

Original Research Paper

Application of clinopyroxene geothermobarometers on the gabbro/dioritic rocks associated with the Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) granitoid stock, Baft, Kerman

Mahboubeh Arabzadeh Baniasadi¹, Habibollah Ghasemi^{1*}, Samuel Angiboust², Mehdi Rezaei-Kahkhaei¹, and Lambrini Papadopoulou³¹ Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran² Department of Earth Sciences, Ecole Normale Supérieure de Lyon, Lyon, France³ Department of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH), Greece

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22024 February 24

Accepted: 2024 June 16

Available online: 2024 September 22

Keywords:

Geothermobarometry

Clinopyroxene

Granitoid

Gowd-e-Howz

Baft

Kerman



ABSTRACT

The Lower Jurassic (≈ 180 Ma) granitoid body of the Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) is mainly consists of a diorite-granodiorite part (diorite, quartz diorite, monzonite, quartz monzonite and granodiorite), and a smaller granite part (granite, alkali feldspar granite, aplite, and pegmatite), which is associated with an early-intruded small gabbroic part. This intrusion body is located in the south part of the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, southeast of Iran in Dehsard area, Baft, Kerman province. This massif as an ellipsoidal granitoid stock has intruded in the Upper Paleozoic metamorphic and Triassic igneous-sedimentary rocks. The Jurassic rock units mainly consist of shale, sandstone and conglomerate, and Lower Cretaceous limestones covered the Triassic sequence and there is no evidence of magma intrusion in them. The overall texture of the granitoid rocks is medium to coarse-grained anhedral granular, but microgranophiric, perthitic, micrographic and myrmekitic textures can also be seen in the granite-alkali granite samples. The main minerals of these rocks include olivine, clinopyroxene, orthopyroxene, amphibole, biotite, and plagioclase, in gabbro/diorites and include amphibole, biotite, plagioclase, alkali feldspar, and quartz in granodiorite-granite samples. Minor and secondary minerals include zircon, apatite, opaque, sphene, and tremolite-actinolite, chlorite, epidote, calcite, sericite, and clays respectively. Clinopyroxene chemistry has been used as the main constituent of gabbro/diorite rocks to investigate the nature of magma, tectonic setting, and physicochemical conditions of crystallization (T , P , fO_2) in mafic-intermediate rocks of this body. The clinopyroxenes of these rocks are of calcic diopside-augite-salite type and belong to the I-type calc-alkaline magmatic series of subduction zones. Temperature and pressure estimations based on different single clinopyroxene thermobarometers indicate temperatures of 800 to 1300 °C at pressures of ≈ 4 to ≈ 12 kbar corresponding to pressures equivalent to the depths of 16 to 50 kilometers for the crystallization of this mineral under the medium to high oxygen fugacity in the lower (≈ 40 -50 Km) to middle (≈ 14 -16 Km) continental crust.

* Corresponding author: Habibollah Ghasemi; E-mail: h-ghasemi@shahroodut.ac.ir

Citation:Arabzadeh Baniasadi, M., Ghasemi, H., Angiboust, S., Rezaei Kahkhaei, M., and Papadopoulou, L., 2024. Application of clinopyroxene geothermobarometers on the gabbro/dioritic rocks associated with the Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) granitoid stock, Baft, Kerman. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 34(3), 133, 117-134. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.445550.2136>.

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

 doi: 10.22071/gsj.2024.445550.2136 dor: 20.1001.1.10237429.1403.34.3.8.6This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

1. Introduction

The Lower Jurassic Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) granitoid Massif (≈ 180 Ma) is located in the southern part of the Sanandaj-Sirjan metamorphic zone in the southeast of Baft, south of Kerman, and is one of the most important magmatic signs of subduction initiation of the Neotethys oceanic basin beneath the central Iran plate since the Late Triassic (Arvin et al., 2007; Jafari et al., 2023). Although some studies have been done about this massif and its cutting dikes (e.g., Malekizadeh, 2000; Arvin et al., 2007; Ghanbarzadeh, 2011), there isn't any research about its rock-forming mineral chemistries and their physicochemical conditions of crystallization, and the present article is the third study of these authors in this field as a part of the Ph.D. thesis of the first author.

Using the chemical composition of minerals to estimate the physicochemical conditions governing the crystallization of magmatic bodies and their final replacement in the crust is one of the important topics in igneous petrology (Wang et al., 2021; Wieser et al., 2023). The chemical composition of clinopyroxenes is very close to the chemical composition of basaltic magmas, and for this reason, the composition of this mineral is used to understand the processes governing the crystallization of mafic-intermediate magmatic bodies. Clinopyroxenes are the main minerals of ultramafic-mafic-intermediate rocks and stable in a wide range of temperatures (800 to 1500 °C) and pressures (1 bar to 30 kbar). From the past, the composition of clinopyroxene has been used by many authors to estimate the nature of magma, tectonic setting, temperature, pressure and oxygen fugacity during the crystallization of its constituent magma, and various diagrams, thermodynamic equations and calculation methods have been presented for it (Wood and Banno, 1973; Wells, 1977; Nisbet and Pearce, 1977; Schweitzer et al., 1979; Lindsley, 1983; Davidson, 1985; Davidson and Lindsley, 1985; Bertrand and Mercier, 1985; Kretz, 1994; Soesoo, 1997; Nimis and Taylor, 2000; Putirka, 2008; Wang et al., 2021; Wieser et al., 2023). In this research, for the first time, we use the EPMA data from clinopyroxenes of the Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) granitoid stock to study some of the most important petrological parameters in this massif.

2. Research methodology

A total of 200 hand specimen samples have been collected from the Gowd-e-Howz granitoid stock, associated dikes and surrounding host rocks during field surveying. Thin and polished thin sections of the selected samples were prepared for petrographic examinations and microprobe analysis in the labs of the Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Eleven samples from granities, granodiorites, diorites and gabbros were selected for mineral chemistry analysis. The in-situ analyses of minerals on 5 samples (MH-6, MH-8, MH-21, MH-40 and MH-43) were carried out at GFZ Potsdam (Germany) using a JEOL-JXA 8230 microprobe equipped with five WDS. The operating conditions were as follows: 15 kV accelerating voltage, 20 nA beam current and 10 s counting time on peak position for Si, K, Cr, Na, P or 20 s counting time for Al, Ca, Fe, Mn, Mg, Ti, F, Cl. Detection limits are 0.02–0.9 wt%. The structural formula of the pyroxenes was calculated with an excel spreadsheet

based on 4 cations and 6 oxygens. Fe^{3+} content was calculated in pyroxenes according to Droop (1987). The microprobe analyses of 6 samples (MH-51, MH-53, MH-56, MH-57, MH-58 and MH-66) along with repeated samples of MH-6 and MH-43, were conducted using a JEOL JSM-6390LV scanning electron microscope (SEM) equipped with an OXFORD INCA 300 energy dispersive system (EDS) and a wavelength dispersive spectrometer (WDS) (INCAWave, Oxford) (Oxford Instruments Ltd., Abingdon, UK) at the Laboratory of Electron Microscopy, Aristotle University of Thessaloniki, Greece. The operating conditions were a 20 kV accelerating voltage and 0.4 mA probe current, 80 s analysis time, and a beam diameter of 1 μm . For SEM observations, the samples were coated with carbon – average thickness of 200 Å – using a vacuum evaporator JEOL-4X.

3. Results

3.1. Geology

The Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) granitoid stock is located in the southern part of the Sanandaj-Sirjan metamorphic-magmatic zone in the 60 km southeast of Baft, south of Kerman, SE Iran (with coordinations of $56^{\circ} 45'$ to $57^{\circ} 07'$ longitudes and $28^{\circ} 00'$ to $28^{\circ} 40'$, Fig. 1). This intrusion that was attributed to the Late Triassic (Sabzehei et al., 1993; Arvin et al., 2007) is representing of magmatic product of subduction initiation in the Zagros Neotethys orogenic belt. Nevertheless, Nazemzadeh and Rashid (2006) was assigned it to the post Cretaceous (Cenozoic), as the product of the final stages of closing of the Zagros Neotethys oceanic basin. However, this pluton is one of the most important keys to decoding the subduction initiation of the Zagros Neotethys oceanic basin beneath the Central Iran block (Arabzadeh Baniyasi et al., 2024a, b; Asadi et al., 2023a; Jafari et al., 2023). This elongated and ellipsoidal intrusion with approximately east-west elongation is mapped as the Late Triassic granitoid intrusion in the central part of the eastern corner of the 1:250000 geological map sheet of Hadji-Abad (Sabzehei et al., 1993) and as the post Cretaceous granitoid intrusion in the southeast corner of the 1:100000 geological map sheet of Dehsard (Bezar) (Nazemzadeh and Rashid, 2006). Based on the geological map of Hadji-Abad (Sabzehei et al., 1993), detailed geological surveying of this research, whole rock Rb-Sr dating (≈ 199 Ma, Arvin et al., 2007) and U-Pb datings on the separated zircons (≈ 180 Ma, Arabzadeh Baniyasi et al., 2024a, b), it was intruded in the Upper Paleozoic Sargaz-Abshour metamorphic complexes (mainly composed of amphibolite, marble, and schists) and the Triassic igneous-sedimentary rocks. The Lower Jurassic terrigenous rocks (equivalent to Shemshak Formation in the Alborz and Central Iran Zones) and the Lower Cretaceous limestones covered the Triassic rock units and the granitoid massif.

The Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) composite granitoid stock has a variety of rocks including gabbro/diorite, quartz diorite/quartz monzonite, monzodiorite/monzonite, granodiorite, granite, alkali feldspar granite along with aplitic/pegmatite fractionated veins. Based on the field observations, the first phase of magma injection in the margins was of gabbro/diorite type, which display dark color

and contains quartz diorite/quartz monzonite differentiated veins. The second phase was the intrusion of granodiorite magma into the gabbro/diorites and made the main part of the Gowd-e-Howz granitoid stock. The granodiorite displays gray color and has dark mafic microgranular enclaves (Didier, 1991) or mafic microgranitoid enclaves (Vernon, 1984) (MMEs) with diorite, monzodiorite and monzonite compositions. The existence of MMEs in the massif indicates the injection of granodiorite phase into the gabbro-diorite. The third phase was a gray to pink color granite-alkali granite that intruded into the granodiorite part. Finally, the quartz monzonite dikes cut the whole of Gowd-e-Howz granitoid stock. This composite granitoid stock has normal compositional zoning of the granitoids involving the mafic suites in the margins, intermediates in the middle and the felsic suites in the central part. Despite this issue, it seems that the injection of the mafic/intermediate -felsic magmas was almost coeval and mafic/intermediate parts are co-genetic and differ from felsic parts. Existence of MMEs in the intermediate-felsic parts is a strong evidence of magma chamber processes including assimilation and fractional crystallization (AFC), periodic replenishment, tapping and crystal fractionation (RTF), and magma mixing/mingling between mafic/intermediate -felsic magmas.

3.2. Petrography

The Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) granitoid includes olivine gabbro, gabbro, gabbro-norite, diorite, quartz diorite, monzodiorite/monzonite, quartz monzonite, granodiorite, granite, alkali feldspar granite along with aplitic/pegmatitic fractionated veins that are cut by quartz monzonite dikes. Gabbros have a fine to coarse grained anhedral to subhedral granular and intergranular (in margins) textures consisting of olivine, pyroxene (Cpx, Opx), plagioclase, and amphibole. Diorites have fine to coarse grained and pegmatitic anhedral to subhedral granular and intergranular (in margins) textures consisting of plagioclase, pyroxene, amphibole, and biotite. It seems that some amphiboles (tremolite-actinolite types) are formed by retrograde alteration of pyroxenes. Minor minerals of biotite, opaque, apatite, sphene and alkali feldspar and secondary minerals of calcite, epidote, chlorite, and sericite are present in them. Some amphiboles have also been transformed into the biotite along the margins and cleavage planes due to latter potassic alteration. Plagioclases are mainly subhedral with polysynthetic twins. The evidence of magma mixing/mingling process can be seen in the thin sections as the presence of dark fine-grained parts (MMEs) rich in amphibole and pyroxene in lighter coarse-grained parts rich in feldspar. Quartz diorite/monzonite rocks have a fine, medium to coarse grained anhedral granular texture consisting of the main minerals of plagioclase, alkali feldspar, amphibole and minor minerals of biotite, quartz, zircon, apatite, opaque and secondary minerals of calcite, quartz, epidote, and sericite.

4. Discussions

The Lower Jurassic Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) granitoid stock (≈ 180 Ma) is one of the most important magmatic intrusions in the southern part of Sanandaj-Sirjan Andean type metamorphic-magmatic zone.

This massif has intruded into the Upper Paleozoic metamorphics and Triassic magmatic- sedimentary rocks and is covered by the Jurassic terrigenous sediments and the Lower Cretaceous limestones. This stock has normal compositional zoning of the granitoids include gabbro/diorite and related fractionated products (quartz diorite, monzonite/quartz monzonite) in the margins, granodiorite in the middle and granite-alkali granite in the central part. Chemical compositions of the rock-forming minerals have been analyzed for studying the petrogenesis and physicochemical conditions of crystallization and final replacement of the intrusion (Arabzadeh Baniasadi et al., 2024a, b). In this paper, we present the clinopyroxene data. The clinopyroxenes as the main mineral of mafic-intermediate part of the intrusion are of calcic, mostly with diopside-augite-salite type, oxidant and belongs to I-type calc-alkaline subduction zone magmatic series. Applying the various geothermobarometric calculation methods based on single clinopyroxene indicate temperatures of 800 to 1300°C in pressures of 4 to 12 kbars, equivalent to pressures of 16-50 Km depths for crystallization of Cpx under the medium to high oxygen fugacity and replacement of mafic magma in the base of lower crust (magma underplating in the Moho boundary zone in 50 Km depths) and then uprising and storing of magma into the middle continental crust (16 Km depths). Underplating and intrusion of mafic magma into the lower crust may not only be an important control for the generation of felsic magmas in the lower crust but may also be a strong physical driving mechanism for ascending and intruding of felsic magmas into the upper crust (Schubert et al., 2013).

5. Conclusion

Clinopyroxenes as the main rock-forming mineral of the mafic-intermediate part of the Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) granitoid massif, contain important information about the physicochemical conditions of crystallization, oxygen fugacity, magmatic series, and geotectonic setting of magma genesis. The in-situ chemical analysis of the clinopyroxenes show that they are medium to high pressure calcic type with diopside-augite-salite composition, oxidant and belongs to I-type calc-alkaline subduction zone magmatic series. Geothermobarometric estimations carried out by various single clinopyroxene methods showed that they crystallized under the medium to high oxygen fugacity at 800 to 1300 °C and 4 to 12 kbars pressures in the 16 to 50 Km depths of the continental crust.

