

Research Article

Mineral Chemistry of pyroxene and plagioclase in determining the tectonic origin and geothermometry of Haidari magmatic rocks, north of Shahrekord, Sanandaj-Sirjan Zone

Maryam Ahankoub^{1*}, Esmail Elahpour¹

1- Department of geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

Keywords: *Pyroxene, plagioclase, thermo-barometry, Haidari, Shahrekord*

1-Introduction

Many researchers have emphasized the relationship between pyroxenes' chemistry composition and the host magma's chemistry composition (La Bas, 1962; Latterier et al., 1982; Beccaluva et al., 1989, 1982). Pyroxene has the general formula $M_2M_1T_2O_6$, where divalent, trivalent, and tetravalent cations occupy M and T positions. The amount of Al depends on the crystallization pressure in pyroxenes, so higher pressure is associated with tetrahedral Al substitution in the pyroxene structure (Putrika et al., 2003) that emphasizes the importance of clinopyroxenes in determining the host rock magmatic series and the tectonic-magmatic situation. On the other hand, the composition of pyroxenes depends on the physical and chemical conditions of magma, such as T, P, and fO_2 . Therefore, pyroxenes can be considered a valuable tool for measuring the physicochemical conditions of magma. Also, plagioclase can provide valuable information regarding determining the processes of crystal growth mechanism, magmatic evolution, and processes related to the magmatic chamber. In this paper, we studied the chemical compositions of some pyroxene and plagioclase in the volcanic rocks from the Heidari area to determine evolution of magma, geological setting, and the physical and chemical conditions of the formation of these minerals in magma.

2-Material and methods

After the field geology of the area was studied, 40 samples of rocks were taken. A thin section was prepared from a fresh and unweathered sample at the University of Isfahan and then was studied petrographically by the Olympus microscope of Payam Noor University of the Shahrekord. Among the studied samples, 12 points for chemistry mineral analysis of plagioclase and 19 points for chemistry mineral analysis of pyroxene were selected and sent to Tehran Binaloud Company to determine the constituent elements of the minerals. The results of chemical mineral analysis are given in Tables 1 and 2. The structural formula of pyroxenes was calculated based on six oxygens, and Minpet software was used in data analysis.

3- Results and discussions

The studied area, near the village of Haidari, is located between longitudes $30^\circ 50'$ to $45^\circ 50'$ and latitudes $30^\circ 32'$ to $45^\circ 32'$ in the 1:250000 geological map of Shahrekord (Zahedi and Ilikhchi, 1996). This area is in the middle of the Sanandaj-Sirjan zone, with outcrops of volcanic and plutonic rocks along the northwest-southeast direction. This region is 10 kilometers away from the central Zagros fault, and It is between the Shida and Dalan faults, so the performance of parallel and intersecting faults with Zagros, which has led to the displacement and creation of joints and cracks in the rock units, can be seen.

Based on field data and petrography, the igneous rocks of the region include andesite, basaltic andesite, basalt, gabbro, and diorite. These stones, with dark to gray colors and prominent outcrops, can be seen at high heights around Haidari village. Plagioclase, pyroxene, amphibole, and olivine are visible in these

* Corresponding author: m.ahankoub@pnu.ac.ir

DOI: 10.22055/aag.2024.45987.2431

Received: 2024-01-30

Accepted: 2024-05-14

rocks. These samples often have a porphyry texture with plagioclase-pyroxene phenocrysts in a fine-grained to medium-grained background of these minerals.

Based on the 12 points of plagioclase analysis, this mineral has the composition of andesine to labradorite An 33-56. These minerals contain CaO (5.99 to 11.22 wt%), Na₂O (4.44 to 6.27 wt%), Al₂O₃ (24.54 to 28.12 wt%), and K₂O (0.16 to 69 wt%).

Also, in all pyroxenes, the amount of Mg is higher than Fe. The CaO is 17.94% to 19.58%. The studied pyroxenes are plotted in the Q-J diagram in the calcium-magnesium-iron pyroxenes range and are sodium-free. Also, these samples are placed in the augite range in the Fs-En-Wo diagram. Based on the general structural formula of this mineral, the studied pyroxenes have a composition of Wo 37.32-40.06 En 43.01-45.61 Fs 13.72- 17.48, with Mg# [Mg 100/ (Mg+Fe)] range 71-78.

The compositions of the pyroxenes on pressure discriminating diagrams (Soesoo, 1997) show a pressure range of 6-10 kbar. There are different methods for determining temperature using the chemistry of pyroxenes (Soesoo, 1997; Bertrand and Marsir, 1985; Nimis and Taylor, 2000). In this paper, the Soesoo (1997) method was used. The calculations were done regarding hydrous pyroxenes indicate the crystallization temperature of this mineral in the range of 1300-1200 degrees Celsius. Based on the studies (Helz, 1973) using the distribution of aluminum in tetrahedral and octahedral positions in clinopyroxenes, the water content of the studied pyroxene samples is high. Also, these samples have high values of oxygen fugacity of the forming magma. High water content in pyroxene samples is consistent with high fugacity values. The amounts of water and oxygen fugacity are indicative of the subduction environment. Also, the samples shows the nature of sub-alkaline and calc-alkaline on the corresponding graphs. The SiO₂ versus Al₂O₃ and Fe versus Si diagrams confirms formation of their parent magma on a the subduction zone setting (Le Bas, 1969; Leterrier et al., 1982).

4-Conclusion

In the middle parts of the Sanandaj area of Sirjan, in the north of Shahrekord and around the village of Heydari, there are a series of igneous rocks from Hadast to Bazin with the combination of andesite to basalt, gabbro, and diorite. In the field survey, these stones have prominent outcrops with gray to brown color and form the highlands. Andesites show the highest extent in comparison with other samples. In petrographic studies, porphyry texture, plagioclase, and pyroxene phenocrysts can be seen in fine-grained to medium-grained plagioclase. Sometimes, oralthization of pyroxenes, saursoritization of plagioclase, and chloritization of biotites occurred. The plagioclase compositions range from andesite to labradorite. Also, the pyroxene compositions indicates they are calcium-magnesium-iron rich and augite type. According to the ratio of Al^{VI} to Al^{IV}, the they formed at medium pressure. Also, the amounts of water and oxygen fugacity during the crystallization of pyroxene-forming magma indicate high oxygen fugacity and pressure of more than 5 kbar. The chemical data of minerals show that the intermediate rocks of the Haidari region were formed at a temperature of 1200 to 1300 degrees Celsius and an average pressure of 6 to 10 kbar. These rocks have a subalkaline (calc-alkaline) nature belonging to the subduction zone.

5-References

- Beccaluva, L., Macciotta, G., Piccardo, G.B., Zeda, O., 1989. Clinopyroxene composition of ophiolite basalts as a petrogenetic indicator. *Chemical Geology* 77, 165-182. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(89\)90073-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(89)90073-9).
- Bertrand, P., Mercier, J. C., 1985. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene:toward an absolute geothermometer for natural system. *Earth and Planetary Science Letters* 76, 109-122. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(85\)90152-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90152-9).
- Helz, R.T., 1973. Phase relations of basalts in their melting range at PH₂O= 5 kb as a function of oxygen fugacity: part I. Mafic phases. *Journal of Petrology* 14, 249-302. <https://doi.org/10.1093/petrology/14.2.249>.
- Le Bas, M.J., 1962. The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage, *American Journal of Science* 260, 267-288. <https://doi.org/10.2475/AJS.260.4.267>.

- Leterrier, J., Maury, R.C., Thonon, P., Girard, D., Marchal, M., 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters* 59 139-154. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90122-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90122-4) .
- Leterrier, J., Maury, R.C., Thonon, P., Girard, D., Marchal, M., 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters* 59, 139-154. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90122-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90122-4).
- Nimis, P., Taylore W.R., 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites; Part I: Calibration and testing of a Crin- Cpx barometer and an Enstatite-in-Cpx thermometer, *Contributions to Mineralogy and Petrology* 139, 544-554. <http://doi.org/10.1007/s004100000156>.
- Putrika, K.D., Mikaelian, H., Ryerson, F., Shaw, H., 2003. New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho. *American Mineralogist* 88, 1542-1554. <https://doi.org/10.2138/am-2003-1017>.
- Soesoo, A., 1997. A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallization P-estimations. *Geological Society of Sweden (Geologiska Föreningen)* 119, 55-60. <http://doi.org/10.1080/11035899709546454>.
- Zahedi, M., Rahmati Ilakhchi, M., 1993. Geology map of the Shahrekord 1:250000, No. E8, Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian).

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Ahankoub, M., Elahpour, E., 2024. Mineral Chemistry of pyroxene and plagioclase in determining the tectonic origin and geothermometry of Haidari magmatic rocks, north of Shahrekord, Sanandaj-Sirjan Zone. *Adv. Appl. Geol.* 14(3), 679-693.

