-B-5		55.74	52.50	51.81	SH-A-3	
					54.95	52.11	51.50	SH-A-4	
					56.21	53.20	52.43	SH-A-5	
					58.25	54.98	53.91	SH-A-7	
					59.92	56.50	55.14	SH-A-8	
					65.11	61.25	58.74	SH-A-10	
					63.68	60.16	58.05	SH-A-12	
				62.79	58.76	56.77	SH-A-13		

نتیجه

سازند سنگستان به همراه سازندهای تفت و دره زنجیر، توالی کرتاسه پیشین را در حوضه جنوب یزد تشکیل می‌دهد. سازند سنگستان از رسوبات سیلیسی آواری و به میزان خیلی کم، از سنگ‌های کربناته تشکیل شده است. به منظور شناسایی دقیق سنگ‌های تشکیل‌دهنده این سازند و محیط تشکیل آن‌ها، نمونه‌برداری از رسوبات سیلیسی آواری آن و مطالعات کانی‌شناسی و ژئوشیمی صورت گرفته است. براساس نتایج مطالعات آنالیز دانه‌شماری، نوع ماسه‌سنگ‌های آن، آرکوز و رسوبات ریزدانه نیز سیلتستون تشخیص داده شد. نتایج آنالیز فاکتوری و خوشه‌ای نیز تمایزدهنده عناصر مرتبط با سیمان سنگ‌ها و عناصر مرتبط با اجزای اصلی سنگ‌ها است. عناصر مرتبط با سیمان سنگ هم در سیلتستون‌های منطقه بیداخوید و هم در منطقه کوه علوی دارای بار مثبت بالا است و در مقابل، ماسه‌سنگ‌ها نیز در هر دو منطقه دارای بار مثبت بالا از عناصر مرتبط با اجزای اصلی سنگ‌ها است. این مسئله نشان‌دهنده آن است که منشأ سیلتستون‌ها و ماسه‌سنگ‌ها در هر دو منطقه مورد مطالعه شبیه هم است. تغییرات عناصر نشان داد که هم‌زمان با تشکیل سیلتستون‌ها، عناصر مرتبط با سیمان نیز افزایش پیدا کرد که می‌تواند با افزایش عمق حوضه رسوبی، بازشدگی‌های عمیق پوسته‌ای در کف حوضه رسوبی، گسترش ریفت درون‌قاره‌ای در این زمان و ورود موارد هیدروترمالی از عمق بازشدگی‌ها به کف حوضه مرتبط باشد. علاوه بر آن، مقادیر اندیس‌های هوازدگی نشان داد که تشکیل سیلتستون‌ها و ماسه‌سنگ‌ها در شرایط آب و هوایی مشابهی در کمرند خشک گرمسیری رخ داده است.

References

- Trough north-eastern Nigeria: implications for provenance, tectonic setting and palaeoweathering. *SN Applied Sciences* 1(10): 1149.
- Aitchison J. and Egozcue J.J. 2005. Compositional data analysis: where are we and where should we be heading? *Mathematical Geology* 37(7): 829-850.
- Alavi M. 1991. Tectonic map of the Middle East 1:5000000. Geological Survey of Iran Tehran.
- Armstrong-Altrin J.S. Machain-Castillo M.L. Rosales-Hoz L. Carranza-Edwards A. Sanchez-Cabeza J.-A. and Ruíz-Fernández A.C. 2015. Provenance and depositional history of continental slope sediments in the southwestern Gulf of Mexico unraveled by geochemical analysis. *Continental Shelf Research*, 95: 15-26.
- Az-Mikaelians H. Ashja-Ardalan A. Sheikhzakariayi S.-J. and Ansri S. 2020. Introducing the main and accessory minerals in the granitoid batholith of Shirkuh, Yazd (Central Iran) and its tourmaline and garnet phases. *Geosaberes*, 11: 75-103.
- Buccianti A. and Grunsky E. 2014. Compositional data analysis in geochemistry: Are we sure to see what really occurs during natural processes?. *Journal of Geochemical Exploration* 141:1-5.
- Chen G. and Robertson A.H.F. 2020. User's guide to the interpretation of sandstones using whole-rock chemical data, exemplified by sandstones from Triassic to Miocene passive and active margin settings from the southern Neotethys in Cyprus. *Sedimentary Geology*, 400: 105616.
- Etesampour A. Mahboubi A. Moussavi-Harami R. Arzani N. and Salehi M.A. 2019. Sandstone petrography and geochemistry of the Nayband Formation (Upper Triassic, Central Iran): Implications for sediment provenance and tectonic setting. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 112(1): 20-41.
- Fedo C. Nesbitt H. and Young G. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23: 921-924.
- Folk R.L. 1980. *Petrology of sedimentary rocks*: Hemphill Publishing Company, 182p.
- Ghorbani M. 2019. *Lithostratigraphy of Iran*: Springer International Publishing, 567p.
- Haj Mola ali A. and Majidifard M.R. 2000. Explanatory text of Yazd. Geological Quadrangle Map 1: 100000. Geological Survey of Iran Tehran.
- Hajmolla- ali A. 1993. Explanatory text of Khezr Abad. Geological Quadrangle Map 1: 100000. Geological Survey of Iran Tehran.
- Abbaszadeh S. Mojtahedzadeh S.H. Ansari A. and Verma S.P. 2021. New evidence of Early Cretaceous basaltic eruption in the Sangestan Formation: Geochemistry, Petrology, and Tectonic Setting in Central Iran. (in review).
- Abubakar U. Usman M.B. Bello A.M. Garba T.A. and Hassan S. 2019. Geochemical and palaeocurrent analysis of the Tertiary Kerri-Kerri Formation in the Gongola Sub-Basin of the northern Benue