Acknowledgments

This paper is a part of the results of the Ph.D. thesis of the first author under the title of "Petrogenesis of the Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) granitoid massif in Baft, south of Kerman", which was done with the supports of the Vice-Chancellor of Research at the Shahrood University of Technology. The authors are grateful to staffs of the Shahrood University of Technology and the Microprobe Laboratories of the Potsdam University (Germany) and Aristotle University, Thessaloniki (Greece) and anonymous reviewers of the Scientific Quarterly Journal of GEOSCIENCES for valuable comments and critical reviews of this manuscript.

کاربرد زمین‌دما - فشارسنج‌های کلینوپروکسنی بر روی سنگ‌های گابرو/دیوریتی همراه با استوک گرانیتویدی گودحوض (سیاه کوه)، بافت، کرمان

محبوبه عرب‌زاده بنی‌اسدی^۱، حبیب‌الله قاسمی^{۱*}، ساموئل آنگی بوست^۲، مهدی رضایی کهخایی^۱ و لامبرینی پاپادوپولو^۳

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ گروه علوم زمین، دانشگاه لیون، لیون، فرانسه

^۳ گروه کانی‌شناسی - سنگ‌شناسی - زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه آریستوتل، تسالونیک، یونان

چکیده

توده گرانیتویدی گودحوض به سن ژوراسیک پیشین (حدود ۱۸۰ میلیون سال پیش) به‌طور عمده متشکل از یک بخش دیوریتی-گرانودیوریتی (دیوریت، کوارتز دیوریت-مونزونیت، کوارتز مونزونیت و گرانودیوریت) به همراه یک بخش کوچک گرانیتی (گرانیت، آلکالی فلدسپار گرانیت، آپلیت و پگماتیت) است که با یک بخش کوچک پیش‌رس گابرویی همراهی می‌شود. این توده در جنوب نوار دگرگونی سندج-سیرجان در جنوب خاور ایران در منطقه دهمسد بافت در استان کرمان، به شکل یک استوک گرانیتویدی بیضوی در سنگ‌های دگرگونی پالئوزویک بالایی و سنگ‌های آذرین-رسوبی تریاس نفوذ کرده است. توالی سنگی ژوراسیک متشکل از شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرا و آهک‌های کرتاسه زیرین بر روی توالی تریاس قرار گرفته‌اند و هیچ اثری از نفوذ توده در آن‌ها وجود ندارد. بافت کلی توده گرانیتویدی از نوع دانه‌ای ناخودشکل متوسط تا درشت‌دانه است ولی در نمونه‌های گرانیتی-آلکالی گرانیتی، بافت‌های میکروگرانوفیری، پرتیتی، میکروگرافیکی و میرمیکیتی نیز دیده می‌شود. کانی‌های اصلی سازنده این سنگ‌ها در نمونه‌های گابرو/دیوریتی شامل الیون، کلینوپروکسن، ارتوپروکسن، آمفیبول، بیوتیت و پلاژیوکلاز و در نمونه‌های گرانودیوریتی-گرانیتی شامل، آمفیبول، بیوتیت، پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار و کوارتز هستند. از کانی‌های فرعی نیز می‌توان به زیرکن، آپاتیت، کانی‌های کدر (اپک) و اسفن و از کانی‌های ثانویه می‌توان به ترمولیت-اکتینولیت، کلریت، اپیدوت، کلسیت، سریسیت و کانی‌های رسی اشاره کرد. از شیمی کلینوپروکسن به عنوان سازنده اصلی نمونه‌های گابرو/دیوریتی برای بررسی ماهیت و محیط زمین‌ساختی تشکیل ماگما و شرایط فیزیکی شیمیایی تبلور (دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن) در سنگ‌های ماپیک-حدواسط توده استفاده شده است. کلینوپروکسن‌های این سنگ‌ها از نوع کلسیک با ترکیب دیوپسید-اوژیت-سالیته و متعلق به سری ماگمایی کالکوالکالین نوع I مناطق فرورانش هستند. برآوردهای دما-فشارسنجی براساس زمین‌دما-فشارسنج‌های مختلف کلینوپروکسنی بیانگر دماهای ۸۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در فشارهای ۴ تا ۱۲ کیلوبار منطبق بر فشارهای اعماق ۱۶ تا ۵۰ کیلومتری برای تبلور این کانی در شرایط فوگاسیته متوسط تا بالای اکسیژن در اعماق ۵۰ تا ۱۶ کیلومتری در پوسته زیرین تا میانی است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

زمین‌دما-فشارسنجی

کلینوپروکسن

گرانیتوید

گودحوض

بافت

کرمان

۱- پیش‌نوشتار

برای درک فرایندهای حاکم بر تبلور توده‌های ماگمایی ماپیک-حدواسط استفاده می‌شود. کلینوپروکسن‌ها در طیف گسترده‌ای از شرایط دمایی (۸۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) و شرایط فشاری (فشارهای حدود ۳۰ کیلوباری حاکم بر اعماق گوشته تا فشارهای سطح زمین) پایدار هستند. از گذشته‌های دور، از ترکیب کلینوپروکسن

استفاده از ترکیب شیمیایی کانی‌ها برای برآورد شرایط فیزیکی شیمیایی حاکم بر تبلور توده‌های ماگمایی و جایگزینی نهایی آن‌ها در پوسته، یکی از موضوعات مهم در سنگ‌شناسی آذرین است. ترکیب شیمیایی کلینوپروکسن‌ها، بسیار نزدیک به ترکیب شیمیایی سنگ‌های بازالتی است و به همین دلیل از ترکیب این کانی

* نویسنده مسئول: حبیب‌الله قاسمی؛ E-mail: h-ghasemi@shahroodut.ac.ir

ماخذنگاری:

عرب‌زاده بنی‌اسدی، م.، قاسمی، ح.، آنگی بوست، س.، رضایی کهخایی، م. و پاپادوپولو، ل. کاربرد زمین‌دما- فشارسنج‌های کلینوپروکسنی بر روی سنگ‌های گابرو/دیوریتی همراه با استوک گرانیتویدی گودحوض (سیاه کوه)، بافت، کرمان. فصلنامه علمی علوم زمین، ۱۳۳ (۳)، ۱۱۷-۱۳۴. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.445550.2136>

doi: 10.22071/gsj.2024.445550.2136



doi: 20.1001.1.10237429.1403.34.3.8.6

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



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

گرانیت‌ها انتخاب و آنالیز شیمیایی کانی‌ها در آزمایشگاه‌های الکترون میکروپروپ و دانشگاه‌های پتسدام کشور آلمان و آریستوتل کشور یونان انجام شده است. آنالیز شیمیایی بر روی کانی‌های موجود در پنج نمونه (MH-6, MH-8, MH-21), (MH-40, MH-43) در کشور آلمان و با استفاده از دستگاه ریزپردازشگر الکترونی مدل JEOL JXA-8230 با ولتاژ شتاب دهنده 15 kV، جریان پرتوی 20 nA، زمان شمارش ۱۰ ثانیه برای عناصر Si, K, Cr, Na, P و ۲۰ ثانیه برای عناصر Al, Ca, Fe, Mn, Mg, Ti, F, Cl با حدود تشخیص ۰.۲٪ تا ۰.۹٪ درصد وزنی انجام شده است (جدول ۱). همچنین کانی‌های موجود در هشت نمونه (MH-56, MH-57, MH-58, MH-66) نیز در کشور یونان و با استفاده از دستگاه ریزپردازشگر الکترونی مدل JEOL JSM-6390LV با ولتاژ شتاب دهنده 20 kV، جریان پرتوی 0.4 mA، زمان شمارش ۸۰ ثانیه انجام شده است (جدول ۱). به دلیل تعداد کم نقاط آنالیز شده در نمونه‌های MH-6 و MH-43 در آلمان، این نمونه‌ها دوباره در کشور یونان نیز آنالیز شده‌اند. تعداد اکسیژن‌ها و کاتیون‌های مورد محاسبه در ترکیب کلینوپروکسن‌ها به ترتیب ۶ و ۴ بوده است.

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- زمین‌شناسی منطقه

توده گرانیتوئیدی گودحوض یا سیاه کوه، به‌طور عمده متشکل از دیوریت، کوارتز دیوریت، مونزونیت، کوارتز مونزونیت و گرانودیوریت همراه با مقادیر کمتری از گرانیت، آلکالی فلدسپار گرانیت، آپلیت و پگماتیت است که با یک بخش کوچک گابروی پیش‌رس همراهی می‌شود و در ۶۰ کیلومتری جنوب خاور بافت (۲۵۰ کیلومتری جنوب کرمان)، در منطقه دهمرد واقع شده است (شکل ۱). این توده در محدوده نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ حاجی‌آباد (سبزه‌ئی و همکاران، ۱۳۷۲) و ۱:۱۰۰۰۰۰ دهمرد (ناظم زاده و رشید، ۱۳۸۵) قرار دارد. نام این توده در نقشه حاجی‌آباد و از نام سیاه کوه واقع در حدود ۲۰ کیلومتری جنوب باختری این توده برگرفته شده است. سیاه کوه از یک مجموعه سنگی کاملاً سیاه رنگ متشکل از گدازه‌های بازالتی افیولیت ملائزه‌های کرتاسه بالایی بافت تشکیل شده که یک توده کوچک پلاژیوگرانیتی (به نام زاغ دره) به سن پس از کرتاسه در آن نفوذ کرده است (کشفی و همکاران، ۱۴۰۲). نظر به تفاوت سنی (ژوراسیک پیشین در مقابل کرتاسه) و ماهیت کاملاً متفاوت غیرپلاژیوگرانیتی توده گودحوض و پلاژیوگرانیتی توده زاغ دره و به جهت قرارگیری روستای گودحوض بر روی توده گرانیتی مورد مطالعه، تصمیم گرفته شد که از نام گودحوض برای معرفی این توده استفاده گردد. در نقشه زمین‌شناسی حاجی‌آباد، واحدهای سنگی میزبان توده گودحوض یا همان سیاه کوه به سن پالئوزویک و سن توده نیز تریاس پسین و در نقشه دهمرد، واحدهای سنگی میزبان توده به سن‌های ژوراسیک و کرتاسه پسین (احتمالاً به دلیل مشاهده توده گرانیتی زاغ دره در افیولیت ملائزه‌های کرتاسه و مشابه پنداشتن آن با توده گودحوض) و سن توده پس از کرتاسه پسین یعنی سنوزویک گزارش شده است.

بررسی‌های صحرایی این پژوهش از جمله مطالعه دقیق سطح تماس فازهای تزریقی (وجود مرزهای تیز انجماد سریع متعلق به بخش‌های پیش‌رس تا مرزهای تدریجی انتشاری و کروی که نشانه گرم بودن آنکلاو و نداشتن اختلاف زمانی طولانی فازهای تزریقی است) و مطالعات سنگ‌نگاری و شیمی کانی از جمله حضور میکروآنکلاوهای گابرویدی و حتی بیگانه‌بلورهای (زینو کریست‌های) پلاژیوکلاز با ترکیب لابرادوریتی- بیوتیتی در نمونه‌های گرانودیوریتی- گرانیتی نشان می‌دهند که توده گرانیتوئیدی گودحوض (سیاه کوه) به صورت یک استوک نسبتاً بزرگ بیضوی شکل کشیده با روند تقریبی خاوری- باختری در میان سنگ‌های دگرگونی پالئوزویک بالایی و سنگ‌های آذرین- رسوبی تریاس برنزد دارد (شکل ۱). در مرز جنوبی و با سطح تماس نفوذی کاملاً مشخص (شکل‌های ۱ و ۲- A, B, C) این توده به درون مجموعه‌های آذرین- دگرگونی پالئوزویک بالایی سرگز- آب‌شور

برای برآورد دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن در زمان تبلور ماگمای سازنده آن استفاده شده است و معادلات دما-فشارسنجی مختلفی برای آن ارائه شده است (Wood and Banoo, 1973; Wells, 1977; Nisbet and Pearce, 1977; Schweitzer et al., 1979; Lindsley, 1983; Davidson, 1985; Davidson and Lindsley, 1985; Bertrand and Mercier, 1985; Kretz, 1994; Soesoo, 1997; Nimis and Taylor, 2000; Putirka, 2008; Wang et al., 2021; Wieser et al., 2023).

در حال حاضر از ترکیب شیمیایی کانی‌ها برای پی بردن به طبیعت شیمیایی، شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر تبلور، نحوه تکوین و تکامل ماگما و تعیین محیط زمین‌ساختی تشکیل آن استفاده می‌شود. از آنجا که شیمی کانی‌ها، بازتابی از شیمی ماگمای در حال تبلور است، بنابراین کانی‌های مقاوم در برابر دگرسانی و هوازگی مانند کلینوپروکسن، نقش مهمی در این برآوردها دارند. استفاده از شیمی کانی‌ها از طریق انجام آنالیزهای نقطه‌ای میکروپروپ و محاسبه فرمول ساختمانی آن‌ها امکان‌پذیر است. پروکسن به عنوان یکی از کانی‌های اصلی و مهم سازنده سنگ‌های مافیک- حدواسط توده گرانیتوئیدی گودحوض، بازتاب‌دهنده ترکیب ماگمای والد، شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر تبلور در آشیانه/آشیانه‌های ماگمایی، محیط زمین‌ساختی تشکیل ماگمای والد و عمق نهایی جایگزینی این توده است.