DOI: 10.22055/aag.2024.45987.2431

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_19166.html

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

بررسی شیمی کانی‌های پیروکسن و پلاژیوکلاز در تعیین خاستگاه تکتونیکی و زمین‌دماسنجی سنگ‌های ماگمایی منطقه حیدری، شمال شهر کرد، پهنه سنندج سیرجان

مریم آهنکوب*

گروه زمین شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

اسماعیل اله پور

گروه زمین شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

* m.ahankoub@pnu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

چکیده

منطقه مورد مطالعه از نظر ساختاری در بخش میانی پهنه سنندج-سیرجان و در شمال شهر کرد واقع شده است. در این منطقه مجموعه سنگ‌های ماگمایی بازالت، اندزیت‌بازالتی، آندزیت، گابرو و دیوریت رخمون دارند. بررسی‌های سنگ‌نگاری نمونه‌های حدواسط نشان دهنده حضور کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، اولیون، پیروکسن، آمفیبول و کانی‌های فرعی بیوتیت و اسفن و اوپاک می‌باشد. داده‌های شیمی کانی‌های پیروکسن به حضور کانی اوزیت با ترکیب شیمیایی $40.07 - 37.32 \text{ Wo} - 43.01 - 17.48 \text{ En} - 13.72 \text{ Fs}$ دلالت می‌کند. همچنین پلاژیوکلازها دارای ترکیب شیمیایی $4.9 - 0.98 \text{ Or} - 62.71 - 41.08 \text{ Ab} - 57.01 - 33.17 \text{ An}$ و از نوع آندزین تا لابرادوریت می‌باشند. نتایج دما و فشارسنجی بر اساس ترکیب کلینوپيروكسن‌ها نشان می‌دهند که این کانی‌ها در دمای ۱۲۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و گستره فشار ۶ تا ۱۰ تبلور یافته‌اند. نتایج شیمی کانی کلینوپيروكسن‌های سنگ‌های ماگمایی منطقه حیدری نمایانگر ماهیت کالک‌آلکان این نمونه‌ها مرتبط با پهنه فرورانش می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پیروکسن، پلاژیوکلاز، دما فشارسنجی، حیدری، شهر کرد.

۱- مقدمه

پژوهشگران زیادی به ارتباط ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها و ترکیب شیمیایی ماگمای میزبان تأکید کرده‌اند (Le Bas, 1962; Leterrier et al., 1982; Beccaluva et al., 1989). فرمول عمومی پیروکسن‌ها $M_2M_1T_2O_6$ می‌باشد که جایگاه‌های M و T توسط کاتیون‌های دو و سه و چهار ظرفیتی اشغال می‌شود. در پیروکسن‌ها میزان آلومینیم به فشار تبلور بستگی دارد به طوری که فشار بیشتر با جایگزینی آلومینیم تتراندری در ساختار پیروکسن همراه است (Putirka et al., 2003). این امر اهمیت کلینوپيروكسن‌ها در تعیین سری ماگمایی سنگ میزبان و تعیین موقعیت زمین‌ساخت-ماگمایی را بسیار پررنگ می‌کند. از سوی دیگر ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها به شرایط فیزیکی و شیمیایی ماگما مانند دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن بستگی است. بنابراین پیروکسن‌ها می‌تواند به عنوان ابزار ارزشمندی برای سنجش شرایط فیزیکی و شیمیایی ماگما به شمار می‌رود. همچنین پلاژیوکلاز می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در خصوص در تعیین فرایندهای ساز و کار رشد بلوری، تکامل ماگمایی و فرایندهای مرتبط با اتاق ماگمایی ارائه دهد

(Morimoto, 1988; Aoki and Shiba, 1973; Soesoo, 1997; Bertrand and Marsir, 1985; Nimis and Taylor, 2000). در این نوشتار با توجه به عدم مطالعات مینرال شیمی بر روی کانی‌های پیروکسن و پلاژیوکلاز در سنگ‌های ولکانیک منطقه مورد مطالعه و فراوانی کلینوپيروكسن‌ها و پلاژیوکلاز در نمونه‌های مورد مطالعه و همچنین دگرسانی بسیار اندک آنها، به کمک ترکیب شیمیایی آنها به بررسی شیمی کانی، دما- فشارسنجی، محیط زمین‌ساختاری و شرایط فیزیکی و شیمیایی حاکم بر شکل‌گیری این کانی‌ها پرداخته شده است.

۲- زمین‌شناسی

۲-۱- زمین‌شناسی عمومی

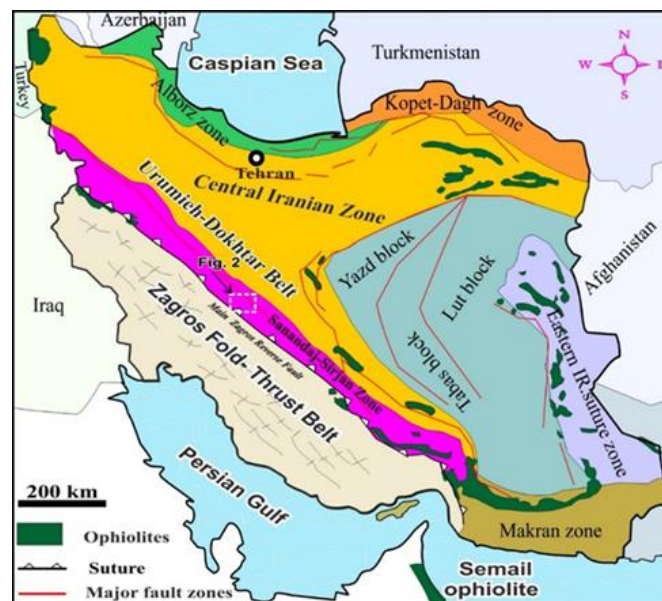
منطقه مورد مطالعه، در نزدیکی روستای حیدری، بین طول‌های جغرافیایی $30^{\circ} 50'$ تا $45^{\circ} 50'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $30^{\circ} 32'$ تا $45^{\circ} 32'$ شمالی، در نزدیکی روستای حیدری و در چهارگوشه نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ شهر کرد واقع شده است (Zahedi and Rahmati Ilikhchi, 1993) (شکل ۱ و ۲). این منطقه از نظر زمین‌ساختاری در بخش میانی پهنه سنندج-سیرجان بوده که دارای رخمون‌های از سنگ‌های ولکانیک و پلوتونیک با امتداد شمال غرب -

قسمت‌ها مجموعه‌های ولکانیکی دارای شواهد کانه‌زایی طلا و مس می‌باشند به طوریکه Ahankoub و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی این اندیس‌ها پرداخته‌اند. در منطقه مورد مطالعه منطقه سنگ‌های مافیک تا حدواسط به صورت رخنمون‌های درونی و نیمه عمیق و بیرونی به وضوح قابل رویت هستند. این سنگ‌ها با مجموعه کانی‌های پیروکسن و پلاژیوکلاز مشخص می‌شوند.

۲-۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

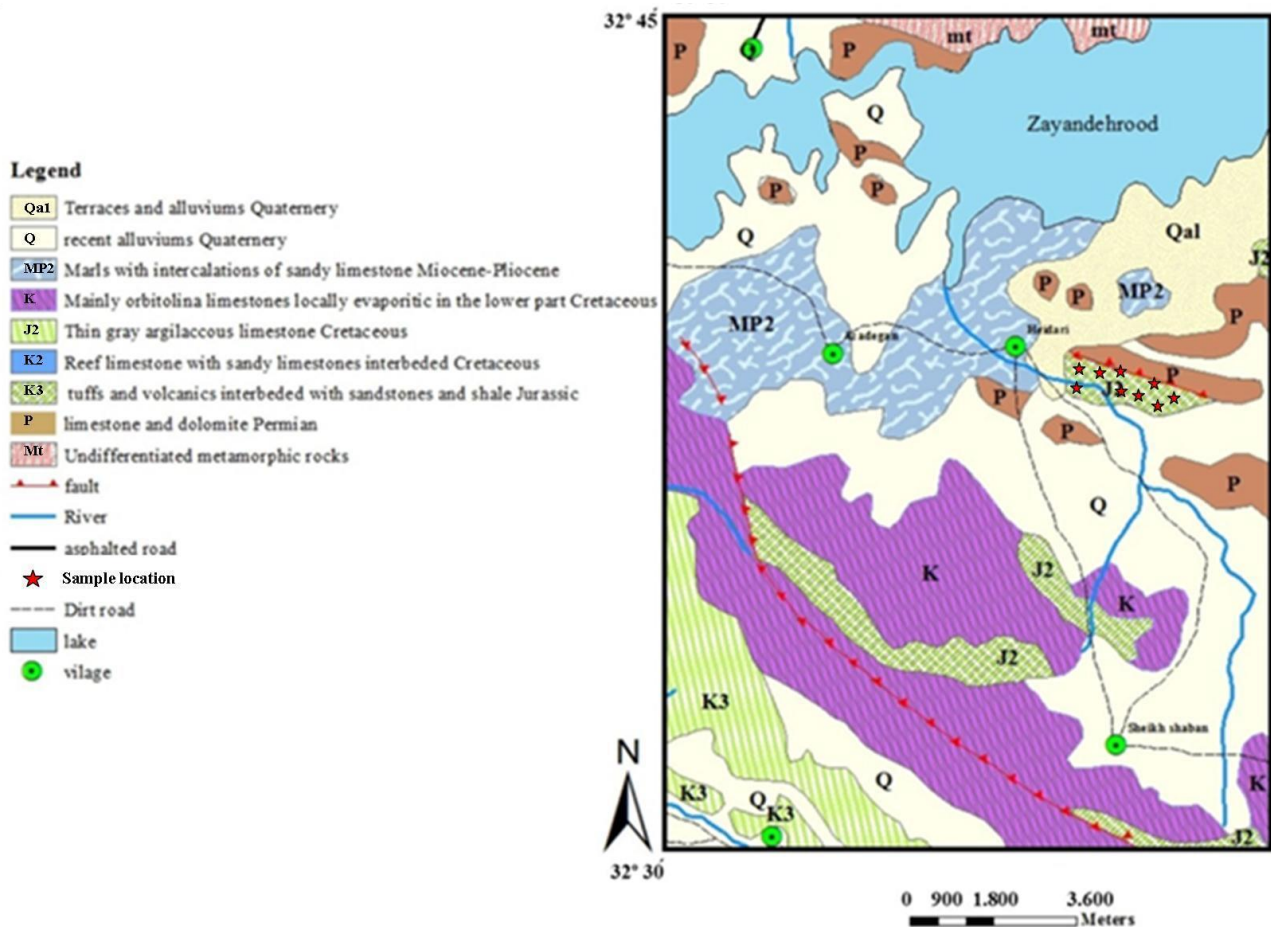
مشاهدات صحرایی دال بر رخنمون وسیعی از رسوبات پرمین، مزوزوئیک و سنوزوئیک می‌باشد که شامل آهک و دولومیت‌های پرمین، شیل و آهک‌های ژوراسیک و واحدهای ماسه‌سنگی، آهکی و دولومیت‌های کرتاسه اغلب واحدهای رسوبی موجود در منطقه می‌باشند (Zahedi and Rahmati Ilikhchi, 1993) (شکل ۲). همچنین آبرفت‌ها و تراس‌های آبرفتی کواترنری دارای گسترش وسیعی هستند. سنگ‌های آذرین به صورت آندزیت، آندزیت بازالتی و بازالت با وسعت زیاد، و با کنتاکت مشخص دیده می‌شود. همچنین شواهد کانه‌زایی آذریت در روی سنگ‌ها دیده می‌شود. سنگ‌های آذرین درونی اغلب شامل دیوریت و گابرو با وسعت کم و کنتاکت مشخص با رخنمون برجسته دیده می‌شوند (شکل ۳ a, b). بعضی از رخنمون‌های سنگ‌های آذرآواری با ترکیب توف‌های آندزیتی به رنگ سبزروشن با لایه‌بندی ظریف ریزدانه دیده می‌شود. همچنین رگه‌های تاخیری کلسیت و سیلیس به همراه آلتراسیون اپیدوتی در آندزیت‌ها قابل مشاهده است.

