



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Metamorphic conditions of dolomitic marbles from the Qori metamorphic complex, southern Sanandaj-Sirjan zone, using phase thermodynamic diagrams

Abdolnaser Fazlnia^{1*}, Mirmohammad Miri²

1. Department of Geology, Urmia University, Urmia, Iran.

2. Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Article info

Article history

Received: 4 October 2024

Accepted: 5 December 2024

Keywords:

Dolomitic marbles, phase thermodynamic diagrams, Qori metamorphic complex, Southern Sanandaj-Sirjan zone.



Abstract

The Barrovian-Qori metamorphic complex, which is exposed in the southern part of the Sanandaj-Sirjan zone, has a succession of metaultramafic, metabasite, metapelite, metacalcic silicate, and marble lithological diversity. The investigation of the types of dolomitic marbles in this complex, based on phase thermodynamic diagrams and petrographic studies, showed that the parageneses of amphibole + calcite + dolomite, amphibole + clinopyroxene + garnet + calcite + dolomite, clinopyroxene + garnet + calcite + dolomite, clinopyroxene + garnet + olivine + calcite + dolomite, clinopyroxene + olivine + calcite + dolomite and olivine + calcite + dolomite + gahnite + brucite were recognizable in the types of outcrops. In all samples, olivine crystals have been partially or completely converted into antigorite (a type of serpentine). Using thermodynamic phase diagrams drawn based on the chemical analysis of the whole rock and matched with petrographic and fabric evidence, it was determined that the calc-silicate samples of Qori, which recorded the highest degrees of metamorphism, underwent two stages of metamorphism, M1 and M2. The first stage of crystal growth, which was accompanied by maximum pressure, had the metamorphic paragenesis of clinopyroxene + garnet + calcite + dolomite, and the second stage of crystal growth was accompanied by an increase in temperature and a slight decrease in the temperature. These two stages of metamorphism are in thermodynamic agreement with the two previous ages reported for the complex (187 and 147 Ma). It seems that the different stages of the Neotethys subduction beneath the Sanandaj-Sirjan zone were the factors that increased the geothermal gradient and metamorphic pressure for the evolution of the growth of equilibrium metamorphic mineral assemblages. The different performance of thrust faults in the western and eastern parts of the Qori metamorphic outcrops has led to the creation of different paths of retrograde metamorphism; thus, in the western part, the intense performance of thrust faults has led to the creation of retrograde metamorphism with a sudden decrease in pressure at an almost constant temperature, in contrast, the western part displays retrograde metamorphism with a normal decrease in pressure and heat caused by the erosion of the upper parts of the crust.

Introduction

Dolomites and siliceous limestones comprise a large part of sedimentary deposits, especially in the Phanerozoic sediments, and their metamorphic equivalents are called marbles (Bucher and Grapes, 2011).

Marbles are very widespread in metamorphic terranes associated with orogenic belts. In these areas, marbles usually occur as interbeds with other sedimentary rocks (Mposkos et al., 2006). The Zagros orogenic belt in Iran

is largely composed of such rocks. Considering the Sanandaj-Sirjan zone (SaSZ) as part of this orogenic belt, dolomitic marbles are significantly distributed in different parts of western Iran.

The SaSZ is located between the Zagros fold belt in the west and the Urmia-Dukhtar magmatic arc in the east (Fig. 1) (Alavi, 2004; Berberian and King, 1981) and is the central part of the Alpine-Himalayan collisional orogenic belt. Two metamorphic events in the southern

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.101162>

*Corresponding author: Abdolnaser Fazlnia; E-mail: a.fazlnia@urmia.ac.ir

How to cite this article: Fazlnia, A., Miri, M.M. 2024. Metamorphic conditions of dolomitic marbles from the Qori metamorphic complex, southern Sanandaj-Sirjan zone, using phase thermodynamic diagrams. Kharazmi Journal of Earth Sciences 10(2), 465- 490. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.101162>



BY NC

part of the SaSZ, associated with the subduction of Neotethys, affected the zone rocks and led to newly emerged crystals' growth from 187 to 147 Ma.