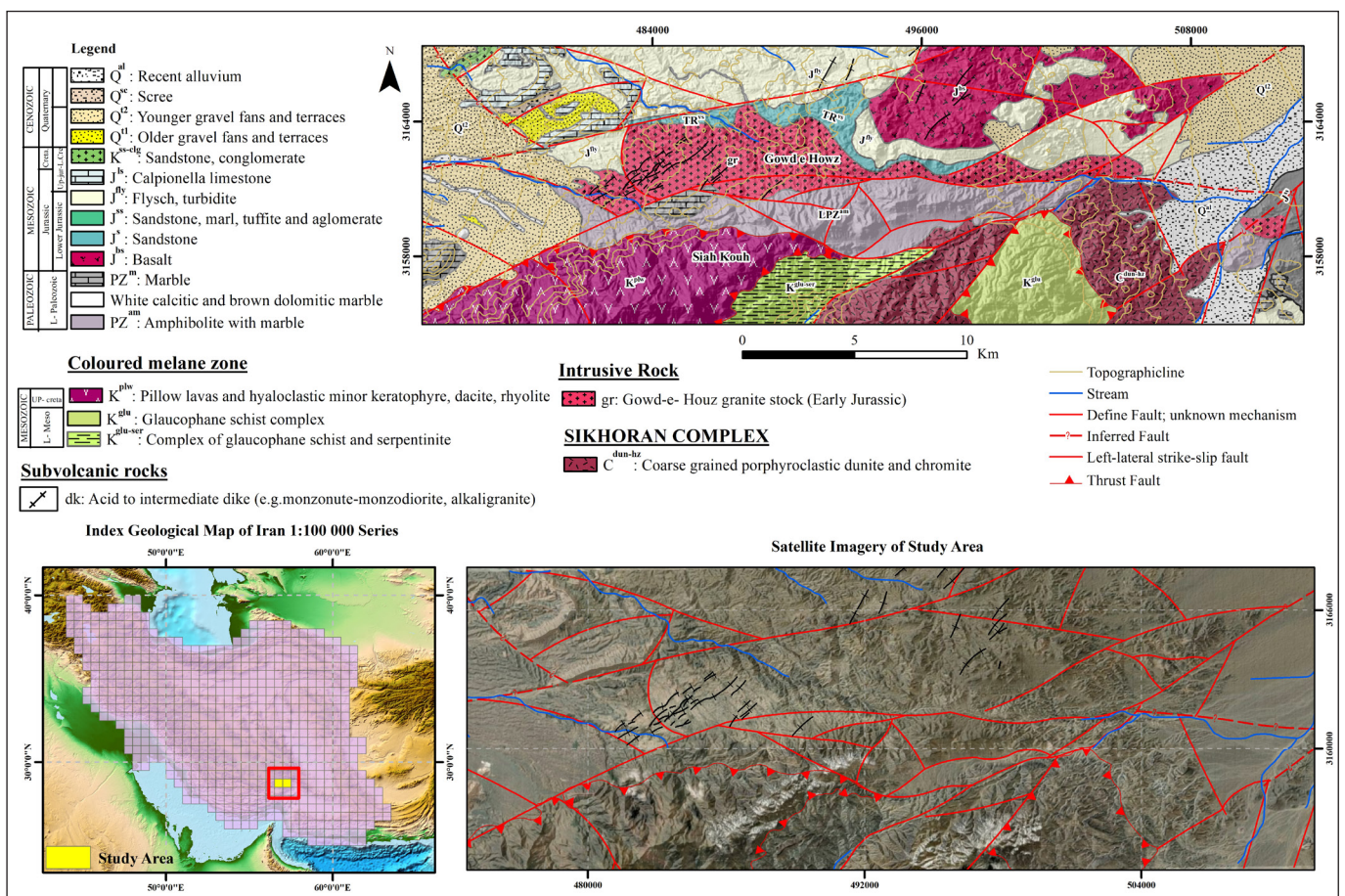
استوک گرانیتوئیدی گودحوض یا سیاه کوه به سن ژوراسیک پیشین (۱۸۰ میلیون سال) در جنوبی‌ترین بخش پهنه دگرگونی- ماگمایی سندج- سیرجان در جنوب خاور بافت در جنوب کرمان قرار دارد. این توده را یکی از نشانه‌های ماگمایی مهم برای شروع فرورانش حوضه اقیانوسی تیس‌جوان (نئوتیس) در تریاس پسین برشمرده‌اند (عرب‌زاده بنی اسدی و همکاران، ۱۴۰۲ الف و ب؛ Arvin et al., 2007; Jafari et al., 2023). کارهای پیشین انجام شده در مورد این توده و دایک‌های موجود در آن، شامل تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ حاجی‌آباد که در آن سن توده به تریاس نسبت داده شده است (سبزه‌ئی و همکاران، ۱۳۷۲) و ۱:۱۰۰۰۰۰ دهمرد (ناظم‌زاده و رشید، ۱۳۸۵) که در آن سن توده پس از کرتاسه ذکر شده و دو مطالعه در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عناوین ژئوشیمی و پترولوژی توده گرانیتی سیاه کوه (ملکی زاده، ۱۳۷۹) و ژئوشیمی و پترولوژی دایک‌های حدواسط- اسیدی موجود در منطقه دهمرد (قنبرزاده، ۱۳۹۰) است. ملکی زاده (۱۳۷۹) با پذیرش سن تریاس، توده را شامل طیف ترکیبی گسترده‌ای از گابرو تا آلکالی فلدسپار گرانیت، از نوع I و کالکوآلکالین حاشیه قاره و محصول فرورانش ورقه اقیانوسی تیس‌جوان به زیر ایران مرکزی در تریاس دانسته است. آروین و همکاران (Arvin et al., 2007) مقاله ارزشمندی را از پایان‌نامه ملکی زاده (۱۳۷۹) انتشار داده‌اند. آنان با انجام آنالیزهای ایزوتوپی روییدیم- استرانسیم سنگ کل، سن توده را ۱۹۹ میلیون سال و ترکیب آن را از گابرو تا آلکالی فلدسپار گرانیت، از نوع I و کالکوآلکالین حاشیه قاره و محصول فرورانش ورقه اقیانوسی تیس‌جوان به زیر ایران مرکزی در تریاس دانسته‌اند. با این حال، در مورد شیمی کانی‌های سنگ‌های سازنده توده تاکنون مطالعه‌ای صورت نگرفته است. نگارنده اول مقاله این توده را با رویکردی تازه، با بررسی‌های دقیق صحرایی، سنگ‌نگاری، شیمی کانی، ژئوشیمی سنگ کل، ژئوشیمی ایزوتوپی و سن‌سنجی به روش دقیق اورانیم- سرب بر روی کانی زیرکن مورد بررسی قرار داده است. در مقاله حاضر، برای نخستین بار با استفاده از شیمی کانی کلینوپروکسن به بررسی زمین‌دما-فشارسنجی و شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر تبلور و جایگزینی و همچنین ماهیت و محیط زمین‌ساختی تشکیل ماگمای بخش مافیک- حدواسط این توده پرداخته شده است.

۲- روش پژوهش

پس از انجام مطالعات و برداشت‌های دقیق صحرایی، تهیه نقشه زمین‌شناسی، تهیه مقاطع نازک و نازک صیقلی و انجام مطالعات سنگ‌نگاری، نمونه‌های مناسب معرف واحدهای سنگی اصلی منطقه شامل گابرو/ دیوریت‌ها، گرانودیوریت‌ها و

و خیلی مشابه با سازند شال در البرز غربی) با کنگلومرای قاعده‌ای، ماسه سنگ، سیلستون، شیل، آهک خاکستری تیره رنگ فسیل دار، گدازه‌های ریولیتی/ داسیتی و آذرآواری‌های وابسته و دایک‌های ریولیتی/ داسیتی، بر روی سری سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی تریاس که میزبان توده است، قرار گرفته‌اند و برخلاف نوشته‌های موجود در شرح برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ دهمرد (ناظم‌زاده و رشید، ۱۳۸۵)، هیچ اثری از نفوذ توده گرانیتی گودحوض به داخل سری تخریبی معادل شمشک دیده نمی‌شود و بنابراین، از دیدگاه بررسی‌های صحرایی نیز سن توده نمی‌تواند پس از ژوراسیک باشد. البته، سن سنجی ایزوتوپی به روش اورانیم- سرب بر روی زیرکن‌های جداشده از دو نمونه گرانودیوریتی و گرانیتی توده نیز بیانگر سن حدود ۱۸۰ میلیون سال آن است که با یافته‌های صحرایی کاملاً سازگار است (عرب زاده بنی اسدی و همکاران، ۱۴۰۲ الف و ب).

(سبزه‌ئی و همکاران، ۱۳۷۲؛ عرب‌زاده بنی اسدی و همکاران، ۱۴۰۲- الف و ب؛ اسدی و همکاران، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲؛ Asadi et al. 2023b) نفوذ کرده، قطعاتی از آن‌ها را به شکل بیگانه‌سنگ (زینولیت) دربر گرفته است. سن پالئوزوئیک بالایی (کرنیفر) سنگ‌های آذرین و دگرگونی مجموعه‌های سرگز- آب شور در مطالعات پیشین ثابت شده است (قاسمی، ۱۳۷۹؛ قاسمی و همکاران، ۱۳۷۷، ۱۳۸۰، ۱۳۸۳؛ اسدی و همکاران، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲؛ Asadi et al., 2023b; Moghadam et al., 2017). در مرز شمالی، این توده به درون یک سری سنگی آتشفشانی- رسوبی متشکل از شیل، ماسه سنگ، داسیت، ریوداسیت، ریولیت و آذرآواری‌های وابسته به سن تریاس نفوذ کرده است (شکل ۱). سنگ‌های منسوب به تریاس با مرز عادی در زیر توالی تخریبی تریاس بالایی- ژوراسیک زیرین (معادل گروه شمشک) قرار دارند. سنگ‌های عمدتاً تخریبی تریاس بالایی- ژوراسیک زیرین (معادل گروه شمشک



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی استوگ گرانیتوئیدی گودحوض (سیاه کوه) که با برداشت‌های دقیق صحرایی این پژوهش و استفاده از اطلاعات پایه نقشه‌های زمین‌شناسی ورقه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ حاجی‌آباد (سبزه‌ئی و همکاران، ۱۳۷۲) و ۱:۱۰۰۰۰۰ دهمرد (ناظم‌زاده و رشید، ۱۳۸۵) رسم شده است.

Figure 1. Geological map of the Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) granitoid stock which prepared by using of the detailed field surveying of this research and basic information of the geological map sheets of 1:250000 Hajjiabad (Sabzehei et al., 1993) and 1:100000 Dehsard (Nazemzadeh and Rashid, 2006).

جدول ۱- نتایج آنالیز برخی از کلینوپیکروکسن‌های موجود در یک نمونه دیوریتی و یک نمونه گابرویی توده گرانیتویدی گودحوض و نتایج زمین دما-فشارسنجی آن‌ها.

Table 1. Some selective analyses of clinopyroxenes of one gabbro and one diorite samples of the Gowd-e-Howz granitoid stock and theirs thermobarometry results.

Sample	MH-8-Diorite									
SiO ₂	52.44	52.38	52.62	52.50	52.36	52.97	52.90	52.13	52.71	52.94
TiO ₂	0.208	0.164	0.133	0.155	0.117	0.185	0.184	0.14	0.164	0.114
Al ₂ O ₃	0.92	0.75	0.39	0.67	0.78	0.41	0.60	0.79	0.83	0.85
Cr ₂ O ₃	0.01	0.04	0.00	0.06	0.06	0.04	0.00	0.03	0.05	0.07
FeO	7.82	8.15	8.16	7.56	7.51	7.68	7.92	7.82	7.78	7.90
MnO	0.22	0.20	0.50	0.16	0.18	0.20	0.20	0.21	0.19	0.18
MgO	14.86	14.78	14.98	14.89	14.88	14.89	14.87	14.82	14.85	14.77
CaO	22.62	22.11	22.18	21.77	22.52	22.01	21.77	22.01	21.93	21.70
Na ₂ O	0.18	0.16	0.17	0.18	0.13	0.17	0.15	0.14	0.10	0.16
Sum	99.28	99.10	99.15	98.09	99.36	98.94	98.90	98.78	98.52	98.71
Si	1.96	1.96	1.97	1.95	1.98	1.98	1.98	1.98	1.97	1.98
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02
Fe ^{tot}	0.24	0.26	0.25	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.82	0.82	0.83	0.83	0.82	0.83	0.83	0.82	0.83	0.82
Ca	0.90	0.89	0.89	0.88	0.89	0.88	0.87	0.88	0.88	0.87
Fe ³⁺	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.23	0.25	0.25	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Wo	0.46	0.45	0.45	0.45	0.46	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
En	0.42	0.42	0.42	0.43	0.42	0.43	0.43	0.42	0.43	0.43
FS	0.12	0.13	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
sum	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Al ^{iv}	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al ^{vi}	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01
Mg#	0.77	0.76	0.77	0.78	0.78	0.78	0.77	0.77	0.77	0.77
Putrika (2008) P	2.05	1.82	1.97	1.42	0.56	2.41	4.65	4.65	4.89	5.90
Nimiss and Taylor (2000) C°	1144	1145	1143	1142	1143	1145	1143	1138	1141	1140
Putrika(2008) C°	1120	1124	1133	1132	1125	1123	1126	1124	1123	1122
Kretz (1994) K°	934	966	967	968	933	960	974	959	963	971

Sample	MH-56-Gabbro									
SiO ₂	52.93	53.41	53.39	53.57	52.84	52.49	53.43	53.20	54.29	53.25
TiO ₂	0.00	0.25	0.40	0.55	0.62	0.49	0.00	0.02	0.11	0.26
Al ₂ O ₃	2.79	2.41	2.04	2.75	3.31	2.72	2.96	2.23	1.82	2.87
Cr ₂ O ₃	0.70	0.02	0.00	0.31	0.18	0.36	0.24	0.98	0.02	0.00
Fe ₂ O ₃	0.73	0.10	1.11	0.06	0.00	0.36	0.24	0.98	0.02	0.39
FeO	3.61	3.70	3.57	2.83	4.14	3.40	3.67	3.98	3.03	3.08
MnO	0.00	0.00	0.49	0.00	0.48	0.31	0.17	0.07	0.32	0.00
MgO	16.87	16.49	18.06	16.54	18.68	16.19	15.61	16.28	19.50	19.11
CaO	22.29	23.22	21.94	23.14	19.97	23.68	23.33	24.36	21.02	21.32

ادامه جدول ۱- نتایج آنالیز برخی از کلینوپیکروکسن‌های موجود در یک نمونه دیوریتی و یک نمونه گابرویی توده گرانیتویدی گودحوض و نتایج زمین‌دما-فشارسنجی آن‌ها.

Continued from Table 1. Some selective analyses of clinopyroxenes of one gabbro and one diorite samples of the Gowd-e-Howz granitoid stock and theirs thermobarometry results.