جنوب شرق می‌باشد. این منطقه در فاصله ۱۰ کیلومتری از گسل اصلی زاگرس و در بین گسل‌های شیدا و دالان واقع شده است به طوریکه عملکرد گسل‌های موازی و متقاطع با زاگرس، که منجر به جابجایی و ایجاد درزه و شکاف در واحدهای سنگی شده‌اند، به خوبی قابل مشاهده می‌باشد. پهنه سندنج- سیرجان با مجموعه‌ای از رخدادهای دگرگونی، ماگماتیسم و زمین ساخت متوالی در طی فازهای کوهزایی و زمین ساخت متفاوت، چهره شناخته شده‌ای می‌باشد. حضور سنگ‌های رخساره‌های درجه بالای دگرگونی (Shabanian et al., 2020)، تنوع ماگماتیسم (آندزیت و بازالت و معادل‌های نیمه عمیق و درونی آنها) و سنگ‌های رسوبی، ناآرامی و پویای این پهنه زمین‌ساختی را نشان می‌دهد (Aghanabati, 2004). مطالعات مفیدی بر روی مجموعه دگرگونی صورت گرفته است. با توجه به گزارش‌های در خصوص متاگرانیت و اکلوزیت، این منطقه دارای پتانسیل خوبی برای مطالعات دگرگونی می‌باشد (Davoudian et al., 2008; Davoudian et al., 2022; Davoudian et al., 2016, 2020; Hashemi et al., 2020; Babaahmadi et al., 2021). انجام شده بر روی سنگ‌های ماگمایی شمال شهرکرد دال بر ماهیت کالک‌آلکان این سنگ‌ها و موقعیت حاشیه فعال قاره‌ای می‌باشد (Ahankoub et al., 2020, 2021, 2022; Emami and Khalili, 2008, 2014). تعیین سن سنگ‌های آتشفشانی شمال شهرکرد با استفاده از روش آرگون- آرگون و با استفاده از آمفیبول‌های سنگ‌های حدواسط سنی از ۱۴۸ تا ۱۶۹ میلیون سال پیش، حد فاصل اشکوب‌های کالوین (دوگر فوقانی) تا تیتونین (مالم فوقانی) نشان می‌دهند (Emami and Khalili, 2014). این سن با نتایج سن‌سنجی توده‌های نفوذی مانند: توده‌های گرانیتوئیدی الیگودرز و ووند تطابق دارد. در برخی



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی واحدهای ساختاری کمربند کوهزایی زاگرس (Shabanian et al., 2018).

Fig. 1. Geological map of the structural units of Zagros orogeny belt (Shabanian et al., 2018).



شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه حیدری (Zahedi and Ilikhchi, 1993)
 Fig. 2. Geology map of the studied Heydari area (Zahedi and Ilikhchi, 1993)

نیمه شکل دار پلاژیوکلاز (حدود ۶۰٪ حجمی)، هم به صورت فنوکریست و هم میکرولیت، پیروکسن (حدود ۱۰ درصد) و الیوین (حدود ۱۰٪ حجمی) می باشد. بعضی الیوین ها با حاشیه ی اکسیدی قابل مشاهده هستند. کانه های کدر، پدیده های اورالیتی شدن پیروکسن ها، و اپیدوتی شدن ناشی از سوسوریتی شدن پلاژیوکلازها در این نمونه ها به وفور دیده می شود (شکل ۴b). در جدول ۱ نتایج پتروگرافی سنگ ها به طور خلاصه بیان شده است.

۳-۲- آندزیت بازالت ها

با بافت پورفیری تا گلو مرو پورفیری مشاهده می شوند. فنوکریست های پلاژیوکلاز (حدود ۶۰٪ حجمی)، آمفیبول (حدود ۲۰٪ حجمی)، پیروکسن (حدود ۵٪ حجمی) کانی های اصلی هستند که در متن ریز تا متوسط بلوری از همین کانی ها دیده می شوند. کانی های کدر بیشتر شامل اکسیدهای آهن هستند. کانی های ثانویه شامل سریسیت، اپیدوت، کلسیت، کلریت و کوارتز ناشی از آلتراسیون پلاژیوکلاز دیده

بر اساس داده های صحرایی و سنگ نگاری سنگ های آذرین منطقه شامل آندزیت، آندزیت بازالتی، بازالت، گابرو و دیوریت می باشند. این سنگ ها با رنگ های تیره تا خاکستری و رخنمون برجسته در ارتفاعات اطراف روستای حیدری قابل مشاهده هستند (شکل ۳ a, b, c). وسیع ترین رخنمون به آندزیت بازالت ها و آندزیت ها متعلق می باشد که بازالت ها با رنگ خاکستری تیره تا سیاه دارای فنوکریست های پیروکسن در منطقه رخنمون دارند و آندزی بازالت ها با رنگ سبز متمایل به خاکستری روشن و آندزیت ها با رنگ سبزرشن متمایل به خاکستری مشخص می گردند. گابروها اغلب با رخنمون کوچک و رنگ خاکستری تیره تا سیاه مشاهده می شوند. دیوریت ها با ابعاد کوچک و رنگ خاکستری تیره رخنمون دارند.

۳- سنگ نگاری

۳-۱- بازالت ها

کانی های اصلی این سنگ ها عبارتند از بلورهای شکل دار تا

۳-۴- گابرو

کانی‌های اصلی در این نمونه‌ها عبارتند از پلاژیوکلاز، اولیوین، پیروکسن با بافت گرانولار دانه‌درشت تا دانه‌متوسط. آلتراسیون‌های شامل آیدنگزیتی شدن الیوین‌ها، اورالیتی شدن پیروکسن‌ها و سوسوریتی شدن پلاژیوکلازها دیده می‌شود.