The Barovian Qori metamorphic complex, in the southern part of the SaSZ, hosts a succession of metaultramafic, metabasite, metapelite, metacalcisilicate, and marble. The metamorphic conditions of the metabasite and metapelitic rocks have been studied (e.g. Fazlnia et al., 2009; 2017; 2024). Miri and Fazlnia (2024) based on phase diagram calculations, concluded that the metabasites underwent two stages of metamorphic growth at 650° C and 9 kbar and 720° C and 7 kbar, respectively. These conditions are consistent with the studies of Fazlnia (2009), which showed two ages of 187 and 147 Ma. Fazlnia et al. (2024) suggested that the equilibrium assemblage olivine + orthopyroxene + clinopyroxene + amphibole + spinel + ilmenite ± chromiferous magnetite in the metaultramafic rocks formed at the peak metamorphic condition of 700-800° C and 6-8 kbar.

This study aims to investigate the metamorphic conditions of the metacarbonates at two time stages, 187 and 147 Ma. This study addresses two fundamental questions about the ambiguities of the Jurassic time in the southern part of the SaSZ. Is it reasonable or not, as in some recent studies (Azizi and Stern, 2019; Azizi et al., 2020; Shirdashtzadeh et al., 2024) about rifting in part of the Jurassic land in Iran to create the southern SaSZ? Is the petrological evidence of the Barovian metamorphic facies series consistent with such geodynamic structures? What factors caused two Barovian metamorphic events at these two different times in the southern part of the SaSZ?

Materials and Methods

The studied samples were collected regularly and together with other associated rocks. The samples with the least weathering and the most equilibrated mineral assemblage were selected based on the metamorphic paragenesis. The samples were analyzed by an XRF instrument (Philips PW 1480 X-ray fluorescence) at the University of Kiel, Germany (Table 1). The rock

moisture content (H₂O-) and LOI (Loss on ignition) were obtained by heating the powders at 110 and 900 ° C for 2 hours, respectively.

Results and Discussion

Petrography

The low-degree metamorphosed rocks have a preferential orientation with the mineral assemblage dolomite + calcite + tremolite + phlogopite + alurgite (a type of white mica in calcareous metamorphic rocks) (Fig. 3A). With increasing the metamorphic degree, the modal percentage of alurgite, phlogopite, and tremolite decrease, and quartz grains occur. These rocks include the mineral assemblage diopside + dolomite + calcite + tremolite + quartz + opaque (Fig. 3 B), which dominates over much of the Qori complex. In these high-grade rocks, the preferred orientation decreases.

In the eastern and southern parts (the Shoro and Koor areas), the high-grade rocks contain diopside but lack tremolite and quartz. In addition, olivine and garnet appear, resulting in the equilibrium assemblage diopside + olivine + garnet + dolomite + calcite (Fig. 3 C-D). These rocks show a granoblastic fabric. These rocks can be attributed to the peak P-T condition metamorphic event (M2) in the area at 147 Ma (Fazlnia et al., 2009). Retrograde metamorphism replaced the olivine grains by antigorite and formed tremolite between olivine-dolomite or diopside-dolomite margins that are different from the low-grade rock tremolites.

Around the Qori village, the mineral assemblage diopside + olivine + dolomite + calcite (with a very low modal percentage of destroyed garnet) is accompanied by large crystals of brucite and gahnite. The brucites contain olivine inclusions (which later became serpentinized). In the same rocks, the small gahnite crystals formed in association with the brucite.

Whole rock geochemistry

The chemical composition of the metamorphic rocks can be representative of their parent rock. The results of the whole rock analyses of the studied samples are presented in Table 1. The CaO is the most important oxide in these

samples, followed by MgO and SiO₂. To determine the parent rock, the AFC diagram [$A = \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, $C = \text{CaO} - (3.3 \times \text{P}_2\text{O}_5)$, $F = \text{MgO} + \text{MnO} + \text{FeO}$, all in molecular percentage (Barton et al., 2018; Winter, 2014)] was used, in which the samples are placed in the carbonate section (Fig. 5A). However, regarding the presence of MgO and SiO₂, the parent rock should be considered as impure limestone or dolomitic marble (Fig. 5B).

Phase diagrams

To investigate the paths and trends of changes in the mineral paragenesis of the Qori complex, we calculated thermodynamic phase diagrams (Fig. 5) using the Perplex software (Connolly, 2005), version 7.01.10, and the hp62ver.dat database published in 2023. The chemical composition of sample AF-57, with the highest magnesium content, and the CFMASH chemical system (CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-H₂O) were used to allow the occurrence of the maximum mineral phases. The fluid composition was considered to be H₂O-CO₂ with a ratio of 10-90 because higher amounts of CO₂ did not affect the results obtained. The solid solution models Amph(DPW) for amphibole (Dale et al., 2005), Augite(G) for clinopyroxene (Green et al., 2016), Gt(W) for garnet (White et al., 2014), O(JH) for olivine (Jennings and Holland, 2015), and Atg(PN) for serpentine (Padrón-Navarta et al., 2013) were used in the calculations.