Sample	MH-56-Gabbro									
Na ₂ O	0.25	0.25	0.08	0.57	0.00	0.13	0.50	0.05	0.00	0.00
Sum	101.35	99.91	101.24	100.33	100.28	100.14	99.98	101.17	100.34	100.50
Si	1.92	1.95	1.92	1.94	1.91	1.92	1.95	1.93	1.95	1.92
Ti	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.12	0.10	0.09	0.12	0.14	0.12	0.13	0.10	0.08	0.12
Fe ^{tot}	0.11	0.11	0.11	0.08	0.13	0.10	0.14	0.11	0.12	0.10
Mn	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
Mg	0.91	0.90	0.95	0.89	0.93	0.88	0.85	0.88	0.96	0.94
Ca	0.87	0.91	0.85	0.90	0.77	0.93	0.91	0.95	0.81	0.82
Fe ³⁺	0.00	0.03	0.01	0.05	0.04	0.01	0.00	0.00	0.11	0.01
Fe ²⁺	0.11	0.11	0.11	0.08	0.13	0.10	0.11	0.12	0.09	0.09
Wo	0.46	0.47	0.44	0.48	0.41	0.48	0.49	0.49	0.42	0.42
En	0.48	0.47	0.50	0.48	0.53	0.46	0.45	0.45	0.54	0.53
FS	0.06	0.06	0.06	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.05
sum	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Al ^{iv}	0.08	0.05	0.08	0.06	0.09	0.08	0.09	0.05	0.07	0.08
Al ^{vi}	0.04	0.05	0.01	0.06	0.05	0.03	0.03	0.08	0.02	0.04
Mg#	0.89	0.89	0.90	0.91	0.88	0.89	0.85	0.88	0.88	0.91
putrika (2008) P	5.19	4.51	0.16	6.76	5.80	2.72	2.92	7.05	0.44	4.34
Nimiss and taylor (2000) C°	951	839	1028	791	1156	801	304	732	746	1116
Putrika(2008) C°	1216	1193	1220	1184	1225	1184	1030	1178	1180	1236
Kretz (1994) K°	1068	1154	1141	1120	1072	1095	1037	906	1235	1120

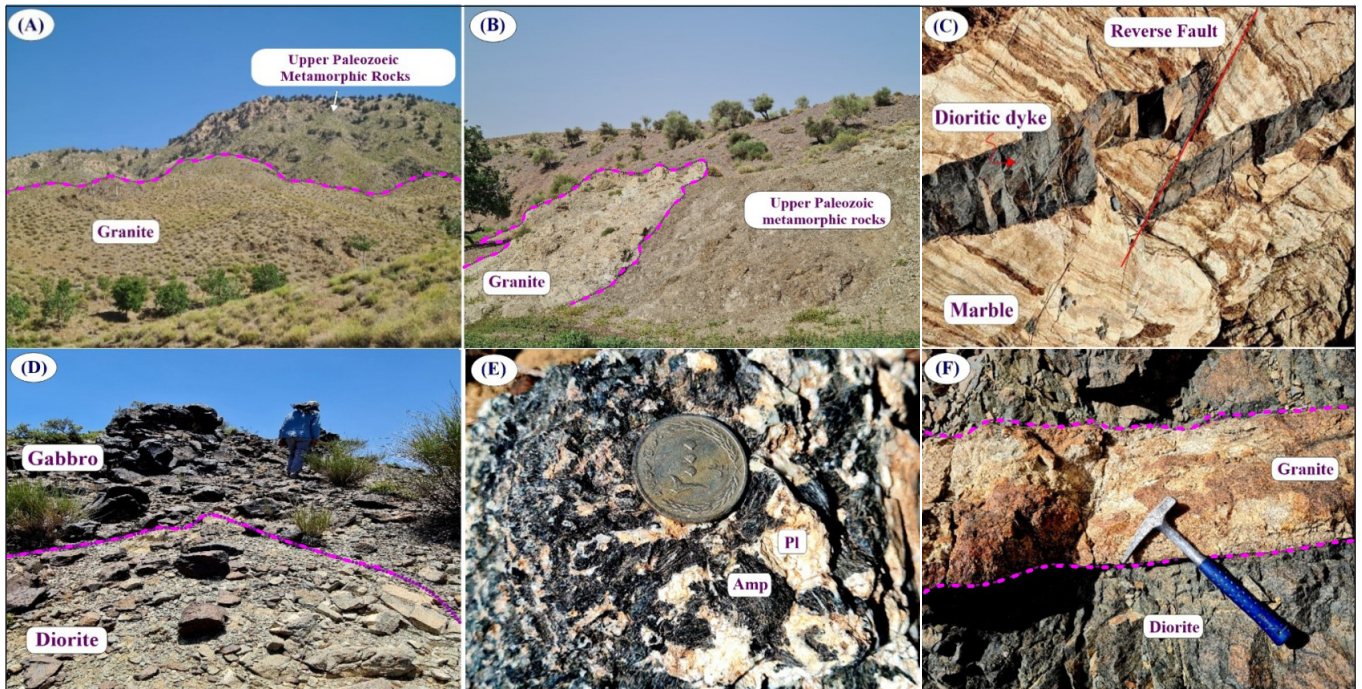
صورت رگه-رگچه‌ها و دایک‌های صورتی روشن آپلیتی-پگماتی (شکل ۳- D) به فراوانی در دیگر بخش‌ها از جمله گرانیت‌ها دیده می‌شوند. در نهایت، آخرین فاز ماگمایی منطقه و البته نامرتب با توده گرانیتویدی گودحوض، به صورت تزریق دسته دایک‌های بزرگ و غالباً موازی تیره رنگ دانه ریز با حاشیه‌های انجماد سریع شیشه‌ای با ترکیب کوارتز مونوزونیتی (شکل ۱) با روند چیره شمال خاوری-جنوب باختری است که توده گرانیتویدی گودحوض را قطع کرده‌اند (عرب زاده بنی اسدی و همکاران، ۱۴۰۲ الف و ب). این دایک‌ها تا بخش زیرین واحدهای ژوراسیک دیده می‌شوند و در نهایت، در داخل گدازه‌های ریولیتی/داسیتی درون واحدهای ژوراسیک ناپدید می‌شوند و با توجه به ترکیب شیمیایی مشابه با گدازه‌ها، کاملاً آشکار است که مجاری تغذیه‌کننده گدازه‌های موجود در سنگ‌های رسوبی تخریبی ژوراسیک زیرین هستند.

سنگ‌های بخش‌های مختلف توده گودحوض بسته به ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی خود در صحرا به رنگ‌های مختلف تیره در نمونه‌های گابرویی (شکل ۲- D)، خاکستری تیره تا روشن در نمونه‌های دیوریتی-گرانودیوریتی (شکل ۲- D) و روشن در نمونه‌های گرانیتی-آلکالی فلدسپار گرانیتی (شکل ۳) دیده می‌شوند. از کانی‌های قابل دید در نمونه‌های دستی می‌توان به پیروکسن، پلاژیوکلاز، آمفیبول، بیوتیت و کوارتز در اندازه‌های ریز کمتر از ۱ میلی‌متری (شکل ۴) تا بلورهای

برداشت‌های صحرایی دقیق نشان می‌دهند که این توده به صورت یک مجموعه گرانیتویدی پیوسته واحد ولی در فازهای تزریقی متوالی جایگزین شده است. نخستین فاز تزریقی شامل جایگزینی ماگمای مافیک-حدواسط گابرو/دیوریتی بوده که در حاشیه جنوبی توده در محل تماس با دگرگونه‌های پالئوزویک بالای به صورت سنگ‌های کاملاً تیره رنگ دانه ریزدانه تا تفریق یافته‌های دانه درشت حاوی بلورهای روشن پلاژیوکلاز و آمفیبول رخنمون دارد (شکل ۲- D, E). سنگ‌های این فاز به صورت آنکلاو در فاز دوم گرانودیوریتی شناورند (شکل ۳- A). افزون بر این، مرز دیوریت‌ها و گرانودیوریت‌ها کاملاً تدریجی و انتشاری است و در صحرا قابل نقشه‌برداری نیست. دومین فاز تزریقی، شامل جایگیری توده بزرگ اصلی گرانودیوریتی گودحوض است که سرشار از آنکلاوهای ریز و درشت میکروگرانولار مافیک (Didier, 1991) یا میکروگرانیتویدی مافیک (Vernon, 1984) (Mafic Microgranular/Microgranitoid Enclaves, MMEs) یعنی بخش‌های گسیخته شده فاز مافیک-حدواسط قبلی و همچنین آنکلاوهایی از جنس حاشیه‌های انجماد سریع خود توده (اتولیت) است (شکل ۳- A). سومین فاز نفوذی شامل تزریق توده روشن گرانیتی دانه درشت (شکل ۳- C) به درون بخش‌های دیوریتی (شکل ۲- F) و گرانودیوریتی قبلی است. آنکلاوهایی از فاز گرانودیوریتی در فاز گرانیتی دیده می‌شوند (شکل ۳- B). بخش‌های تفریقی ماگمای گرانیتی نیز به

در نمونه‌های آپلیتی و بزرگتر از ۵ سانتی‌متری در رگه‌های پگماتیته اشاره کرد (شکل ۳- C, D).

درشت آمفیبول و پلاژیوکلاز بزرگتر از ۵ سانتی‌متری در رگه‌های دیوریتی با ساخت پگماتیته (شکل ۲- E) و کوارتز و فلدسپارهای بزرگتر از ۳ میلی‌متری



شکل ۲- تصاویر صحرایی از روابط توده گرانیتویدی گودحوض با سنگ‌های میزبان. (A) مرز جنوبی توده گرانیتویدی گودحوض با دگرگونه‌های پالئوزویک بالایی. (B) نمای نزدیک از سطح تماس نفوذی توده گرانیتویدی با دگرگونه‌های پالئوزویک بالایی. (C) تزریق دایک دیوریتی در مرمرهای پالئوزویک بالایی و گسل خوردگی بعدی آن. (D) نمایی از سنگ‌های گابروی تیره در حاشیه و بخش روشن دیوریتی. (E) نمای نزدیک از بخش روشن دیوریتی با ساخت پگماتیته متشکل از آمفیبول و پلاژیوکلاز. (F) نمای نزدیک از تزریق دایک گرانیتی به درون دیوریت‌ها.

Figure 2. Field photographs of the Gowd-e-Howz granitoid with the host rocks. A) Southern border of the Gowd-e-Howz granitoid with the Upper Paleozoic metamorphic rocks. B) Closed view of intrusive contact of the granitoid with the Upper Paleozoic metamorphic rocks. C) Intrusion of dioritic dyke into the Upper Paleozoic marbles and its later faulting. D) View of dark gabbroic rocks in the margin and light dioritic part. E) Closed view of the light dioritic part with pegmatitic structure composed of amphibole and plagioclase. F) Closed view of intrusion of the granitic dyke into the diorites.

شکل ۳- تصاویر صحرایی از روابط فازهای نفوذی توده گرانیتویدی گودحوض. (A) حضور آنکلاو دیوریتی در داخل بخش گرانودیوریتی. (B) حضور آنکلاو گرانودیوریتی در داخل بخش گرانیتی. (C) نمای نزدیک از ساخت دانه درشت فاز گرانیتی. (D) نمای نزدیک از تزریق فاز سوم گرانیتی و فاز آپلیتی- پگماتیته در داخل فاز دوم گرانودیوریتی.

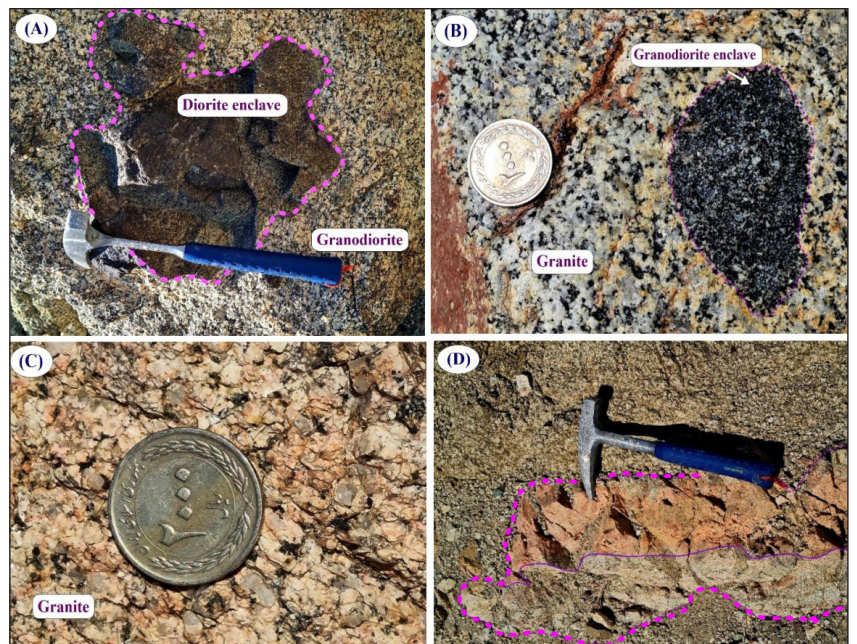
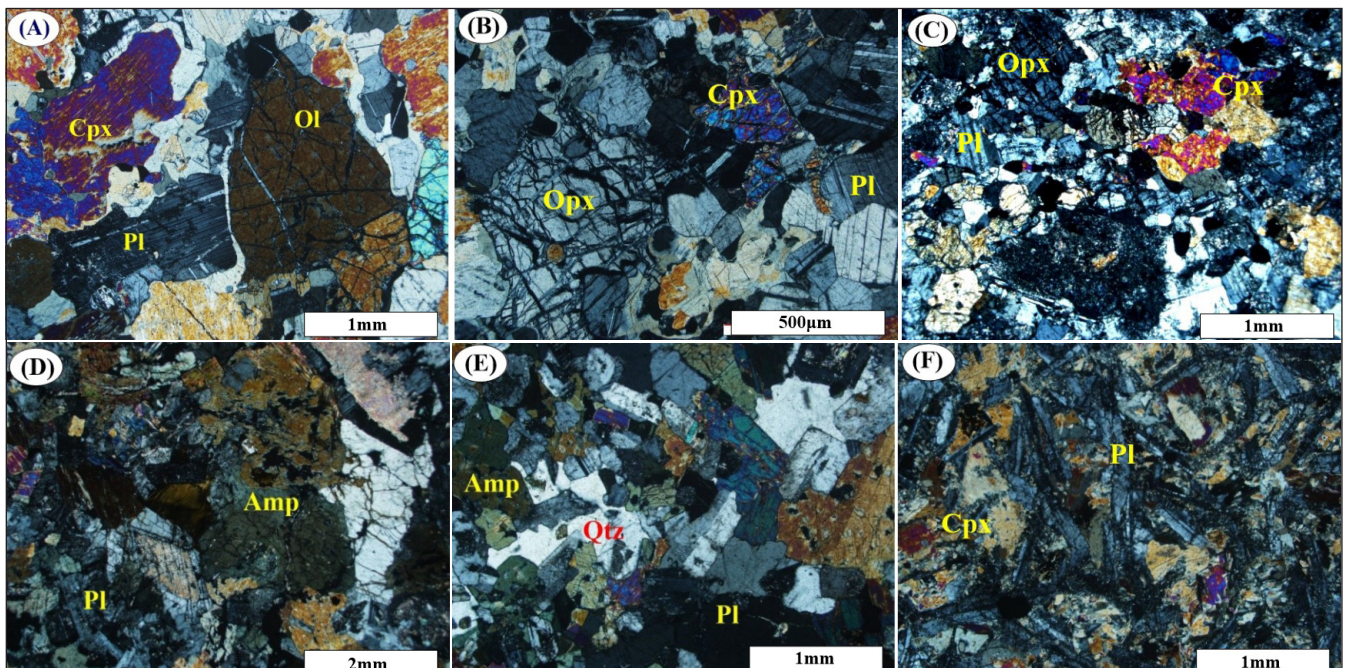


Figure 3. Field photographs of the intrusive phase relations in the Gowd-e-Howz granitoid. A) Existence of the dioritic enclave into the granodiorite part. B) Existence of the granodioritic enclave into the granite part. C) Closed view of the coarse-grained structure of the granite phase. D) Closed view of intrusion of the third granitic and aplitic-pegmatitic phase into the second granodioritic phase.