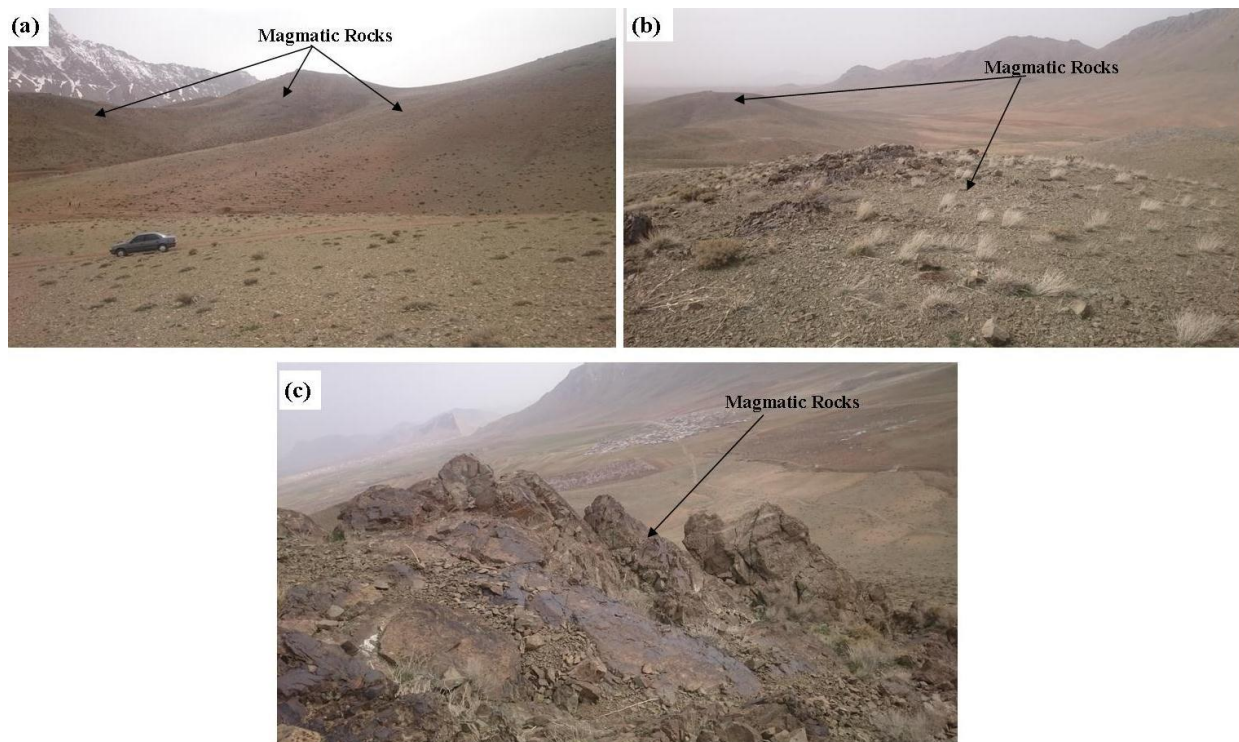
۳-۵- دیوریت

کانی‌های اصلی این سنگ‌ها شامل پلاژیوکلاز، اولیوین، پیروکسن و آمفیبول با بافت گرانولار دانه‌درشت تا دانه‌متوسط می‌باشد. بعضی سوسوریتی شدن پلاژیوکلازها و کلریتی شدن بیوتیت‌ها دیده می‌شود.

می‌شوند. همچنین آرژیلیتی شدن نمونه‌های پلاژیوکلاز و اورالیتی شدن پیروکسن‌ها قابل مشاهده هستند (شکل ۴a, b).

۳-۳- آندزیت‌ها

با بافت پورفیری و مجموعه کانی‌های اصلی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز (تا ۶۰٪ حجمی)، آمفیبول (تا ۲۰٪ حجمی)، پیروکسن (تا ۳٪ حجمی) دیده می‌شوند. این کانی‌ها در زمینه‌ای از ریز تا متوسط بلورهای از همین کانی‌ها قابل مشاهده هستند. محصولات آلتراسیون پلاژیوکلاز به صورت کانی‌های ثانویه سرپیسیت، اپیدوت، کلسیت، کلریت و کوارتز دیده می‌شوند.

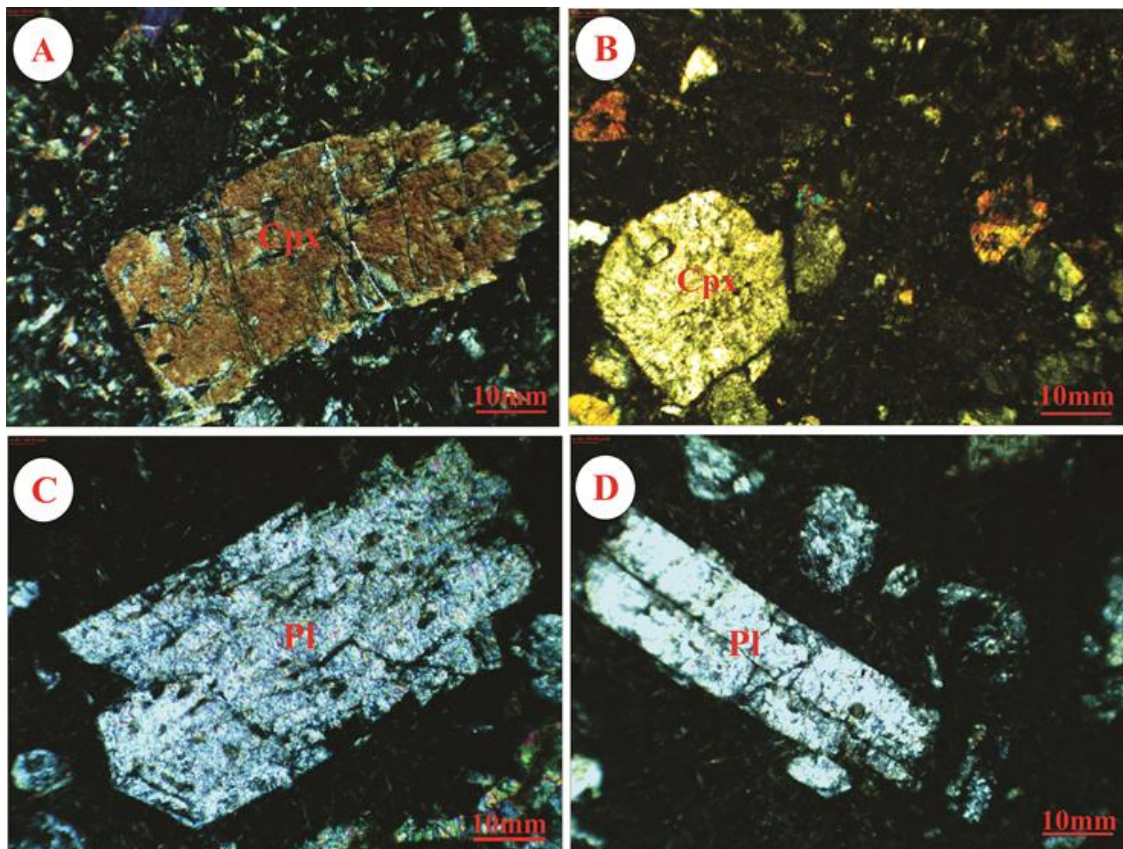


شکل ۳- (a) و (b) و (c): رخنمون آندزیت و بازالت‌های آندزیتی در حوالی روستای حیدری
Fig. 3 (a, b and c) outcrops of magmatic rocks in the Heydari area

جدول ۱- مشخصات پتروگرافی نمونه‌های منطقه مورد مطالعه.

Table 1. Petrographic properties of the samples

Sample No.	Rock type or lithology	Description
1H,2H,3H,12H,15H,23H,24H,26H,28H,31H,33H,34H	Andesite	plagioclase, Pyroxene, Amphibole, Biotite, opaque
4H,5H,6H,11H,38H,41H,42H,43H,44H	Basalt	Olivine-Pyroxene, plagioclase, Amphibole.
14H,16H,17H,118H,19H	Diorite	Plagioclase, Pyroxene, Amphibole.
20H,22H,32H,35H	Gabbro	Olivine, Pyroxene, Plagioclase.



شکل ۴- (a, b) فنوکریست‌های کلینوپیروکسن در متن دانه‌ریز دیوریت و گابروها، و (c, d) فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در متن دانه‌ریز آندزیت
 Fig. 4. (a, b) Clinopyroxene phenocrystals in matrix of the diorite and gabbro samples, (c and d): Plagioclase phenocrystals in matrix of the fine andesite.

پیروکسن از جمله کانی‌های کلیدی و مهم در تعیین خاستگاه ماگمایی، موقعیت تکتونیکی ماگمایی و تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی شامل دما و فشار و فشاربخشی اکسیژن می‌باشد.

۴-۱- پلاژیوکلازها

پلاژیوکلاز یکی از کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سنگ‌های آذرین حدواسط منطقه حیدری می‌باشد. برای تعیین دقیق ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازهای آندزیت‌بازالتی، تعداد ۱۲ نقطه از آنها موردآنالیز شیمی ریز پردازشی قرارگرفت. ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازها برپایه ۸ اتم اکسیژن در جدول ۱ آورده شده‌است. نتایج آنالیز شیمی پلاژیوکلازها در نمودار سه‌تایی (Or-Ab-An (Deer et al., 1986; Cosca et al., 1990) دارای ترکیب آندزیت تا لابرادوریت 33-57 An را نشان می‌دهد (شکل ۵). این کانی‌ها دارای مقادیر CaO برابر ۵/۹۹ تا ۱۱/۲۲ درصد وزنی، Na₂O برابر با ۴/۴۴ تا ۶/۲۷ درصد وزنی، Al₂O₃ برابر با ۲۴/۵۴ تا ۲۸/۱۲ درصد وزنی و K₂O برابر با ۰/۱۶ تا ۰/۶۹ درصد وزنی است.

۳- روش پژوهش

پس از مطالعات زمین‌شناسی صحرایی منطقه، تعداد ۴۰ نمونه از نمونه‌های سالم و هوازده نشده برداشت شده، در دانشگاه اصفهان، مقطع نازک تهیه شده و توسط میکروسکوپ الیمپوس دانشگاه پیام نور مرکز شهرکرد مورد مطالعه پتروگرافی قرار گرفت. از بین نمونه‌های مطالعه شده ۱۲ نقطه جهت آنالیز مینرال شیمی پلاژیوکلاز و ۱۹ نقطه جهت آنالیز مینرال شیمی پیروکسن جهت تعیین عناصر تشکیل دهنده کانی‌ها به شرکت کانساران بینالود تهران ارسال گردید. نتایج آنالیز شیمی کانی‌ها در جدول ۲ و ۳ آورده شده‌است. فرمول ساختاری پیروکسن‌ها و پلاژیوکلازها به ترتیب براساس ۶ و ۸ اتم اکسیژن محاسبه و در بررسی داده‌ها از نرم افزارهای (minpet) استفاده شد.