The trends of metamorphic phases is shown by the red curves in the diagram. Metamorphism is manifested by the formation of tremolite (Fig. 3 A). Following the progressive metamorphic reactions of the M1 phase, at T ~ 620 °C and a P > 5 kbar, clinopyroxene and garnet also appeared (Fig. 3 B). The first occurrence of olivine in this diagram is at a T ~ 650 °C and a P ~ 6 kbar.

Studies on the metamorphism of the Qori complex (Fazlnia et al., 2009; Fazlnia, 2017; Miri and Fazlnia, 2024) have shown that the peak conditions of regional metamorphism in this region occurred at 700 to 800 °C and 7 to 9 kbar T-P. These values are consistent with the first occurrence of olivine in the phase diagram (Fig. 5).

After reaching the peak conditions (M1, ca. 8 kbar and 700°C), the M2 metamorphic phase occurred as a result of the intrusion of mafic igneous bodies and the occurrence of a thermal shock in which the effect of temperature was more significant than that of pressure. The manifestation of this phase is the occurrence of clinopyroxene + olivine assemblage (Fig. 4C-D).

Based on the petrographic observations, three pathways can be considered for the this metamorphic growth event: (1) a significant pressure drop accompanied by a slight decrease in temperature, which caused the replacement of olivine by the brucite and gahnite (Fig. 4 E-F), (2) a decrease in temperature at low pressures caused the replacement of the olivine by antigorite (Fig. 4 A-C), and (3) at medium pressures (3 to 5 kbar), intermediate compositions between tremolite-actinolite solid solutions also occur again along with antigorite (Fig. 4 D). Based on these pathways, it can be inferred that the uplift and retrograde metamorphism after the M2 event probably occurred in the several stages. Field investigations combined with petrographic-petrofabric studies show that in the southern and eastern parts of Sharvar (Fig. 1), the studied rocks exhibit pathways 2 and 3. In these areas, thrust faults are absent, and it seems that the exposure of deep metamorphic sections has been done slowly, which is a result of erosion of the cover rock. As a result, temperature and pressure decreased gradually and continuously. In contrast, rock samples from the outcrops around the Qori village show good evidence of intense thrust fault activity for the exposure of different metamorphic grade rocks from high to low. In this area, the high-grade metamorphic rocks occur next to the outcrops of the low-grade ones. Here, brucite + gahnite assemblage was observed in the marbles, which enclosed the M2 stage crystals as poikiloblastic fabrics (Fig. 4 E-F). Therefore, the activity of the thrust faults in these outcrops caused rapid surface uplift in a limited time with a slight decrease in temperature, thus creating a path of retrograde metamorphism around the Qori village (Fig. 6).

The T-XCO₂ diagram at a constant pressure of 8 kbar shows that the stability of the studied mineral assemblage

occurs at CO₂ contents higher than 4%. In other words, it can be concluded that in the last stages of metamorphism, the fluid composition was almost saturated with water, and CO₂ levels did not affect the mineral assemblage. The T-MgO/CaO diagram also shows that the occurrence of olivine, dolomite, and antigorite-bearing metamorphic complexes that formed at the highest temperature limit requires a MgO/CaO ratio between 0.1 and 0.7, which is in good agreement with the values of this ratio in the studied samples (0.32 to 0.67).

Tectonic considerations

The occurrence of Jurassic-related orogenic metamorphism in the southern SaSZ is consistent with the Barovian type (e.g., [Fazlnia et al., 2009](#); [Bröcker et al., 2014](#); [Sheikholeslami, 2015](#); [Hassanzadeh and Wernicke, 2016](#); [Shakerardakani et al., 2022](#); [Fazlnia et al., 2024](#); [Dehghan Nayeri et al., 2024](#)). According to the studies of these researchers, in the southern part of this zone, the maximum P-T condition occurred as 650 to 750 °C and 7 to 9 kbar (during the Jurassic), respectively. These researchers have shown that such metamorphisms occurred by the subduction of the Neotethys beneath the Central Iran microplate on a continental margin magmatic arc. In the southern part of the SaSZ, evidence associated with a Jurassic continental rift magmatism, such as alkaline magmatism (trachyte, phenolite, tephrite, basanite, nepheline, etc.), carbonatites, potassic SiO₂-undersaturated magmas, ultramafic lamprophyres, and bimodal magmatism ([Gill, 2010](#); [Hutchison et al., 2018](#)), is not visible.