۲-۳- سنگ‌نگاری

۱۵ درصد)، آمفیبول (حدود ۲۵ درصد)، پلاژیوکلاز (حدود ۶۰ درصد) و مقادیر کمتر از ۵ درصد ارتوپیروکسن و بیوتیت هستند (شکل ۴- C, D). در نمونه‌های تفریق یافته کوارتز دیوریتی دارای کمتر از ۱۰ درصد کوارتز هستند (شکل ۴- E). آن‌ها در حاشیه‌ها دارای بافت‌های دانه‌ای ریزبلور و اینترگرانولار (شکل ۴- F) و در رگه‌های داخل گابروها دارای بافت پگماتیته با آمفیبول و پلاژیوکلازهای بزرگ‌تر از ۵ سانتی‌متری هستند (شکل ۲- E). سرپانتینی شدن الیون‌ها، اورالیتی شدن پیروکسن‌ها، کلریتی و اپیدوتی شدن آمفیبول‌ها، و سوسوریتی، سریستی و کانولیتی شدن فلدسپارها از دگرسانی‌های شایع در نمونه‌های توده گرانیتویدی گودحوض است.

توده گرانیتویدی گودحوض از گابرو/ دیوریت، کوارتز دیوریت، مونزونیت، کوارتز مونزونیت، گرانودیوریت، گرانیت و آلکالی فلدسپار گرانیت تشکیل شده است. گابروها از انواع الیون گابرو، گابرو تا گابرونوریت متغیرند و دارای بافت دانه‌ای ناخودشکل تا نیمه خودشکل متشکل از الیون (به میزان ۱۰ تا ۱۵ درصد) در اندازه ریز کوچکتر از ۲ میلی‌متر، کلینوپیروکسن (حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد) در اندازه ۱ تا ۵ میلی‌متر، آمفیبول (حدود ۲۰ درصد) در اندازه ۲ تا ۱۰ میلی‌متر، پلاژیوکلاز (حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد) در اندازه ۱ تا ۱۰ میلی‌متر و مقادیر کمتر از ۵ درصد ارتوپیروکسن در اندازه ۱ تا ۵ میلی‌متری هستند (شکل ۴- A, B). دیوریت‌ها نیز دارای بافت دانه‌ای ناخودشکل تا نیمه خودشکل متشکل از کلینوپیروکسن (حدود



شکل ۴- تصاویر سنگ‌نگاری (پتروگرافی) در نور (XPL) از نمونه‌های سنگی استوک گرانیتویدی گودحوض. (A) بافت دانه‌ای متشکل از الیون (Ol)، کلینوپیروکسن (Cpx) و پلاژیوکلاز (Pl) در الیون گابرو. (B) بافت دانه‌ای متشکل از کلینوپیروکسن (Cpx)، ارتوپیروکسن (Opx) و پلاژیوکلاز (Pl) در گابرونوریت. (C) بافت دانه‌ای متشکل از ارتوپیروکسن (Opx)، کلینوپیروکسن (Cpx) و پلاژیوکلاز (Pl) در دیوریت‌ها. (D) بافت دانه‌ای متشکل از آمفیبول (Amp) و پلاژیوکلاز (Pl) در دیوریت‌ها. (E) بافت دانه‌ای متشکل از آمفیبول (Amp)، پلاژیوکلاز (Pl) و کوارتز (Qtz) در کوارتز دیوریت‌ها. (F) بافت اینترگرانولار متشکل از کلینوپیروکسن (Cpx) و پلاژیوکلاز (Pl) در دیوریت‌ها.

Figure 4. Photomicrographs of the rock units of the Gowd-e-Howz granitoid stock in the XPL light. A) Granular texture composed of olivine (Ol), clinopyroxene (Cpx) and plagioclase (Pl) in the olivine gabbro. B) Granular texture composed of clinopyroxene (Cpx), orthopyroxene (Opx) and plagioclase (Pl) in the gabbro-norite. C) Granular texture composed of clinopyroxene (Cpx), orthopyroxene (Opx) and plagioclase (Pl) in the diorites. D) Granular texture composed of amphibole (Amp) and plagioclase (Pl) in the diorites. E) Granular texture composed of amphibole (Amp), plagioclase (Pl) and quartz (Qtz) in the quartz diorites. F) Intergranular texture composed of amphibole (Amp) and plagioclase (Pl) in the diorites.

۴- بحث

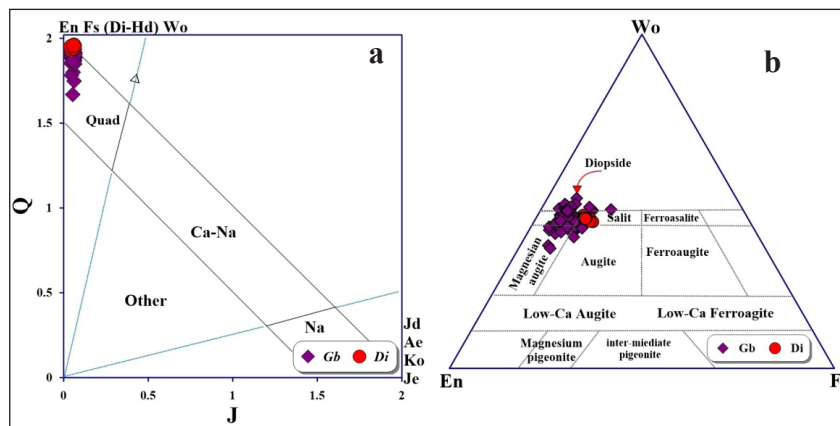
۴-۱- شیمی کلینوپیروکسن

کانی‌ها و مذاب همزیست در حال تبلور از آن است. تعیین این شرایط براساس اصول ترمودینامیکی تعادل کانی- مذاب و از طریق تعیین ویژگی‌های شیمیایی فرآورده‌های تجربی مشابه با ترکیب کانی‌های آذرین و مایعات همزیست با آن‌ها فراهم گردیده است (Wang et al., 2021; Wieser et al., 2023). اختراع الکترون مایکروپروب در سال‌های دهه ۱۹۶۰ میلادی، انقلابی بزرگ برای عملی کردن هرچه بهتر این روش

به دلیل ناممکن بودن اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای شدتی (دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن) در جریان حرکت و انباشت ماگما در آشیانه‌های ماگمایی و همچنین تبلور و جایگزینی آن در پوسته، پژوهشگران از روش‌های غیرمستقیم برای پی بردن به این شرایط بهره گرفته‌اند. یکی از این روش‌ها، استفاده از ترکیب تعادلی بین

حضور دارد (Wieser et al., 2023). پیروکسن‌ها بیشتر در تعادل شیمیایی با ماگمای میزبان خود متبلور می‌شوند و بنابراین نمایانگر رخداد‌های مرحله تبلور ماگمای میزبان خود هستند. در نتیجه، ترکیب شیمیایی این کانی اطلاعات ارزشمندی را در زمینه پتروژنز سنگ‌های آذرین در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد (Liotard et al., 1988). به منظور بررسی ترکیب دقیق کلینوپیروکسن‌های بخش‌های مافیک- حدواسط (گابرو- دیوریت) توده گرانیتیویدی گودحوض، ۹۶ آنالیز نقطه‌ای از آن‌ها در ۵ مقطع نازک- صیقلی صورت گرفت (جدول ۱). در نمودار Q در برابر J از موریموتو و همکاران (Morimoto et al., 1988) این پیروکسن‌ها در محدوده پیروکسن‌های Ca-Mg-Fe دار و در نمودار مثلثی Wo-En-Fs در گستره دیوپسید- اوژیت- سالیته قرار گرفته‌اند (Wo₄₃₋₄₈ En₃₇₋₄₅ Fs₁₀₋₁₉) (شکل‌های ۵- a, b).

ایجاد کرد. در میان کانی‌های معمول سنگ‌های آذرین، کلینوپیروکسن به علت ترکیب شیمیایی خاص و مقاومت بالای خود در مقابل دگرسانی، یک کانی مهم برای برآوردهای دما-فشارسنجی، فوگاسیته اکسیژن و تفسیرهای سنگ‌شناختی از جمله نوع سری ماگمایی و محیط زمین‌ساختی تشکیل ماگما به‌شمار می‌رود. زیرا نخست این‌که، این کانی، طیف گسترده‌ای از عناصر موجود در ماگما را در خود جای می‌دهد و در واقع ترکیب آن معادل با ترکیب ماگمای بازالتی است. دوم این‌که، در طیف وسیعی از ترکیبات سنگی (کماتی‌ایت، پیکریت، بازالت، آندزیت، داسیت تا حتی برخی از ریولیت‌ها و معادل‌های درونی آن‌ها) و سوم این‌که، در بسیاری از محیط‌های زمین‌ساختی از نقاط داغ و کافت‌های درون قاره‌ای تا پشته‌های میان اقیانوسی، جزایر اقیانوسی، جزایر کماتی و کمان‌های ماگمایی حاشیه قاره‌ها



شکل ۵- موقعیت کلینوپیروکسن‌های بخش مافیک گابرو/دیوریتی توده گرانیتیویدی گودحوض در نمودارهای طبقه‌بندی پیروکسن‌ها: (a) J-Q و (b) En-Wo-Fs (Morimoto et al., 1988).

Figure 5. Plot of clinopyroxenes of gabbro/diorite mafic part of the Gowd-e-Howz granitoid body on the pyroxene classification diagrams: a) J-Q and b) En-Wo-Fs (Morimoto et al., 1988).

در ماگما را در خود جای دهد و در نتیجه، نشان‌گر خوبی برای نوع ماگمایی باشد که از آن متبلور شده است. به عقیده لوباس (Le Bas, 1962) میزان Ti و Al موجود در شبکه ساختاری پیروکسن به درجه قلیایی بودن ماگما بستگی داشته و با استفاده از نمودارهای میزان SiO₂ در برابر Al₂O₃ و TiO₂ در برابر Al₂O₃ موجود در ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها، می‌توان گروه‌های ماگمایی پرآلکالن، آلکالن و ساب‌آلکالن را از هم جدا کرد. در این نمودارها، کلینوپیروکسن‌های نمونه‌های گابرو/دیوریتی توده گرانیتیویدی گودحوض در محدوده ساب‌آلکالن (شکل‌های ۷- a, b) قرار می‌گیرند.

در نمودارهای F₁ - F₂ (Nisbet and pearce, 1977) و (Le Terrier Ca برابر Ti+Cr) (et al., 1982) نمونه‌ها در گستره کمان آتشفشانی واقع شده‌اند (شکل‌های ۷- c, d) که با نتایج حاصل از شیمی سنگ کل پژوهشگران پیشین (ملکی‌زاده، ۱۳۷۹؛ Arvin et al., 2007) منطبق می‌باشد. محاسبه پارامترهای F₁-F₂ بر اساس آنالیز نقطه‌ای کلینوپیروکسن و استفاده از تقریباً تمام عناصر موجود در ساختار آن به صورت زیر انجام می‌گیرد:

$$F_1 = -(0.012 * SiO_2) - (0.0807 * TiO_2) + (0.0026 * Al_2O_3) - (0.0012 * FeO) - (0.0026 * MnO) + (0.0087 * MgO) - (0.0128 * CaO) - (0.0419 * Na_2O)$$

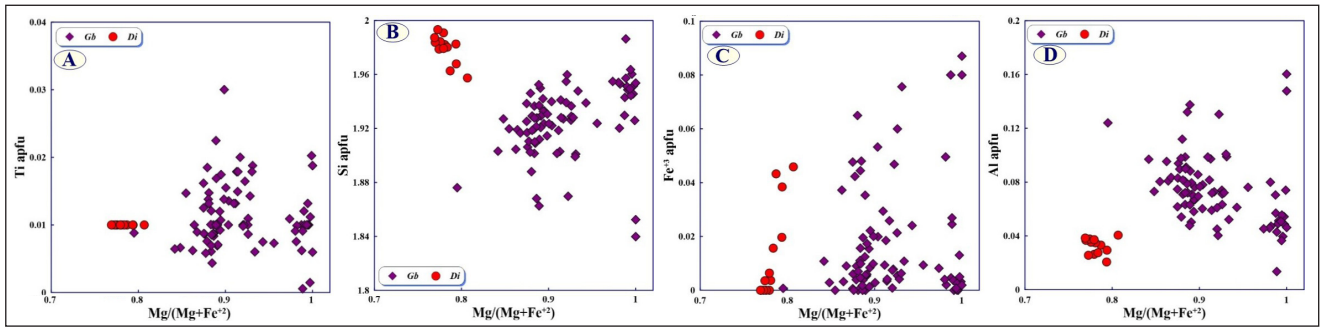
$$F_2 = -(0.0469 * SiO_2) - (0.0818 * TiO_2) + (0.012 * Al_2O_3) - (0.0041 * FeO) - (0.1435 * MnO) + (0.0029 * MgO) - (0.0085 * CaO) - (0.016 * Na_2O)$$

۲-۴- تغییرات ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها

به طور معمول کانی کلینوپیروکسن غنی از کلسیم و منیزیم و فقیر از آهن است. مقدار عدد منیزیم $Mg\# = Mg/(Mg+Fe^{2+})$ به عنوان یک شاخص مهم در بررسی تغییرات ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدوده $Mg\#$ همه کلینوپیروکسن‌های مورد مطالعه بین ۰/۷۵ تا ۰/۹۴ درصد قرار می‌گیرد که در گابروها بالاتر از ۰/۸ و در دیوریت‌ها کمتر از ۰/۸ می‌باشد. همانند تغییرات اکسیدهای عناصر اصلی در ترکیب سنگ کل، تغییرات مقادیر این اکسیدها در کلینوپیروکسن نیز می‌تواند بیانگر تاثیر فرایند تفریق در تحول سنگ‌های آذرین منطقه از گابرو به دیوریت باشد. پراکندگی و طیف گسترده‌تر تغییرات عناصر در گابروها به دلیل تنوع بیشتر ترکیب آن‌ها از الیوین گابرو به گابرونوریت و گابروی معمولی است. در نمودارهای تغییرات ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن در برابر $Mg\#$ (شکل ۶)، با کاهش مقادیر $Mg\#$ در کلینوپیروکسن‌ها از گابروها به سمت دیوریت‌ها، مقادیر Si افزایش و مقادیر Ti، Fe³⁺ و Al کاهش می‌یابند.