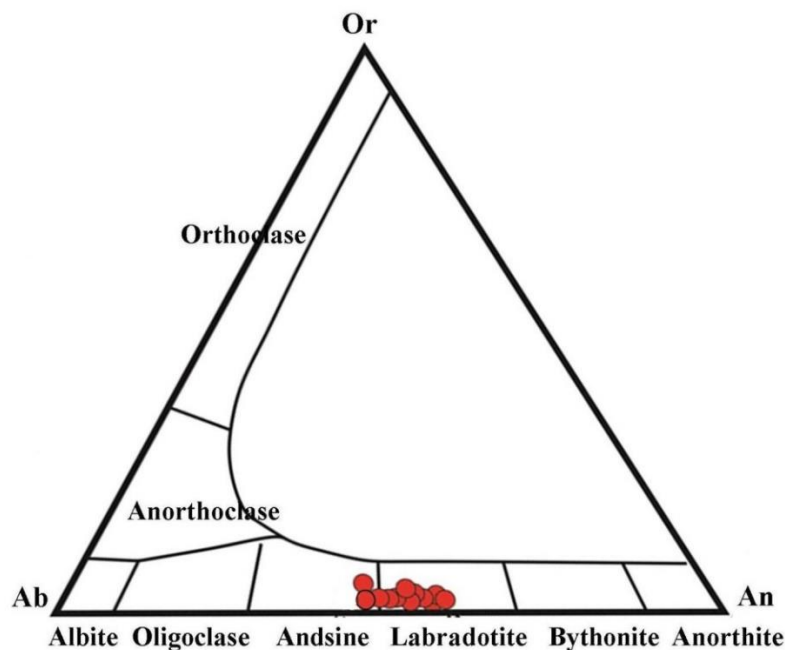
۴- شیمی کانی

نتایج آنالیز شیمی پلاژیوکلازها و پیروکسن نمونه‌های آندزیت‌بازالتی منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ و ۳ آورده شده‌است. پلاژیوکلاز و

جدول ۲- نتایج تجزیه نقطه‌ای و محاسبه فرمول ساختاری پلاژیوکلازها (بر حسب ۸ اتم اکسیژن)

Table 1. The results of point analysis and calculation of the structural formula of plagioclase (in terms of 8 oxygen atoms).

Analysis No.	2	3	8	9	10	15	1	2	4	12	20
SiO ₂	56.28	55.09	57.52	56.8	56.29	57.11	55.79	57.92	58.64	57.02	59.29
TiO ₂	0.01	0.04	0.03	0.02	0.02	0.00	0.04	0.03	0.12	0.05	0.06
Al ₂ O ₃	26.92	28.12	25.81	26.72	26.81	26.44	27.88	25.92	24.22	25.39	24.17
FeO	0.50	0.53	0.34	0.41	0.45	0.29	0.57	0.34	0.82	0.66	0.55
MnO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.07	0.00	0.01
MgO	0.02	0.04	0.15	0.00	0.01	0.09	0.04	0.15	0.15	0.10	0.05
CaO	9.85	11.22	8.99	9.98	9.93	7.51	10.97	9.29	9.93	10.74	9.21
Na ₂ O	5.81	4.75	5.83	5.62	5.37	4.56	4.44	5.78	4.98	5.36	6.11
K ₂ O	0.15	0.16	0.16	0.15	0.23	0.62	0.18	0.23	0.69	0.31	0.37
Total	99.37	99.79	98.69	99.51	98.87	96.01	99.73	99.46	98.91	99.32	99.44
Si	2.54	2.5	2.59	2.55	2.54	2.61	2.51	2.59	2.64	2.57	2.53
Al	1.42	1.49	1.29	1.41	1.42	1.42	1.47	1.38	1.28	1.36	1.27
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ³⁺	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.02
Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
Ca	0.49	0.52	0.43	0.47	0.49	0.36	0.52	0.44	0.47	0.51	0.42
Na	0.53	0.41	0.51	0.49	0.47	0.39	0.38	0.49	0.43	0.46	0.52
K	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02



شکل ۵- ترکیب پلاژیوکلازهای آندزیت‌بازالتی حیدری در نمودار (آلبیت-آنورتیت-ارتوز) (Deer et al., 1996).

Fig. 5) Composition of the Hydari plagioclases in the albite-anorthite-orthoclase diagram (Deer and et al., 1996)

۲-۴- پیروکسن‌ها

سیدیم تهی هستند (شکل ۶a). همینطور این نمونه‌ها در نمودار Fs-En-Wo در محدوده اوژیت قرار می‌گیرند (شکل ۶b). در این نمودار شاخص J و Q به ترتیب شامل $Ca+Mg+Fe^{+2}$ و $2Na\pm R$ می‌باشند. بر مبنای فرمول کلی ساختاری این کانی، پیروکسن‌های مورد مطالعه دارای ترکیب $Wo_{13.72-17.48}$

همچنین در همه پیروکسن‌ها مقادیر منیزیم بیشتر از آهن می‌باشد. میزان CaO برابر با $17/94$ تا $19/58$ درصد می‌باشد (جدول ۲). پیروکسن‌های مورد مطالعه در آندزیت بازالت در نمودار Q-J در محدوده پیروکسن‌های کلسیم-منیزیم-آهن دار پلات شده‌اند و از

(b). تعیین دما با استفاده از شیمی پیروکسن‌ها روش‌های متفاوتی دارد (Soesoo, 1997; Bertrand and Mercier, 1985; Nimis and Taylor, 2000). در این مقاله از روش (Soesoo, 1977)

استفاده می‌شود که محاسبه دو پارامتر زیر ضروری می‌باشد:

$$XpT = 0.446 SiO_2 + 0.187 TiO_2 - 0.404 Al_2O_3 + 0.346 FeO(\text{total}) - 0.052 MnO + 0.309 MgO + 0.431 CaO - 0.446 Na_2O$$

$$YpT = -0.369 SiO_2 + 0.535 TiO_2 - 0.317 Al_2O_3 + 0.323 FeO(\text{total}) + 0.235 MnO - 0.516 MgO - 0.167 CaO - 0.153 Na_2O$$

محاسبات انجام شده در خصوص پیروکسن‌های موجود در منطقه حیدری دال بر تبلور این سنگ‌ها در طی دو مرحله می‌باشد. تبلور پورفیرها در درون زمین و در دمای تبلور ۱۳۰۰-۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (شکل c۷) و تبلور زمینه دانه‌ریز در روی سطح زمین می‌باشد.

$Mg = 100 [Mg / (Fe+Mg)]$ با $37/32-39/88$ En $41/35-46/08$ Fs برابر با ۷۸-۷۱ هستند.

۵- بحث

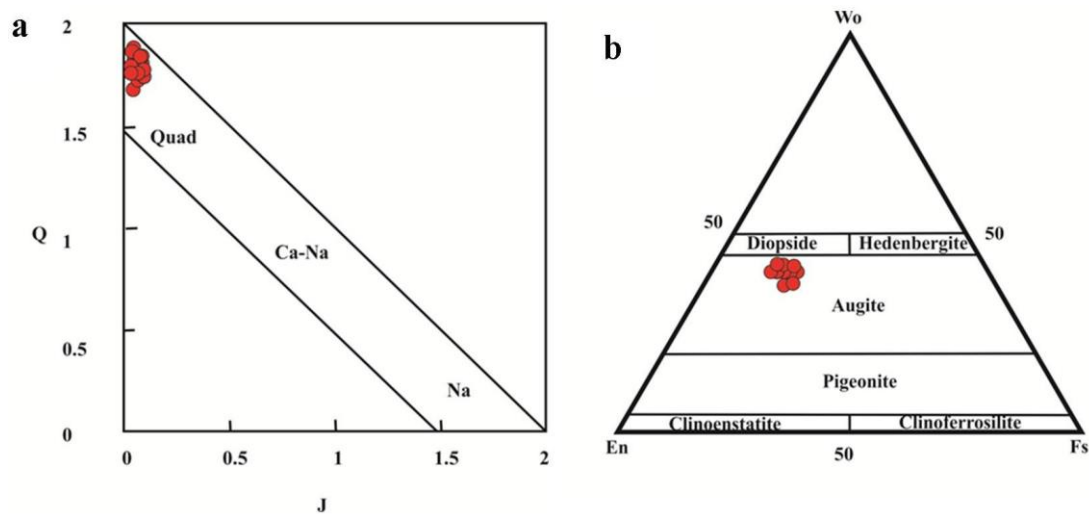
۵-۱- دما- فشارسنجی

از آنجایی که میزان فشار در هنگام تبلور پیروکسن در جایگیری آلومینیم نقش مهمی دارد. بالا بودن مقدار AIV دال بر شرایط فشار کم و دمای بالا می‌باشد و بالا بودن AIVI دال بر فشار بالا و دمای پایین می‌باشد (Putirka et al., 2003). بنابراین نسبت AIV/AIVI در پیروکسن‌ها به عنوان فشارسنج بکار می‌رود (Aoki and Shiba, 1973). پلات نمونه‌های پیروکسن در نمودار پیشنهادی (Soesoo, 1997) محدوده فشار ۱۰-۶ کیلوپار را نمایش می‌دهند (شکل a۷). همچنین در نمودار پیشنهادی (Coltorti et al., 2007) پلات نمونه‌ها دال بر بازه فشار متوسط می‌باشد (شکل ۷)

جدول ۳) نتایج نقطه‌ای و محاسبه فرمول ساختاری پیروکسن (بر حسب ۶ اتم اکسیژن) در آندزیت‌ها