- Mountains. *Journal of Asian Earth Sciences*, 102: 92-101.
- McLennan S.M. 1993. Weathering and global denudation. *The Journal of Geology*, 101(2): 295-303.
- Meigoony M.S. Afzal P. Gholinejad M. Yasrebi A.B. and Sadeghi B. 2014. Delineation of geochemical anomalies using factor analysis and multifractal modeling based on stream sediments data in Sarajeh 1: 100,000 sheet, Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(12): 5333-5343.
- Moallemi S. Salehi M. and Zohdi A. 2017. Geochemistry of the Razak Formation Sandstones, southeastern Zagros Sedimentary Basin: Implications for tectonic setting, parent rocks and palaeoweathering. *Geoscience Journal*, 26(103): 265-286 (in persian).
- Mojtahadzadeh S.H. 2002. Mehdiabad, a SEDEX-type Pb-Zn deposit in Yazd, Central Iran: Geology and Geochemistry. (unpublished PhD thesis). Tsukuba University. Japan, 233p.
- Nabavi M. 1972. Explanatory text of Abadeh. Geological Quadrangle Map 1: 250000. Geological Survey of Iran Tehran.
- Nesbitt H. and Young G. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715-717.
- Nesbitt H.W. and Young G.M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1523-1534.
- Nowrouzi Z. Moussavi-Harami R. Mahboubi A. Gharraie M.H.M. and Ghaemi F. 2014. Petrography and geochemistry of Silurian Niur Sandstones, Derenjal Mountains, east Central Iran: implications for tectonic setting, provenance and weathering. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(7): 2793-2813.
- Ohta T. 2004. Geochemistry of Jurassic to earliest Cretaceous deposits in the Nagato Basin, SW Japan: implication of factor analysis to sorting effects and provenance signatures. *Sedimentary Geology*, 171(1-4): 159-180.
- Okon E. Essien N. and Adeyemi G. 2017. Geochemistry of sandstones of Awi Formation, southeastern Nigeria: Implications for weathering, provenance and tectonic settings. *International Journal of Science and Technology*, 6(4): 742-755.
- Parto Azar H. and Aboutorab F. 1981. Mesozoic stratigraphy in Taft area, Central Iran. *Internal Journal*, 30 P (in persian).
- Patra A. and Shukla A.D. 2020. Geochemical signatures of Late Paleocene sandstones from the
- Haque M.M. and Roy M.K. 2020. Sandstone-shale geochemistry of Miocene Surma Group in Bandarban Anticline, SE Bangladesh: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting. *Earth*, 9(1): 38-51.
- Harnois L. 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 55(3): 319-322.
- Haruna K. and Ojo O. 2019. Major and trace element evaluation of the Campano-Maastrichtian sediments of Anambra Basin exposed around Enugu, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(1): 111-119.
- Herron M.M. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Research*, 58(5): 820-829.
- Hou Q. Mou C. Wang Q. Tan Z. Ge X. and Wang X. 2018. Geochemistry of sandstones from the Silurian Hanxia Formation, north Qilian Belt, China: implication for provenance, weathering and tectonic Setting. *Geochemistry International*, 56(4): 362-377.
- Khan Z. Quasim M. Amir M. and Ahmad A. 2019. Provenance, tectonic setting, and source area weathering of Middle Jurassic siliciclastic rocks of Chari Formation, Jumara Dome, Kachchh Basin, western India: Sedimentological, mineralogical, and geochemical constraints. *Geological Journal*, 55(5):3537-3558.
- Khosro Tehrani K. and Vaziri-Moghadam H. 1993. Stratigraphy of Lower Cretaceous rocks, west and S.W. of Yazd (Central Iran). *Earth Science Journal of Iran*. 2(7): 35-45.(in persian).
- Maghfouri S. and Hosseinzadeh M.R. 2018. The Early Cretaceous Mansourabad shale-carbonate hosted Zn-Pb (-Ag) deposit, central Iran: An example of vent-proximal sub-seafloor replacement SEDEX mineralization. *Ore Geology Reviews*, 95: 20-39.
- Maghfouri S. Hosseinzadeh M.R. Choulet F. Alfonso P. Zadeh A.M.A. and Rajabi A. 2019. Vent-proximal sub-seafloor replacement clastic-carbonate hosted SEDEX-type mineralization in the Mehdiabad world-class Zn-Pb(-Ba)-Cu-Ag deposit, southern Yazd Basin, Iran. *Ore Geology Reviews*, 113: 103047.
- Maghfouri S. Hosseinzadeh M.R. Lentz D. and Choulet F. 2020. Geological and geochemical constraints on the Farahabad vent-proximal sub-seafloor replacement SEDEX-type deposit, southern Yazd basin, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 209: 106436.
- Mattei M. Cifelli F. Muttoni G. and Rashid H. 2015. Post-Cimmerian (Jurassic-Cenozoic) paleogeography and vertical axis tectonic rotations of Central Iran and the Alborz