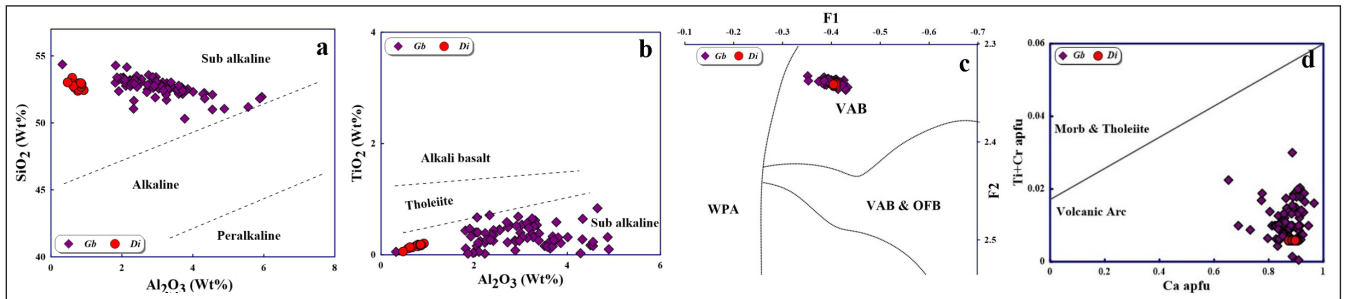
۳-۴- تعیین سری ماگمایی و محیط زمین‌ساختی

از بین کانی‌های موجود در سنگ‌ها، کانی کلینوپیروکسن می‌تواند بیشتر عناصر موجود



شکل ۶- نمودارهای تغییرات ترکیب کلینوپیروکسن‌های بخش مافیک گابرو/دیوریتی توده گرانیتیویدی گودحوض در نمودارهای Mg# در برابر مقادیر کاتیونی عناصر Ti, Al, Si, Fe³⁺.

Figure 6. Variation diagrams of clinopyroxene composition for gabbro/diorite mafic part of the Gowd-e-Howz granitoid body on the Mg# versus cation values of Si, Ti, Al, Fe³⁺.



شکل ۷- موقعیت کلینوپیروکسن‌های نمونه‌های گابرو/دیوریتی توده گرانیتیویدی گودحوض در نمودارهای a و b) تعیین سری ماگمایی (Le Bas, 1962). c) نمودار F₁-F₂. d) نمودار Ti+Cr versus Ca (Nisbet and Pearce, 1977) (Le Terrier et al., 1982).

Figure 7. Plot of clinopyroxene compositions of gabbro/diorite mafic part of the Gowd-e-Howz granitoid body on the magmatic series and tectonic setting discrimination diagrams. a, b) in the magmatic series discrimination diagrams from Le Bas (1962). c) F₁-F₂ tectonic setting discrimination diagram from Nisbet and Pearce (1977). d) Ti+Cr versus Ca tectonic setting discrimination diagram from Le Terrier et al. (1982).

۴-۴- زمین‌دما- فشارسنجی

فشارسنج‌های کلینوپیروکسنی در سنگ‌های بخش مافیک- حدواسط توده گرانیتیویدی گودحوض می‌پردازیم. دما-فشارسنج‌های کرتز (Kretz, 1994)، سونسو (Seosso, 1997) و آئوکی و شیبا (Aoki and Shiba, 1973) در محیط نرم‌افزار اکسل و دما-فشارسنج‌های پوتیرکا (Putirka, 2008) و نیمیس و تایلور (Yavuz, 2013) WinPyrox (Nimis and Tylor, 2000) با استفاده از نرم‌افزار محاسبه شده‌اند.

کرتز (Kretz, 1994) معادله زیر را برای زمین دماسنج کلینوپیروکسن، در دماهای ۱۰۸۰ تا ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد پیشنهاد نموده است:

$$T(k^{\circ}) = 1000/[0.468+0.246 * X_{\text{cpx}} - 0.123 * \ln(1-2(Ca_{\text{cpx}}))]$$

در این معادله مقادیر $X_{\text{cpx}} = \text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})_{\text{cpx}}$ و $Ca_{\text{cpx}} = \text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})_{\text{cpx}}$ می‌باشند. به کارگیری این دماسنج در مورد کلینوپیروکسن‌های بخش مافیک- حدواسط (گابرو- دیوریت) توده گرانیتیویدی گودحوض نشان می‌دهد که مقدار دما در دیوریت‌ها از ۹۳۳ تا ۹۷۴ با میانگین ۹۵۸ درجه سانتی‌گراد و در گابروها از ۹۰۰ تا ۱۲۵۱ با میانگین ۱۰۲۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند (جدول ۱) که با شرایط دمایی تبلور ماگمای این سنگ‌ها کاملاً همخوان است.

در روش سونسو (Seosso, 1997)، تخمین دما بر اساس محاسبه شاخص‌های XPT و YPT (شکل ۸- b, c) به شرح زیر انجام می‌شود:

زمین‌دما-فشارسنجی براساس ترکیب کلینوپیروکسن، یکی از کاربردی‌ترین ابزارها برای بازسازی شرایط فشار و دمای تبلور است. زیرا به هیچ اطلاعاتی از مذاب سیلیکات همزیست یا سایر فازهای کانیایی متبلور شده نیاز ندارد. این روش از گذشته‌های دور تا کنون به طور گسترده برای آشکارساختن شرایط فیزیکو شیمیایی حاکم بر تبلور ماگماها (ماگماهای اولترابازیک، بازیگ، حدواسط و اسیدی) استفاده شده است (Wang et al., 2021). بازسازی دما و فشار حاکم بر تبلور ماگما پیش از فوران (Putirka, 2008) یک موضوع مهم در سنگ‌شناسی آذرین، آتشفشان‌شناسی و ژئوشیمی است.

کلینوپیروکسن به‌طور معمول در سنگ‌های آذرین به ویژه در سنگ‌های حدواسط، بازیگ و اولترابازیک وجود دارد و تغییرات ترکیبی زیادی نشان می‌دهد. به دلیل حساسیت ترکیبی آن به دما و فشار حاکم بر ماگما، دما-فشارسنج‌های متعددی بر اساس کلینوپیروکسن پایه‌گذاری شده‌اند (Kretz, 1994; Nimis and Tylor, 2000; Putirka, 2008). از آنجایی که در مقایسه با حضور دو پیروکسن، وجود کلینوپیروکسن به تنهایی در سنگ‌های آذرین به طور مشخص متداول‌تر است، بنابراین، دما-فشارسنج‌های مبتنی بر کلینوپیروکسن، بیشتر مورد استقبال قرار گرفته‌اند (Wang et al., 2021). در ادامه، به کاربرد برخی از دما-

از دیگر روش‌های پیشنهاد شده برای دماسنجی تک کانی کلینوپیروکسن، روش نیمیس و تایلور (Nimis and Tylor, 2000) است که با استفاده از این روش کلینوپیروکسن‌های بخش دیوریتی و گابرویی توده گودحوض به ترتیب در دماهای ۸۵۱ تا ۱۲۷۰ با میانگین ۱۰۲۱ و ۸۰۱ تا ۱۳۱۰ با میانگین ۱۰۴۱ درجه سانتی‌گراد متبلور شده‌اند (جدول ۱) که تا حدود زیادی منطقی به نظر می‌رسد. برآورد دمای نمونه‌ها به روش لیندسلی (Lindsley, 1983) نیز اگرچه در طیف کلی نتایج حاصل از روش‌های پیشنهادی دیگر پژوهشگران قرار دارد (شکل ۸-ا)، اما به دلیل روش ترسیمی نمودار که مبتنی بر ترکیب کانی در نمودار طبقه‌بندی پروکسن است، خیلی دقیق به نظر نمی‌رسد. برآورد دما بر اساس Mg# کلینوپیروکسن و هورنبلندهای همزیست همزیست (عرب زاده بنی اسدی و همکاران، ۱۴۰۲-الف) به روش آندرسون (Anderson, 1996) نیز داده‌های کاملاً قابل قبولی را ارائه داده است (شکل ۸-د). همچنین کلینوپیروکسن‌های نمونه‌های مورد بررسی در نمودار ارائه شده توسط آئوکی و شیبایا (Aoki and Shiba, 1973) در محدوده فشار بالا تا متوسط قرار می‌گیرند (شکل ۸-ا) که نشان می‌دهد تبلور اساسی پروکسن‌ها در هنگام صعود ماگما از اعماق گشته به سمت بالا در یک محیط متغیر از فشار زیاد حاکم بر مرز پوسته-گوشته (عمق حدود ۵۰ کیلومتری در مرز موهو در زیر پوسته قاره‌ای) در هنگام انباشت ماگمای برخاسته از گوشته در این مکان (Magma underplating) تا فشار متوسط حاکم بر پوسته میانی در هنگام صعود و جایگزینی ماگما در ترازهای بالاتر (عمق حدود ۱۶ کیلومتری) صورت گرفته است.

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

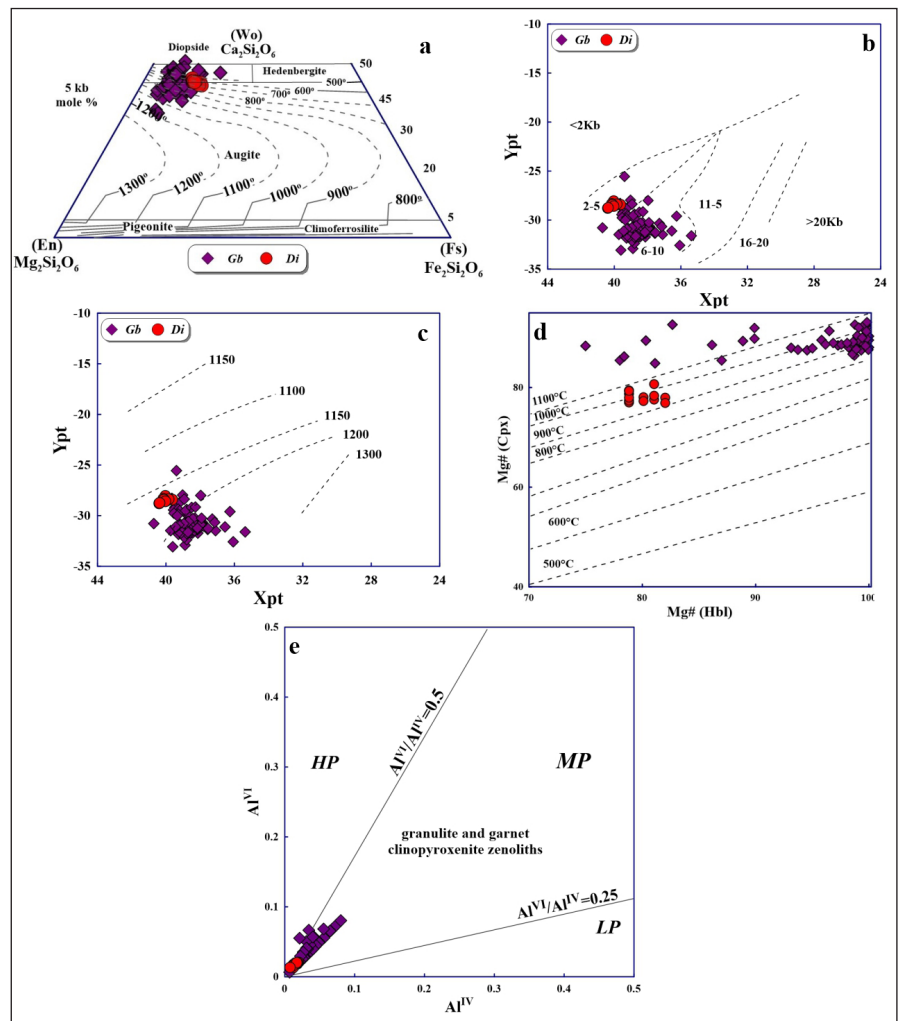
$$YPT = -0.369SiO_2 + 0.535TiO_2 - 0.317Al_2O_3 + 0.323FeO(\text{total}) + 0.235MnO - 0.516MgO - 0.167CaO - 0.153Na_2O$$

ویژگی مهم این روش دماسنجی، استوار بودن آن بر ترکیب یک پروکسن به تنهایی است و برای انواع پروکسن‌ها (کلسیم-منیزیم-آهن‌دار و منیزیم-آهن‌دار) قابل استفاده است. افزون بر این، در این روش تقریباً از ترکیب تمام اکسیدهای موجود در کانی استفاده می‌شود. براساس این روش، کلینوپیروکسن‌های بخش دیوریت/گابرویی توده گرانیتویدی گودحوض به ترتیب در دماهای حدود ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار حدود ۲/۵ کیلو بار و ۱۱۵۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشارهای ۲/۵ تا ۱۰ کیلو بار متبلور شده‌اند (شکل ۸) که تا حدودی بالا بوده و با بیشینه حرارتی تبلور این سنگ‌ها همخوانی دارد.