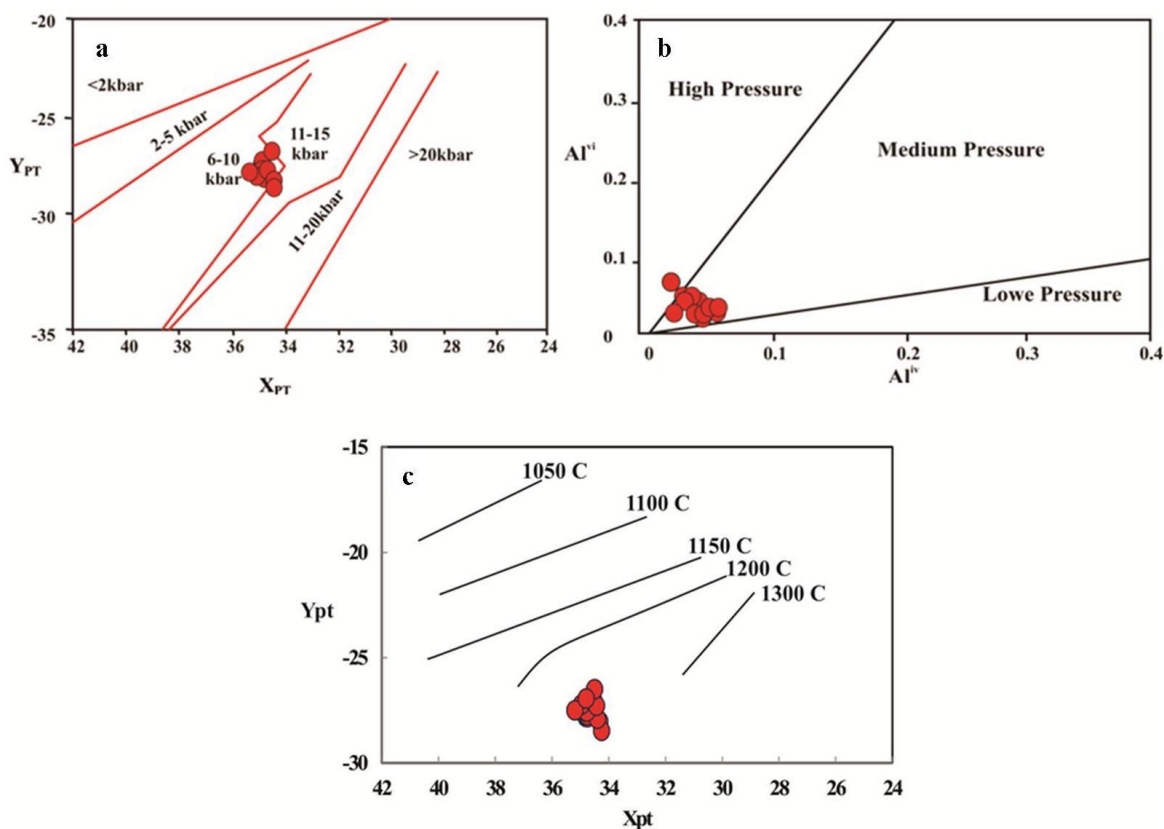
Table 2) Point results and calculation of the structural formula of pyroxene (in terms of 6 oxygen atoms)

analysis No.	1	2	3	4	9	12	15	18	20	25	1	4	6	7	9	11	16	18	20
SiO ₂	52.88	53.09	53.04	53.28	52.9	52.68	53.27	52.52	52.90	52.79	52.56	52.29	52.35	52.38	51.95	51.68	52.36	52.85	51.93
TiO ₂	0.63	0.60	0.66	0.52	0.53	0.48	0.58	0.68	0.63	0.51	0.68	0.58	0.66	0.71	0.73	0.59	0.6	0.42	0.58
Al ₂ O ₃	1.88	1.89	1.68	1.99	1.78	1.74	1.8	1.76	1.78	1.76	1.98	1.87	1.88	1.95	2.18	1.75	1.6	1.22	1.62
Cr ₂ O ₃	0.01	0.12	0.01	0.06	0.22	0.06	0.12	0.01	0.07	0.14	0.04	0.00	0.00	0.02	0	0.12	0.03	0	0
FeO	10.51	9.87	9.68	9.24	8.25	10.23	10.09	10.43	10.26	9.24	10.05	9.66	9.66	9.57	9.71	10.35	10.01	9.65	10.1
MnO	0.22	0.26	0.24	0.2	0.16	0.29	0.29	0.21	0.25	0.23	0.28	0.23	0.24	0.26	0.23	0.33	0.36	0.28	0.38
MgO	15.32	15.58	15.77	15.54	15.91	15.28	15.58	15.09	15.34	15.60	15.26	15.12	15.23	15.18	14.98	14.28	14.99	14.95	14.78
CaO	18.09	18.66	18.45	17.94	18.74	18.21	18.21	18.12	18.17	18.48	19.45	19.60	19.62	19.58	19.38	19.08	19.51	19.52	19.52
Na ₂ O	0.4	0.35	0.32	0.34	0.32	0.43	0.43	0.42	0.43	0.38	0.35	0.31	0.37	0.35	0.37	0.43	0.41	0.39	0.39
K ₂ O	0.02	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02
NiO ₂	0.01	0.01	0.09	0.09	0.02	0	0	0	0.00	0.01	0.06	0.03	0.00	0.03	0.04	0	0	0.2	0
Total	99.97	100.44	99.94	99.2	98.83	99.4	100.37	99.25	99.81	99.12	100.73	99.71	100.03	100.05	99.6	98.65	99.9	99.51	99.32
Structure formula on the basis of 6 oxygen atoms																			
Si	1.96	1.96	1.97	1.98	1.97	1.97	1.96	1.96	1.96	1.97	1.94	1.95	1.95	1.94	1.94	1.94	1.95	1.97	1.95
Al ^{vi}	0.045	0.041	0.039	0.066	0.048	0.043	0.044	0.042	0.043	0.045	0.03	0.032	0.029	0.032	0.036	0.045	0.024	0.029	0.023
Al ^{iv}	0.037	0.041	0.035	0.021	0.037	0.034	0.034	0.036	0.035	0.032	0.057	0.05	0.054	0.054	0.06	0.033	0.047	0.031	0.049
Fe ⁺³	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03
Cr	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0.005	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ti	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
F ²⁺²	0.33	0.3	0.3	0.3	0.25	0.31	0.3	0.34	0.32	0.28	0.28	0.27	0.29	0.28	0.28	0.31	0.27	0.27	0.28
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.83	0.85	0.84	0.85	0.89	0.84	0.85	0.83	0.84	0.865	0.82	0.82	0.83	0.83	0.85	0.8	0.81	0.82	0.82
Ca	0.72	0.75	0.73	0.73	0.73	0.72	0.72	0.72	0.72	0.725	0.79	0.76	0.77	0.76	0.77	0.76	0.76	0.81	0.78
Na	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
ادامه جدول ۳																			
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	4	4	3.99	3.97	3.98	4	3.98	3.98	3.98	3.99	3.9	4.02	3.9	3.9	3.9	4	4.01	4.01	4.01
Wo	37.87	38.16	38.3	37.69	39	38.15	37.32	37.59	37.46	38.28	39.4	40.07	39.88	39.96	39.84	39.7	39.66	40.03	39.87
En	44.65	44.34	45.63	45.43	46.08	44.58	44.44	43.57	44.005	44.97	43.01	43.1	43.08	43.11	42.85	41.35	42.41	42.66	42.01
Fs	17.48	16.2	16.07	15.58	13.72	17.22	16.64	17.26	16.95	15.35	16.31	15.77	15.68	15.65	15.93	17.33	16.42	15.87	16.67



شکل ۶- (a) همه پیروکسن‌های آندزیت بازالت‌های منطقه حیدری در محدوده پیروکسن‌های (Mg-Fe-Ca) Quad قرار می‌گیرند، $J=2Na$ ، $Q=Ca+Mg+Fe+2Fe^{2+}$ ، (b) ترکیب کانی‌های پیروکسن در نمودار رده‌بندی (Fs-En-Wo (Morimoto, 1988)

Fig. 6) (a): All the pyroxenes of the Hydri area are in the range of (Mg-Fe-Ca) Quad (pyroxenes) $J=2Na$, $Q=(Ca+Mg+Fe^{2+})$, (b): The composition of pyroxene minerals in the classification diagram of Fs-En-Wo (Morimoto, 1988).