Comparing the two Jurassic Barovian metamorphic events of the Qori complex with the tectonic history of the southern SaSZ, it can be concluded that there is a close relationship between these magmatisms and thermal flows entering the continental crust in a continental arc system to generate a subduction-related orogenic metamorphic process.

Conclusions

- The dolomitic marbles of the Qori metamorphic complex were formed as a result of two

metamorphic growth events of Barovian type as a result of the subduction of the Neotethys beneath the Central Iran microplate in the southern SaSZ during the Jurassic, one at 187 Ma and the other at 147 Ma.

- Two equilibrium mineral assemblages were formed, including clinopyroxene + garnet + calcite + dolomite and clinopyroxene + olivine + calcite + dolomite, at the peak metamorphic conditions.
- The second stage metamorphic growth event occurred during a retrograde path, producing the mineral assemblages (1) olivine + calcite + dolomite + gahnite + brucite during a rapid decompression at almost constant temperature and (2) antigorite + thermolite + clinopyroxene + olivine + calcite + dolomite through a gradual P-T decrease.
- The action of large-scale thrust faults caused the first reverse mineral assemblage, and the exposure to the surface gradually caused the second reverse mineral assemblage.

References



- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science*, 304(1), pp.1-20.
- Azizi, H., Lucci, F., Stern, R.J., Hasannejad, S., Asahara, Y., 2018. The Late Jurassic Panjeh submarine volcano in the northern Sanandaj-Sirjan Zone, northwest Iran: Mantle plume or active margin? *Lithos* 308–309, 364–380.
- Azizi, H., Nouri, F., Stern, R.J., Azizi, M., Lucci, F., Asahara, Y., Zarinkoub, M.H., Chung, S.L., 2020. New evidence for Jurassic continental rifting in the northern Sanandaj Sirjan Zone, western Iran: the Ghalaylan seamount, southwest Ghorveh. *International Geology Review* 62(13-14), 1635–1657.
- Azizi, H., Stern, R.J., 2019. Jurassic igneous rocks of the central Sanandaj–Sirjan zone (Iran) mark a propagating continental rift, not a magmatic arc. *Terra Nova* 31, 415–423.
- Azizi, H., Stern, R.J., Kandemir, R., Karsli, O., 2023. A Jurassic volcanic passive margin in Iran and Turkey. *Terra Nova* 31, 141–152.