یکی دیگر از روش‌های دماسنجی تک پروکسن، روش پوتیرکا (Putirka, 2008) است که با استفاده از آن، دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌های بخش مافیک (گابرو) همراه و بخش حدواسط (دیوریت) توده گرانیتویدی گودحوض بین ۱۱۲۰ تا ۱۱۹۲ با میانگین ۱۱۵۸ درجه سانتی‌گراد و فشار بین ۰/۵۶ تا ۹ با میانگین ۳/۶۷ کیلو بار برای دیوریت‌ها و دماهای بین ۱۰۳۰ تا ۱۲۴۴ با میانگین ۱۱۸۹ درجه سانتی‌گراد و فشار بین ۰/۱۶ تا ۱۲/۸۱ با میانگین ۶ کیلو بار برای گابروها برآورد شده است (شکل ۸) که باز هم قدری بالاتر ولی در مجموع، با محدوده دمایی تبلور ماگماهای بازیک-حدواسط سازگار است.

شکل ۸- برآوردهای دما و فشار تبلور کلینوپیروکسن‌های بخش مافیک گابرو/دیوریتی توده گرانیتویدی گودحوض در نمودارهای (a) برآورد دما به روش لیندسلی (Lindsley, 1983) (b)، برآورد فشار و (c) برآورد دما و (d) برآورد دما بر اساس Mg# کلینوپیروکسن و هورنبلندهای همزیست به روش آندرسون (Anderson, 1996) (e). نمودار Al^{VI} در برابر Al^{IV} از آئوکی و شیبایا (Aoki and Shiba, 1973).

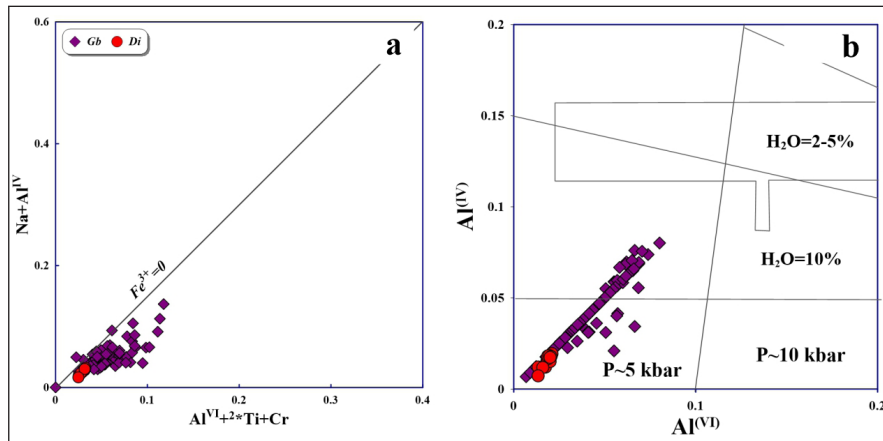
Figure 8. Temperature and pressure estimations of clinopyroxene crystallization in gabbro/diorite part of the Gowd-e-Howz granitoid body in the various diagrams. a) Estimation of temperature by Lindsley (1983) method. b) Estimation of temperature and c) pressure by Soesoo (1997) method. d) Plot of Mg# of hornblende versus Mg# of clinopyroxene from Anderson (1996). e) Plot of AlVI versus AlIV for estimation of pressure from Aoki and Shiba (1973).



۴-۵- تعیین مقدار آب و فوگاسیته اکسیژن ماگما

به باور فرانس و همکاران (France et al., 2010) فوگاسیته اکسیژن تأثیر ویژه‌ای بر تغییر دمای لیکیدوس، ترکیب مذاب و نسبت آهن سه ظرفیتی (فریک) بر آهن دوظرفیتی (فرو) دارد. شویتزر و همکاران (Schweitzer et al., 1979) برای تعیین فوگاسیته اکسیژن از نمودار $Al^{VI}+2Ti+Cr$ در برابر $Na+Al^{IV}$ استفاده کردند که خود تابعی از میزان Fe^{3+} پیروکسن هاست. این نمودار بر اساس موازنه Al موجود در موقعیت تتراهدری و Al و Cr موجود در موقعیت اکتاهدری تنظیم شده است. در ترکیب پیروکسن‌ها، میزان فراوانی Fe به میزان Al بستگی داشته و تابع موازنه Al در موقعیت‌های تتراهدری و اکتاهدری می‌باشد. به طور کلی هرچه میزان Al^{IV} بیشتر باشد، امکان ورود عناصر سه ظرفیتی دیگر نظیر آهن (به جز Al) به موقعیت اکتاهدری بیشتر می‌شود. بنابراین، نمونه‌های بالای خط $Fe^{3+}=0$ در فوگاسیته اکسیژن بالا و نمونه‌های پایین این خط در فوگاسیته اکسیژن کمتری متبلور شده‌اند (Cameron and Papike, 1981). هرچه فاصله نمونه‌ها از این خط ($Fe^{3+}=0$) بیشتر باشد، مقدار فوگاسیته اکسیژن در محیط تشکیل آن‌ها بیشتر یا کمتر بوده است

کلینوپیروکسن‌های بخش مافیک گابرو/ دیوریتی توده گرانیتوئیدی گودحوض در بالای خط یاد شده واقع شده و در فوگاسیته اکسیژن بالا متبلور شده‌اند (شکل ۹-ا). هلز (Helz, 1973) برای تعیین میزان آب ماگما از چگونگی توزیع Al در موقعیت‌های اکتاهدری و تتراهدری استفاده کرد. به باور این پژوهشگر، هر اندازه میزان Al در موقعیت تتراهدری افزایش یابد، مقدار آب در محیط تبلور پیروکسن کاهش می‌یابد. بنابراین، بر اساس نمودار مربوطه، کلینوپیروکسن‌های بخش مافیک گابرو/ دیوریتی توده گرانیتوئیدی گودحوض در محدوده فشار ۵ کیلو بار و میزان آب ۱۰ درصد قرار می‌گیرند (شکل ۹-ب). اگرچه این میزان آب برای یک ماگمای مافیک گوشته‌ای زیاد به نظر می‌رسد، ولی با توجه به شکل‌گیری این ماگما در بالای یک گوه گوشته‌ای متاسوماتیم شده در اثر ورود سیالات آزاد شده از ورقه اقیانوسی فرورونده و همچنین وجود رگه‌های پگماتوئیدی سرشار از آمفیبول‌های درشت (شکل ۲-ب) و ترکیب لابرادوریتی- بیتونیتی پلاژیوکلازها (همگی گویای بالا بودن میزان آب ماگما)، دور از واقعیت نیست.



شکل ۹- موقعیت کلینوپیروکسن‌های بخش مافیک گابرو/ دیوریتی توده گرانیتوئیدی گودحوض در نمودارهای (a) تخمین فوگاسیته اکسیژن (Schweitzer et al., 1979). (b) توزیع Al^{IV} و Al^{VI} برای تخمین نسبت‌های مختلف درصد بخار آب ماگما (Helz, 1973).

9. Plot of clinopyroxene compositions of gabbro/diorite part of the Gowd-e-Howz granitoid body in the: a) Oxygen fougacity estimation diagram of Schweitzer et al. (1979). b) Al^{IV} versus Al^{VI} diagram for estimation of water percent of magma from Helz (1973).

مناسب در آشیانه/آشیانه‌های ماگمایی متحمل تبلور می‌شود. البته به دلیل گرانروی پایین، دمای بالا و سرچشمه گرفتن از اعماق بیشتر و قطع نکردن منحنی سالیدوس در خلال بالا آمدن، ماگماهای بازالتی غالباً به سطح زمین می‌رسند و روانه‌های بازالتی را تشکیل می‌دهند و کمتر به صورت توده‌های گابرویی ظاهر می‌شوند (e.g., Best, 2003; Winter, 2014). براساس محاسبات دما- فشارسنجی این پژوهش، ماگمای گابرویی-دیوریتی سازنده بخش‌های مافیک-حدواسط توده گرانیتوئیدی گودحوض، پس از تولید در گوشته، بالا آمده و در اعماق حدود ۴۰ تا ۵۰ کیلومتری منطبق بر فشارهای حدود ۱۰ تا ۱۲ کیلو باری به دست آمده از فشارسنجی کلینوپیروکسن‌های بخش گابرویی، احتمالاً در مرز گوشته- پوسته قاره‌ای (مرز موهو) و در داخل پوسته زیرین انباشته شده و شروع به تبلور الیوین و کلینوپیروکسن کرده است. سپس با گرم و نرم کردن

ماگمای مافیک بازالتی، به دلیل گرانروی پایین و دمای بالا، از حرکت بسیار بالایی برخوردار است و درست پس از تولید در گوشته، شروع به بالا آمدن می‌کند و ابتدا در قاعده پوسته قاره‌ای متوقف و سبب گرم کردن پوسته قاره‌ای، بروز ذوب بخشی و ایجاد حالت خمیری در آن می‌شود. به علت گرانروی بسیار بالای پوسته قاره‌ای گرم و تاحدودی ذوب و خمیری شده (e.g., Best, 2003; Huppert and Sparks, 1988; Jacob et al., 2021; Moyet et al., 2021; Schubert et al., 2013) و به دلیل وزن مخصوص پایین و نقش فیلتری آن در ممانعت از صعود بیشتر ماگمای بازالتی روان و گرم، این ماگمای بازالتی برای مدت‌های طولانی در زیر پوسته قاره‌ای زیرین انباشته (Underplating) و شروع به تبلور می‌کند. در صورت بازشدن مسیر مناسب از طریق گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در پهنه‌های کششی، بالا می‌آید و در عمق یا اعماق

۵- نتیجه‌گیری

کلینوپیروکسن به عنوان یک سازنده اصلی در بخش‌های مافیک- حدواسط (گابرو/ دیوریت) توده گرانیتیویدی گودحوض، حاوی اطلاعات مهمی درباره ماهیت و محیط زمین‌ساختی تشکیل ماگما، شرایط فیزیکوشیمیایی حاکم بر حرکت، انباشت در آشیانه/آشیانه‌های ماگمایی و تبلور آن، توقف تبدلات کاتیونی، برقراری تعادل و جایگزینی نهایی ماگما در پوسته است. نتایج حاصل از به کارگیری داده‌های تجزیه نقطه‌ای این کانی نشان می‌دهد که ترکیب آن در این سنگ‌ها در گستره دیوپسید- اوژیت- سالیس قرار می‌گیرد. آن‌ها در گروه کلسیک فشار بالا تا متوسط، اکسیدان و متعلق به سری ماگمایی کالکوآلکانل نوع I کمان فرورانش حاشیه قاره هستند. برآوردهای زمین‌دما-فشارسنجی مبتنی بر ترکیب کلینوپیروکسن به روش‌های گوناگون نشان داد که این کانی در فوگاسیته بالای اکسیژن، در دماهای بالای ۱۳۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشارهای بالای ۱۲ تا حدود ۴ کیلو بار معادل با فشارهای اعماق ۵۰ تا ۱۶ کیلومتری در آشیانه‌های ماگمایی موجود در پوسته قاره‌ای متبلور شده‌اند.

پوسته قاره‌ای زیرین و ذوب بخشی آن برای تولید ماگمای فلسیک، و بازشدن مجرا برای صعود، به اعماق حدود ۱۵ تا ۱۶ کیلومتری (پوسته میانی) رسیده و در آشیانه ماگمایی این عمق مرحله دیگری از تفریق و تبلور را به صورت تبلور بخش دیوریتی- گرانودیوریتی طی کرده است (عرب‌زاده بنی اسدی و همکاران، ۱۴۰۲ الف و ب). این ماگما سپس، به سطوح بالاتر پوسته نفوذ کرده و بخش‌های عمده گرانودیوریتی و گرانیتی را در اعماق کمتر از ۱۶ کیلومتری (پوسته بالایی) و عمدتاً در اعماق ۵-۸ کیلومتری، منطبق بر فشارهای کمتر از ۴ کیلو بار به دست آمده از فشارسنجی آمفیبول‌ها و بیوتیت‌های بخش‌های گرانودیوریتی- گرانیتی توده (عرب‌زاده بنی اسدی و همکاران، ۱۴۰۲ الف و ب) متبلور کرده است. انباشت و تفریق ماگمای مافیک به زیر و در داخل پوسته زیرین، نه تنها سبب ذوب بخشی پوسته قاره‌ای زیرین و ایجاد ماگماهای فلسیک می‌شود، بلکه نیروی رانشی قوی برای صعود و جایگزینی این ماگماها در پوسته بالایی را نیز فراهم می‌کند (Schubert et al., 2013).