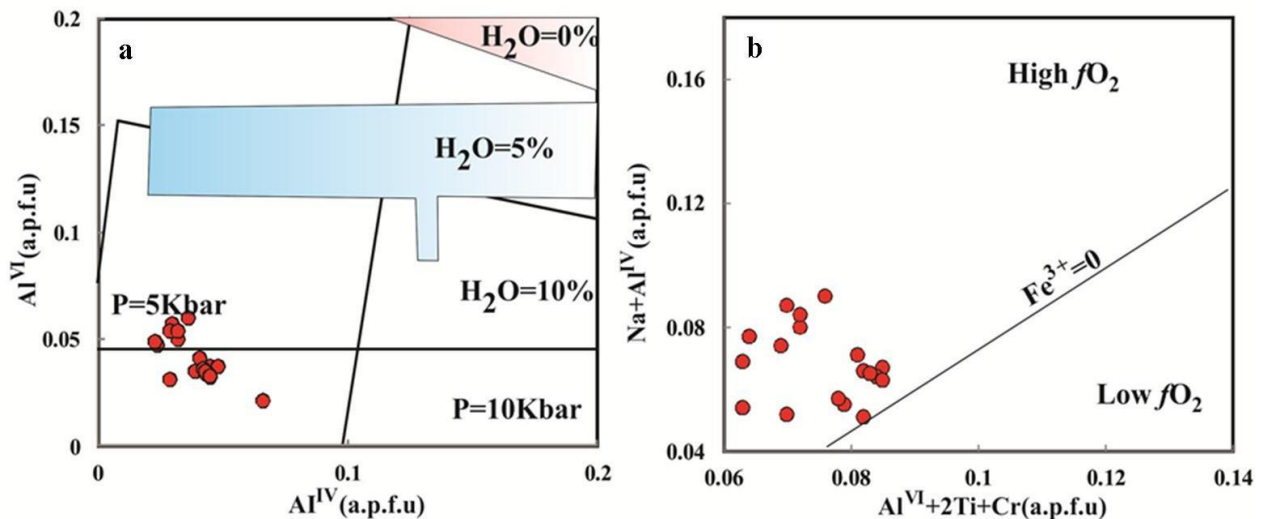
شکل ۷- نمودار داده‌های شیمی پیروکسن‌ها بروی (a) نمودار تعیین فشار (Soesoo, 1997)، (b) نمودار AlIV در مقابل AlVI برای برآورد فشار تبلور پیروکسن‌ها (Elthon, 1987) و (c) نمودار دماسنجی (Soesoo, 1997).

Fig 7. Plot of chemical data of pyroxenes on, (a) pressure determination diagram (Soesoo, 1997), (b) AlIV versus AlVI diagram to estimate the crystallization pressure of pyroxenes (Elthon, 1987) and (c) thermometer diagram (Soesoo 1997)

داده‌های پیروکسن در نمودار مذکور نشان می‌دهد. مقادیر آب نمونه‌های پیروکسن مورد مطالعه بالا می‌باشد (شکل ۸a). همچنین این نمونه‌ها، دارای مقادیر بالای فوگاسیته اکسیژن ماگمای سازنده هستند (شکل ۸b).

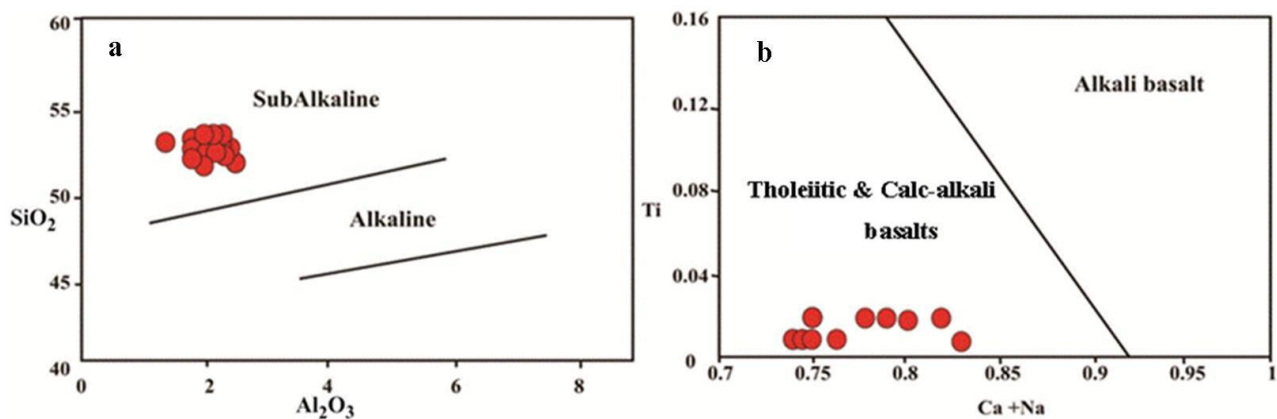
۵-۲- برآورد محتوی آب ماگما

بر پایه بررسی‌های Heltz (۱۹۷۳)، با به کارگیری توزیع آلومینیم در موقعیت‌های تتراهدری و اکتاهدری در کلینوپروکسن‌ها، میزان آب ماگما برآورد می‌شود. پلات



شکل ۸- ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های منطقه حیدری بر روی نمودار (a) تخمین میزان آب (Helz, 1973)، و (b) ارزیابی فوگاسیته اکسیژن (Schweitzer et al., 1979)

Fig. 8) Chemical composition of hydri pyroxenes on the diagram of (a) estimation of water content (Helz, 1973), and (b) determined of oxygen fugacity (Schweitzer et al., 1979)



شکل ۹- تعیین ماهیت ماگما با استفاده از کلینوپروکسن‌های آندزیت‌بازالت‌های منطقه حیدری (a): نمودار تغییرات SiO2 در مقابل Al2O3 (Le Bas, 1962) و (b) نمودار تغییرات Ti در مقابل Ca+Na (Leterrier et al., 1982)

Fig. 9) Determining nature of the magma using of the clinopyroxenes Hydari area (a): diagram of SiO2 vs. Al2O3 (Le Bas, 1962) and (b) diagram of Ti vs. Ca+Na (Leterrier et al., 1982).

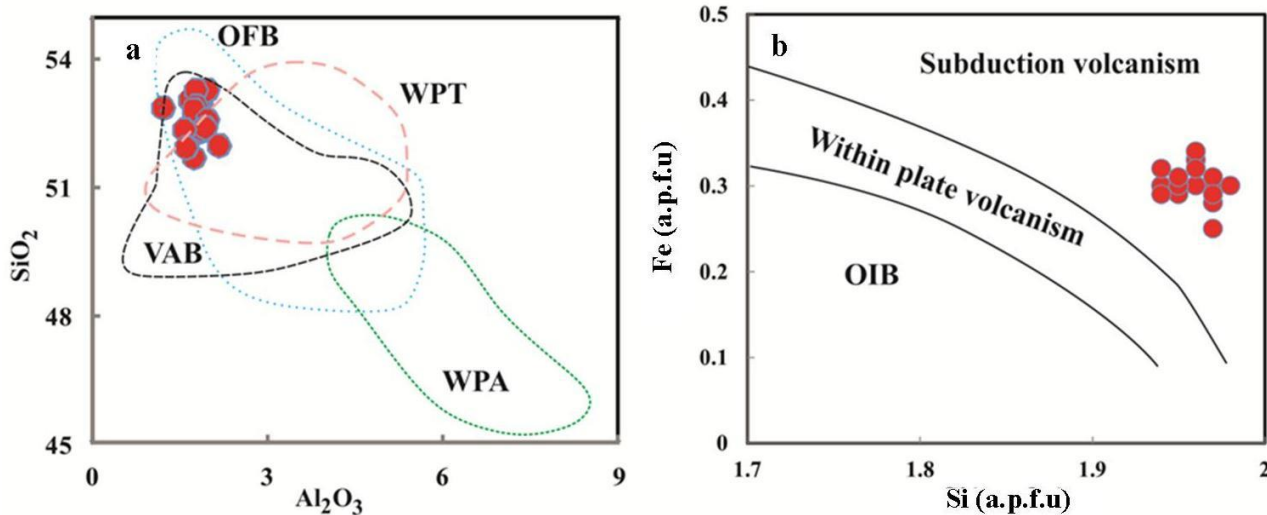
۵-۳- تعیین جایگاه تکتونیکی

ماگمای سازنده خود و شرایط فیزیکوشیمیایی و سری ماگمایی و پهنه زمین ساختی بیان می‌کند (Leterrier et al., 1982; Muller et al., 1992., Aparicio, 2010). اذعان داشت که ردیابی عناصر Si, Al, Ti, Cr در تعیین محیط تشکیل ماگما

با توجه به اینکه شیمی پیروکسن‌ها به ترکیب شیمیایی، شرایط فیزیکوشیمیایی تبلور و ماگمای میزان وابسته است (Leterrier et al., 1982). بنابراین شیمی این کانی اطلاعات ارزشمندی از خاستگاه

تایید می‌کند (شکل ۱۰، a، b). محتوای بالای آب در نمونه‌های پیروکسن با مقادیر بالای فوگاسیته سازگاری دارد. مقادیر آب و فوگاسیته اکسیژن خود گویای محیط فرورانش می‌باشد.

بسیار حائز اهمیت است. پلات نمونه‌های پیروکسن بروی نمودارهای مربوطه، ماهیت ساب‌آلکالن و کالک‌آلکالن را نشان می‌دهد (شکل ۹، b). همچنین بروی نمودارهای SiO_2 در مقابل Al_2O_3 و Fe در مقابل Si موقعیت زمین ساختاری فرورانش را



شکل ۱۰) تعیین موقعیت تکتونیکی نمونه‌های منطقه حیدری با استفاده از داده‌های شیمی پیروکسن‌ها (a): پلات نمونه‌ها در محدوده VAB (Nisbet and Pearce, 1977); (b): پلات نمونه‌ها در محدوده فرورانش (Apricio, 2010).

Fig 10) Determining tectonic setting of the Hydari samples using of the chemical pyroxenes data (a): Plotting of the samples in the VAB area (Nisbet and Pearce, 1977); (b): Plotting of the samples in subduction area (Apricio, 2010).