- Suttner L.J. and Dutta P.K. 1986. Alluvial sandstone composition and paleoclimate; I, Framework mineralogy. *Journal of Sedimentary Research*, 56(3): 329-345.
- Tullis T. and Albert B. 2013. Chapter 9 - Special Topics. In T. Tullis & B. Albert (Ed.). *Measuring the User Experience (Second Edition)*. Boston: Morgan Kaufmann. 209-236 p.
- Wang B.-Q. Wang W. and Zhou M.-F. 2013. Provenance and tectonic setting of the Triassic Yidun Group, the Yidun Terrane, Tibet. *Geoscience Frontiers*, 4(6): 765-777.
- Wilmsen M. Fürsich F.T. and Majidifard M.R. 2015. An overview of the Cretaceous stratigraphy and facies development of the Yazd Block, western Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 102: 73-91.
- Xu K. Ding F. Li Q. Xie X. Yang L. Li Y. and Dong B. 2019. Petrology and geochemistry of Upper Jurassic Weimei Formation sandstones in southern Tibet: implications for provenance and tectonic setting. *Geosciences Journal*, 23(5): 767-790.
- Zaid S.M. and Al Gahtani F. 2015. Provenance, diagenesis, tectonic setting, and geochemistry of Hawkesbury Sandstone (Middle Triassic), southern Sydney Basin, Australia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 24(1): 72-98.
- Zaid S.M. El Badry O. Ramadan F. and Mohamed M. 2015. Petrography and geochemistry of Pharaonic sandstone monuments in Tall San Al Hagr, Al Sharqiya Governorate, Egypt: implications for provenance and tectonic setting. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 24(4): 344-364.
- Zand-Moghadam H. Jafarzadeh M. Moussavi-Harami R. and Mahboubi A. 2018. Petrography and geochemistry of the Upper Jurassic siliciclastic rocks equivalent to the Mozduran Gas Reservoir in the eastern Kopet-Dagh Basin, NE Iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 29(2): 157-171.
- Zhou S. Zhou K. Wang J. Yang G. and Wang S.-S. 2018. Application of cluster analysis to geochemical compositional data for identifying ore-related geochemical anomalies. *Frontiers of Earth Science*, 12(3): 491-505.
- Sanu Formation, Jaisalmer basin, western India: Implication for provenance, weathering and tectonic setting. *Journal of Earth System Science*, 129(1): 1-12.
- Periasamy V. and Venkateshwarlu M. 2017. Petrography and geochemistry of Jurassic sandstones from the Jhuran Formation of Jara dome, Kachchh basin, India: Implications for provenance and tectonic setting. *Journal of Earth System Science*, 126(3): 44.
- Reimann C. Filzmoser P. and Garrett R.G. 2002. Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 17(3): 185-206.
- Safaei M. Mahboubi A. Modabberi S. and Moussavi-Harami R. 2020. Palaeoenvironment, sequence stratigraphy and palaeogeography of the Lower Cretaceous deposits of Mehdi Abad, Yazd Block, Central Iran. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 295(1): 61-89.
- Salehi M.A. Moussavi-Harami S.R. Mahboubi A. Wilmsen M. and Heubeck C. 2014. Tectonic and palaeogeographic implications of compositional variations within the siliciclastic Ab-Haji Formation (Lower Jurassic, east-Central Iran). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 271(1): 21-48.
- Sci T. Sengun F. and Koralay O. 2019. Petrography, geochemistry, and provenance of Jurassic sandstones from the Sakarya Zone, NW Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 28: 603-622.
- Shadan M. and Hosseini-Barzi M. 2013. Petrography and geochemistry of the Ab-e-Haji Formation in Central Iran: implications for provenance and tectonic setting in the southern part of the Tabas block. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30(1): 80-95.
- Sheibi M. Bouchez J.-L. Esmaily D. and Siqueira R. 2012. The Shir-Kuh pluton (Central Iran): Magnetic fabric evidences for the coalescence of magma batches during emplacement. *Journal of Asian Earth Sciences*, 46: 39-51.
- Somasekhar V. Ramanaiah S. and Sarma D.S. 2018. Geochemical characterization of the siliciclastic rocks of Chitravati Group, Cuddapah Supergroup: Implications for provenance and depositional environment. *Journal of Earth System Science*, 127(4): 54.