کتابنگاری

- اسدی، س.ع.، قاسمی، ح.، مباحثی، م.، ۱۴۰۱، شیمی کانی کروم اسپینل در توده اولترامافیک- مافیک سرگز- آب‌شور (سیخوران)، جنوب خاور ایران: رهیافتی بر محیط زمین‌ساختی تشکیل توده. فصلنامه علوم زمین، شماره ۱۲۶، ص ۱۰۳ تا ۱۱۸. Doi: 10.22071/GSJ.20220317848.1960
- اسدی، س.ع.، قاسمی، ح.، مباحثی، م.، ۱۴۰۲، ترکیب شیمیایی الیون به عنوان معیاری برای خاستگاه و شرایط تشکیل توده فرامافیک- مافیک سرگز- آب‌شور، جنوب شرقی بافت، کرمان. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال ۳۱، شماره ۱، ص ۳۱ تا ۴۴. ijcm.31.1.31/10.52547
- سبزه‌ئی، م.، روشن روان، ج.، عزیزان، ح.، ناظم زاده، م.، ۱۳۷۲، نقشه زمین‌شناسی چهار گوش ۱/۲۵۰۰۰ حاجی آباد. سازمان زمین‌شناسی کشور.
- عرب زاده بنی اسدی، م.، قاسمی، ح.، آنگی‌بوست، س.، رضایی کهخایی، م.، میناثر توفو، ک.، ۱۴۰۲- الف، شرایط فیزیکوشیمیایی تبلور براساس ترکیب زوج آمفیبول-پلاژیوکلاز در توده گرانیتیویدی گودحوض (سیاه کوه)، بافت، کرمان. مجله پترولوژی، ۱۴(۴)، شماره ۵۶، ص ۱ تا ۲۶. <https://doi.org/10.22108/ijp.2024.139533.1311>
- عرب زاده بنی اسدی، م.، قاسمی، ح.، آنگی‌بوست، س.، رضایی کهخایی، م.، پاپادوپولو، ل.، ۱۴۰۲- ب، ترکیب شیمیایی بیوتیت در توده گرانیتیویدی گودحوض (سیاه کوه)، بافت، کرمان: شاهدی بر جایگاه تکتونیک و شرایط فیزیکوشیمیایی جایگزینی و تبلور ماگما. مجله علوم زمین خوارزمی، سال ۹، شماره ۲، ص ۱۹۷ تا ۲۲۴. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.103233>
- قاسمی، ح.، ۱۳۷۹، پترولوژی، ژئوشیمی و منابع معدنی مجموعه اولترامافیک - مافیک سیخوران، رساله دکتری، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۳۸۶.
- قاسمی، ح.، سبزه‌ئی، م.، ژوتو، ت.، ۱۳۷۷، ماهیت زمین‌شناختی کمپلکس اولترامافیک - مافیک سیخوران در جنوب خاوری ایران. فصلنامه علوم زمین، شماره ۳۰-۲۹، ص ۳۲ تا ۴۵.
- قاسمی، ح.، سبزه‌ئی، م.، ژوتو، ت.، بلون، ا.، امامی، م.، ۱۳۸۳، سن پرتوسنجی بخش‌های مافیک و دگرگونه‌های میزبان مجموعه اولترامافیک- مافیک سیخوران، جنوب خاوری ایران. فصلنامه علوم زمین، شماره ۵۲-۵۱، ص ۵۸ تا ۶۷.
- قاسمی، ح.، سبزه‌ئی، م.، ژوتو، ت.، بلون، ا.، راستاد، ا.، امامی، م.، ۱۳۸۰، پدیده‌های سنگ زایشی مجموعه اولترامافیک - مافیک سیخوران در جنوب خاوری ایران. فصلنامه علوم زمین، شماره ۳۹-۴۰، ص ۴۶ تا ۶۹.
- قبرزاده، ن.، ۱۳۹۰، ژئوشیمی، پترولوژی و منشأ دایک‌های حدواسط- اسیدی در ناحیه دهرسد، جنوب شرقی بافت، کرمان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- کشفی، س.م.، علیرضایی، س.، حسینی، م.، ر.، رسا، ا.، ۱۴۰۲، زمین‌شناسی و پترولوژی سنگ‌های آتشفشانی و توده نفوذی پلاژیوگرانیتی منطقه زاغ دره، مجموعه افیولیتی اسفندقه- فاریاب، جنوب خاوری ایران. فصلنامه علوم زمین، ۲۳(۲)، پیاپی ۱۲۸، ص ۶۷ تا ۹۲. <https://doi.org/10.22071/gsj.2022.355828.2024>
- ملکی‌زاده، آ.، ۱۳۷۹، ژئوشیمی و پترولوژی توده نفوذی گرانیت باتولیت سیاه کوه. پایان نامه کارشناسی ارشد، بخش زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص ۲۲۲.
- ناظم زاده، م.، رشید، ا.، ۱۳۸۵، نقشه زمین‌شناسی چهار گوش ۱/۱۰۰۰۰ ده‌سرد (بزار). سازمان زمین‌شناسی کشور.

References

- Anderson, J. L., 1996. Status of thermobarometry in granitic batholiths. Geological Society of America Special Papers 315: 125-138.
- Aoki, K., and Shiba, I., 1973. Pyroxenes from lherzolite inclusions of Itinomegata, Japan. Lithos 6, 41 - 51.
- Arabzadeh Baniasadi, M., Ghasemi, H., Angiboust, S., Rezaei Kahkhaei, M., and Lambrini, P., 2024a. Chemical composition of biotite in the Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) granitoid stock, Baft, Kerman: Evidence for tectonic setting and physicochemical conditions of

- magma emplacement and crystallization. Kharazmi Journal of Earth Sciences 9(2), 197 - 224. (in Persian). <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.103233>.*
- Arabzadeh Baniasadi, M., Ghasemi, H., Angiboust, S., Rezaei Kahkhaei, M., and Minnaert-Thefo, C., 2024b. Physicochemical conditions of crystallisation based on the composition of amphibole-Plagioclase pair in the Gowd-e-Howz (Siah-Kuh) granitoid, Baft, Kerman. *Petrological Journal 14 (4), 1-28. (in Persian). 10.22108/IJP.2024.139533.1311.*
- Arvin, M., Pan, Y., Dargahi, S., Malekizadeh, A., and Babaei, A., 2007. Petrochemistry of the Siah-Kuh granitoid stock southwest of Kerman, Iran: Implications for initiation of Neotethys subduction. *Journal of Asian Earth Sciences 30, 474-489. doi:10.1016/j.jseae.2007.01.001.*
- Asadi, S.A.A., Ghasemi, H., and Mobasheri, M., 2022. Mineral chemistry of Cr-spinel in the Sargaz-Abshour ultramafic-mafic intrusion, SE of Iran: an implication to the tectonic setting of the intrusion. *Geosciences 32(126), 103-118 (in Persian). Doi: 10.22071/GSJ.20220317848.1960.*
- Asadi, S.A.A., Ghasemi, H., and Mobasheri, M., 2023a. Olivine chemistry as a petrogenetic index for genesis of Sargaz-Abshur ultramafic-mafic Intrusion, SE Baft, Kerman. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 31(1), 31-44 (in Persian). Doi: 10.52547/ijcm.31.1.31.*
- Asadi, S.A.A., Ghasemi, H., Sepidbar, F., Mobasheri, M., Shi, Y., and Palin, R. M., 2023b. A polygenetic origin for the Sikhoran ultramafic-mafic complex in South Iran. *LITHOS 456-457, 107336. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107336>*
- Bertrand, P., and Mercier, J. C., 1985. The mutual solubility of coexisting ortho and clinopyroxene: Toward an absolute geothermometer for natural systems? *Earth and Planetary Science Letters 76, 109-122.*
- Best, M.G., 2003. *Igneous and metamorphic petrology*, 2nd ed. Blackwell Science Ltd. 758p.
- Cameron, M., and Papike, J. J., 1981. Structural and chemical variations in pyroxenes. *American Mineralogist 66(1-2), 1-50.*
- Davidson, P. M., 1985. Thermodynamic analysis of quadrilateral pyroxenes. Part 1: derivation of the ternary nonconvergent site-disorder model. *Contribution to Mineralogy and Petrology 91, 383-389.*
- Davidson, P. M., and Lindsley, D. H., 1985. Thermodynamic analysis of quadrilateral pyroxenes. Part 2: model calibration from experiments and application to geothermometry. *Contribution to Mineralogy and Petrology 91, 390-404.*
- Didier, J., 1991. The different types of enclaves in granites-Nomenclature. *Enclaves and granite petrology, 19-23.*
- Droop, G.T.R., 1987. A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine 51, 431-435.*
- France, L., Ildefonse, B., Koepke, J., and Bech, F., 2010. A new method to estimate the oxidation state of basaltic series from microprobe analyses. *Journal of Volcanology and Geothermal Research 189(3), 340-346.*
- Ghanbarzadeh, N., 2011. *Geochemistry, petrology and origin of the intermediate and acidic dykes in the Deh Sard area, SE Baft, Kerman. M.Sc. Thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran. (in Persian).*
- Ghasemi, H., 2000. *Petrology, geochemistry and mineral resources of Sikhoran ultramafic-mafic complex, southeastern, Iran. PhD Thesis in Geology-Petrology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (in Persian).*
- Ghasemi, H., Juteau, T., Bellon, H., Sabzehei, M., Whitechurch, H., and Ricou, L.E., 2002. The mafic-ultramafic complex of Sikhoran (Central Iran): A polygenetic ophiolite complex. *C.R. Geoscience 334(6), 431-438. DOI:10.1016/S1631-0713(02)01770-4*
- Ghasemi, H., Sabzehei, M., Juteau, T., 1998. *Geological character of Sikhoran mafic – ultramafic complex, Southeast Iran, Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 7(29-30), p. 32-45. (In Persian).*
- Ghasemi, H., Sabzehei, M., Juteau, T., Bellon, H., E. Rastad, and Emami, M.H., 2004. Radiometric age of mafic parts and metamorphic hosts of Sikhoran ultramafic-mafic complex, southeastern Iran. *Geoscience 11(51-52), 58-67. (in Persian).*
- Ghasemi, H., Sabzehei, M., Juteau, T., Bellon, H., Rastad, E., and Emami, M.H., 2001. Petrogenesis of Sikhoran Ultramafic-Mafic Complex, Southeast Iran, *10(39-40). Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 10(39-40), p. 46-69. (In Persian).*
- Helz, R. T., 1973. Phase relations of basalts in their melting ranges at PH₂O= 5 kb as a function of Oxygen fugacity, part I, Mafic phases. *Journal of petrology 14, 249 -302.*
- Huppert, H., and Sparks, S., 1988. The Generation of Granitic Magmas by Intrusion of Basalt into Continental Crust. *Journal of Petrology 29: 599-624. DOI:10.1093/PETROLOGY/29.3.599.*
- Jacob, J.B., Moyaen, J.F., Fiannacca, P., Laurent, O., Bachmann, O., Janoušek, V., Farina, F., and Villaros, A., 2021. Crustal melting vs. fractionation of basaltic magmas: Part 2, Attempting to quantify mantle and crustal contributions in granitoids. *Lithos, 106292, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106292>.*
- Jafari, A., Ao, S., Jamei, S., and Ghasemi, H., 2023. Evolution of the Zagros sector of Neo-Tethys: Tectonic and magmatic events that shaped its rifting, seafloor spreading and subduction history. *Earth-Science Reviews 241, 104419. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104419.*

- Kashfi, S. M., Alirezaei, S., Hosseini, M. R., and Rasa, I., 2023. *The geology and petrology of volcanic rocks and a plagiogranite intrusive body in the Zaghdareh area, Esfandagheh-Faryab ophiolitic complex, southeast Iran. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33 (2), 128: 67-92. (In Persian). <https://doi.org/10.22071/gsj.2022.355828.2024>.*
- Kretz, R., 1994. *Metamorphic Crystallization*. John Wiley & Sons. New York. 507p.
- Le Bas, M.J., 1962. The Role of Aluminium in Igneous Clinopyroxenes with Relation to Their Parentage. *American Journal of Science* 260(4), 267-288.
- Le Terrier, J., Maury, R. C., Thonon, P., Girard, D., and Marchal, M., 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic serie. *Earth and Planetary Science Letters* 59(1), 139-154.
- Lindsley, D. H., 1983. Pyroxene thermometry. *American Mineralogist* 68, 477-493.
- Liotard, J.M., Briot, D., and Boivin, P., 1988. Petrological and geochemical relationships between pyroxene megacrysts and associated alkali-basalts from Massif Central (France). *Contribution to Mineralogy and Petrology* 98, 81-90. <https://doi.org/10.1007/BF00371912>
- Malekizadeh, A., 2000. *Geochemistry and petrogenesis of the Siyah Kouh granite batholith. M.Sc. Thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran. (In Persian)*.
- Moghadam, H. S., Brocker, M., Griffin, W. L., Li, X. H Chen, R. X., and O'Reilly S. Y., 2017. Subduction, high-P metamorphism and collision fingerprints in SW Iran: Constraints from zircon U-Pb and mica Rb-Sr geochronology. *Geochemistry, Geophysics, Geosystem* 18, 306-332. doi: 10.1002/2016GC006585.
- Morimoto, N., Fabrice, J., Ferguson, A., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F.A., Zussman, J., Akoi, K., and Gottardi, G., 1988. Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist* 173, 1123-1133.
- Moyen, J.F., Janoušek, V., Laurent, O., Bachmann, O., Jacob, J.B., Farina, F., Fiannacca, P., and Villaros, A., 2021. (this issue) Crustal melting vs. fractionation of basaltic magmas: Part 1, granites and paradigms. *Lithos*, 106291, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106291>.
- Nazemzadeh, M., and Rashid, A., 2006. *Geological map of the Dehsard (Bezard), Scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Sheet No, 7347. (In Persian)*.
- Nimis, P., Taylor, W. 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 139, 541-554. <https://doi.org/10.1007/s004100000156>
- Nisbet, E. G., and Pearce, J. A., 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic Settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 63, 149-160.
- Nisbet, E. G., Pearce, J. A., 1977. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic Settings. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 63, 149-160.
- Putirka, K.D., 2008. Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 69(1), 61-120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>.
- Sabzehei, M., Houshmandzadeh, A., Berberian, M., Nowgole Sadat, M.A.A., Alavi Tehrani, N., Majidi, B., Nazemzadeh, M., Azizan, H., and Roshan Ravan, J., 1993. *Geological map of Hadji Abad, Scale 1:250000. Geological Survey of Iran, Tehran. (In Persian)*.
- Schubert, M., T. Driesner, T. V. Gerya, and Ulmer, P., 2013. Mafic injection as a trigger for felsic magmatism: A numerical study, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 14: 1910-1928, doi:10.1002/ggge.20124.
- Schweitzer, E. L., Papike, J. J. and Bence, A. E., 1979. Statistical analysis of clinopyroxenes from deep-sea basalts. *American Mineralogist* 64, 501-513.
- Soesoo, A., 1997. A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallisation PT-estimation. *Geological Society of Sweden (Geologiska Föreningen)* 119, 55-60.
- Vernon, R. H., 1984. Microgranitoid enclaves in granites - globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment. *Nature* 309, 438-9.
- Wang, X., Hou, T., Wang, M., Zhang, Ch., Zhang, Zh., Pan, R., Marxer, F., and Zhang, H., 2021. A new clinopyroxene thermobarometer for mafic to intermediate magmatic systems. *European Journal of Mineralogy* 33, 621-637. <https://doi.org/10.5194/ejm-33-621-2021>.
- Wells, P. R. A., 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 62, 129-139.
- Wieser, P. E., Kent, A. J. R., Till, C. B., Donovan, J., Neave, D. A., Blatter, D. L., and Krawczynski, M. J., 2023. Barometers Behaving Badly I: Assessing the Influence of Analytical and Experimental Uncertainty on Clinopyroxene Thermobarometry Calculations at Crustal Conditions. *Journal of Petrology* 64, 1-27. <https://doi.org/10.1093/petrology/egac126>.
- Winter, J. D., 2014. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. Second Edition Pearson Education Limited. 745pp.
- Wood, B. J., Banno, S., 1973. Garnet-Orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 42, 109-124.

Yavuz, F., 2013. WinPyrox: A Windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry. *American Mineralogist* 98: 1338–1359. <https://doi.org/10.2138/am.2013.4292>.