محدود بودن ترکیب این کانی‌ها در قلمرو کلسیم-منیزیم-آهن‌دار و از نوع اوژیت اشاره می‌کند. با توجه به نسبت AlVI به AlIV تبلور این کانی‌ها در فشار متوسط رخ داده‌است. همچنین مقادیر آب و فوگاسیته اکسیژن در هنگام تبلور ماگمای سازنده پیروکسن‌ها به فوگاسیته بالای اکسیژن و فشار بیش از ۵ کیلو بار دلالت می‌کند. داده‌های شیمی کانی‌ها پورفیری این سنگ‌ها نشان می‌دهند که مرحله اول تبلور در دما ۱۲۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار متوسط معادل ۶ تا ۱۰ کیلو بار رخ داده‌است. این سنگ‌ها دارای ماهیت ساب‌آلکالن تیپ کالک‌آلکالن متعلق به پهنه فرورانش هستند.

قدردانی

نویسندگان از کادر مجرب و زحمتکش مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته اهواز و هیات داوران محترم مجله تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶- نتیجه‌گیری

در بخش‌های میانی پهنه سنندج سیرجان، در شمال شهرکرد و در اطراف روستای حیدری، مجموعه‌ای از سنگ‌های ماگمایی حداسط تا بازیگ با ترکیب آندزیت تا بازالت و گابرو و دیوریت رخمون دارند. در بررسی صحرایی این سنگ‌ها دارای رخمون برجسته با رنگ خاکستری تا قهوه‌ای مجموعه ارتفاعات را تشکیل می‌دهند. در مطالعات پتروگرافی نمونه‌های بازالت، آندزیت بازالت و آندزیت بافت پورفیری همراه با فنوکریستهای پلاژیوکلاز و الیوین، پیروکسن در زمینه دانه‌ریز تا دانه متوسط از پلاژیوکلاز قابل مشاهده هستند. بعضاً اورالیتی‌شدن پیروکسن‌ها، سوسوریتی‌شدن پلاژیوکلازها و کلریتی‌شدن بیوتیت‌ها قابل روئت می‌باشد. آنالیز شیمی بلورهای پلاژیوکلاز نمایانگر حضور مجموعه کانی‌های آندزیت تا لابرادوریت در این نمونه‌ها می‌باشد. همچنین آنالیز شیمی بلورهای پیروکسن به

مراجع

- Aghanabati, A., 2006. Geology of Iran. Geological Survey of Iran publication. Tehran (in Persian).
- Ahankoub, M., Ayati, F., Nazari, M., 2021. Investigation of the evolution of arc: Azadegan magmatic rocks, north of Shahrekord, Sanandaj-Sirjan zone. *Journal of Petrology* 12, 27-42. <https://doi.org/10.22108/IJP.2021.130333.1250>
- Ahankoub, M., Asahara, Y., Tsuboi, M., 2020. Petrology and geochemistry of the Lattan Mountain magmatic rocks in the Sanandaj-Sirjan Zone, west of Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 13, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05820-x>.
- Ahankoub, M., Shabanian, N., Davoudian, A., Bagheri, H., Nasiri, M., 2022. Geochemical and fluid inclusion studies of Au and Cu bearing veins in the Hureh area, West Iran. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen* 196, 285-301. <https://doi.org/10.1127/njma/2022/0290>.
- Aoki, K.I., Shiba, I., 1973. Pyroxenes from Lherzolite Inclusions of Itinome-Gata, Japan. *Lithos* 6, 41-51. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(73\)90078-9](https://doi.org/10.1016/0024-4937(73)90078-9).
- Aparicio, A., 2010. Relationship between clinopyroxene composition and the formation environment of volcanic host rocks. *IUP Journal of Earth Sciences* 4, 1-11.
- Babaahmadi, A., Davoudian, A.R., Mohajjel, M., 2021. Transpression in the Sanandaj-Sirjan Zone (Zagros Orogen, Iran) during the Jurassic and Early Cretaceous: Evidence from the North Shahrekord Shear Zone *Journal of Structural Geology* 149, 104387.
- Beccaluva, L., Macciotta, G., Piccardo, G.B., Zeda, O., 1989. Clinopyroxene composition of ophiolite basalts as petrogenetic indicator. *Chemical Geology* 77, 165-182. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(89\)90073-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(89)90073-9).
- Bertrand, P., Mercier, J.C., 1985. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for natural system. *Earth and Planetary Science Letters* 76, 109-122. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(85\)90152-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90152-9).
- Coltorti, M., Bonadiman, C., Faccini, B., Grégoire, M., O'Reilly, S.Y., Powell, W., 2007. Amphiboles from suprasubduction and intraplate lithospheric mantle. *Lithos* 99, 68-84. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.05.009>.
- Cosca M.A., Essene E.J., Bowman J.R., 1991. Complete chemical analyses of metamorphic constrains on their P-T dependence". *European Journal of Mineralogy* 5, 231-291.
- Davoudian, A.R., Bendokht, M., Shabanian, N., Azizi, H., Asahara, Y., 2022. Geochronology and geochemistry of the Ediacaran orthogneisses from the north Shahrekord (Sadegh-Abad), Sanandaj-Sirjan Zone: Insights into magmatic evolution of the Iranian. *Geological Journal* 57, 2788-2811.
- Davoudian, A., Genser, J., Dachs, E. Shabanian, N., 2008. Petrology of eclogites from north of Shahrekord, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Mineralogy and Petrology* 92, 393-413. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00710-007-0204-6>.
- Davoudian, A., Genser, J., Neubauer, F. Shabanian, N., 2016. 40 Ar/39Ar mineral ages of eclogites from North Shahrekord in the Sanandaj-Sirjan Zone, Iran: Implications for the tectonic evolution of Zagros orogen. *Gondwana Research* 37, 216-240. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.05.013>.
- Deer, W.A., Howie, A., Zussman, J., 1986. An interduction to the rock – forming minerals', 17th ed., Longman Ltd 528 P.
- Emami, S. N., Khalili, M., 2014. Volcanic and subvolcanic rocks dating in the north of Shahrekord by 40 Ar/39 Ar method, a new approach regarding the occurrence and duration of the Jurassic volcanism in the Sanandaj-Sirjan zone. *Journal of Petrology* 18, 2228-5210. https://ijp.ui.ac.ir/article_16166.html?lang=en.
- Emami, N., Khalili, M., 2008. Mineralogical and geochemical constraints of Jurassic fossil hydrothermal alteration associated with an calc-alkaline volcano-sedimentary complex in Sanandaj-Sirjan Zone, Southwest of Iran. *Journal of Applied Sciences* 8, 1600-1611. <https://scialert.net/abstract/?doi=jas.2008.1600.1611>.

- Hashemi, M., Shabanian, N., Davoudian, A.R., Azizi, H., 2020. Investigation of temperature variations and deformation stages with respect to microstructures and mineral paragenesis in paragneisses of northern Shahrekord. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 29, 165-174.
- Helz, R.T., 1973. Phase relations of basalts in their melting range at $P_{H_2O} = 5$ kb as a function of oxygen fugacity: part I. Mafic phases. *Journal of Petrology* 14, 249-302. <https://doi.org/10.1093/petrology/14.2.249>.
- Le Bas, M.J., 1962. The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage, *American journal of science* 260, 267-288. <https://doi.org/10.2475/AJS.260.4.267>.
- Leterrier, J., Maury, R.C., Thonon, P., Girard, D., Marchal, M., 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters* 59 139-154. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90122-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90122-4).
- Müller, D., Rock, N., Groves, D., 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: a pilot study. *Mineralogy and Petrology* 46, 259-289. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01173568>.
- Nimis, P., Taylore W.R., 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites; Part I: Calibration and testing of a Crin- Cpx barometer and an Enstatite-in-Cpx thermometer, *Contributions to Mineralogy and Petrology* 139, 544-554. <http://dx.doi.org/10.1007/s004100000156>
- Nisbet, E.G. Pearce, J.A., 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 63, 149-160. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF0039877>
- Morimoto, N., 1988. Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogy and Petrology* 39, 55-76. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01226262>.
- Putirka, K.D., Mikaelian, H., Ryerson, F., Shaw, H., 2003. New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho. *American Mineralogist* 88, 1542-1554. <https://doi.org/10.2138/am-2003-1017>.
- Shabanian, N., Davoudian, A.R., Azizi, H., Santos, J.F., Asahara, Y., 2022, Geochronology and petrogenesis of the Late Neoproterozoic granitic gneisses of Golpayegan metamorphic complex: a new respect for Cadomian crust in the Sanandaj-Sirjan zone, Iran. *International Geology Review* 64, 1450-1473.
- Shabanian, N., Davoudian, A.R., Dong, Y., Liu, X., 2018. U-Pb zircon dating, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic ratios from Azna-Dorud Cadomian metagranites, Sanandaj-Sirjan zone of western Iran. *Precambrian Research* 306, 41-60. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.12.037>.
- Shabanian, N., Davoudian, A.R., Azizi, H., Asahara, Y., Neubauer, F., Genser, J., 2020. Petrogenesis of the Carboniferous Ghaleh-Dezh metagranite, Sanandaj-Sirjan zone, Iran: constraints from new zircon U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and Sr-Nd, *Geological Magazine* 157, 1823-1852.
- Soesoo, A., 1997. A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallisation P-estimations. *Geological Society of Sweden (Geologiska Föreningen)* 119, 55-60. <https://doi.org/10.1080/11035899709546454>.
- Schweitzer, E., Papike, J., Bence, A., 1979. Statistical analysis of clinopyroxenes from deep-sea basalts. *American Mineralogist* 64, 501-513.
- Zahedi, M. Rahmati Ilikhchi, M., 1993. Geology map of the Shahrekord 1:250000, No. E8, Geological Survey of Iran, Tehran (in Persian with English abstract)