- Barton, M.D., Ilchik, R.P., Marikos, M.A. 2018. Metasomatism. In: Kerrick D.M. (Eds.), Contact metamorphism. De Gruyter PP. 321–350.
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a palaeogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210–265.
- Bröcker, M., Fotoohi Rad, G., Abbaslu, F., Rodionov, N., 2014. Geochronology of high-grade metamorphic rocks from the Anjul area, Lut block, eastern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 82, 151–162.
- Bucher, K. and Grapes, R., 2011. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer-Verlag, Heidelberg, pp 428.
- Connolly, J.A.D., 2005. Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth and Planetary Science Letters* 236, 524–541.
- Dale, J., Powell, R. White, R.W., Elmer, F.L., Jolland, T.J.B., 2005. A thermodynamic model for Ca–Na clinoamphiboles in Na₂O–CaO–FeO–MgO–Al₂O₃–SiO₂–H₂O–O for petrological calculations. *Journal of Metamorphic Geology* 23(8), 771–791.
- Dehghan Nayeri, F., Nasrabad, M., Jamshidbadr, M., Ahmadvand, A., 2024. Thermobarometry and tectonic setting of the regional metamorphic rocks from South Sirjan (the Southern SSZ), Iran. *Geopersia* 14(1), 73–88.
- Fazlnia, A., 2017. Geochemical characteristics and conditions of formation of the Chah-Bazargan peraluminous granitic patches, ShahrBabak, Iran. *Geologica Carpathica* 68, 445–463.
- Fazlnia, A., Miri, M., Saki, A., 2024. Metamorphism of meta-ultramafic rocks from the Qori metamorphic complex (Neyriz, Iran): Implications for arc-related metamorphism. *Geologica Carpathica* 75(4), 227 – 242. <https://doi.org/10.31577/GeolCarp.2024.14>
- Fazlnia, A.N., Schenk, V., van der Straaten, F., Mirmohammadi, M.S., 2009. Petrology, Geochemistry, and Geochronology of Trondhjemites from the Qori Complex, Neyriz, Iran. *Lithos* 112, 413–433.
- Gill, R., 2010. *Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide*. 1st edition, John Wiley and Sons, Oxford, UK, pp 428.
- Green, E.C.R., White, R.W., Diener, J.F.A., Powell, R., Holland, T.J.B., Palin, R.M., 2016. Activity-composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks. *Journal of Metamorphic Geology* 34(9), 845–869.
- Hassanzadeh, J., Wernicke, B.P., 2016. The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. *Tectonics* 35, 586–621.
- Hutchison, W., Mather, T.A., Pyle, D.M., Boyce, A.J., Gleeson, M.L.M., Yirgu, G., Blundy, J.D., Ferguson, D.J., Vye-Brown, C., Millar, I.L., Sims, K.W.W., Finch, A.A., 2018. The evolution of magma during continental rifting: New constraints from the isotopic and trace element signatures of silicic magmas from Ethiopian volcanoes. *Earth and Planetary Science Letters* 489, 203–218.
- Jennings, E.S., Holland, T.J.B., 2015. A simple thermodynamic model for melting of peridotite in the system NCFMASOCr. *Journal of Petrology* 56, 869–892.
- Miri, M., Fazlnia, A., 2024. Investigating the progressive dynamothermal metamorphic evolution of metabasites from the Qori complex (NE Neyriz) using phase diagrams. *Advanced Applied Geology* 13(4), 1176–1192.
- Mposkos, E., Baziotis, I., Proyer, A., Hoinkes, G., 2006. Dolomitic marbles from the ultrahighpressure metamorphic Kimi complex in Rhodope, N.E. Greece. *Mineralogy and Petrology* 88, 341–362.
- Nouri, F., Azizi, H., Stern, R.J., Asahara, Y., 2023. The Sanandaj-Sirjan Zone (W. Iran) was a Jurassic passive continental margin: Evidence from igneous rocks of the Songhor area. *Lithos* 440–441, 107023.
- Padrón-Navarta, J.A., Sánchez-Vizcaíno, V.L., Hermann, J., Connolly, J.A.D., Garrido, C.J., Gómez-Pugnaire, M.T., Marchesi, C., 2013. Tschermak's substitution in antigorite and consequences for phase relations and water liberation in high-grade serpentinites. *Lithos* 178, 186–196.
- Shakerardakani, F., Neubauer, F., Bernroider, M., Finger, F., Hauzenberger, C., Genser, J., Monfaredi, B., 2022. Metamorphic stages in mountain belts during a Wilson cycle: a case study in the Central Sanandaj-Sirjan zone (Zagros Mountains, Iran). *Geoscience Frontier* 13(2), 101272.
- Sheikholeslami, M.R., 2015. Deformations of Palaeozoic and Mesozoic rocks in southern Sirjan, Sanandaj–Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 106, 130–149.
- Shirdashtzadeh, N., Dilek, Y., Furnes, H., Dantas, E.L., 2024. Early Jurassic and Late Cretaceous plagiogranites in Nain–Baft ophiolitic mélange zone in Iran: remnants of rift–drift and SSZ evolution of a Neotethyan seaway. *Journal of the Geological Society* 181. <https://doi.org/10.1144/jgs2023-181>

White, R.W., Powell, R., Holland, T., Johnson, T., and Green, E., 2014, New mineral activity–composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems. *Journal of Metamorphic Geology* 32, 261–286.

Winter, J.D., 2014. *Principles of igneous and metamorphic petrology*. Pearson Education Limited, Edinburgh, pp 684.

CRediT authorship contribution statement

 Abdolnaser Fazlnia	Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Investigation, Resources, Data Curation, Writing - Original Draft, Supervision, Project administration, Funding acquisition
 Mirmohammad Miri	Methodology, Formal analysis, Software, Validation, Investigation, Resources, Writing - Review & Editing



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

شرایط دگرگونی مرمرهای دولومیتی مجموعه دگرگونی قوری، پهنه سندنج-سیرجان جنوبی، با استفاده از نمودارهای ترمودینامیکی فازی

عبدالناصر فضل‌نیا^{۱*}، میرمحمد میری^۲

۱. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵

واژه‌های کلیدی

مرمرهای دولومیتی،

نمودارهای ترمودینامیکی

فازی، مجموعه دگرگونی

قوری، پهنه سندنج-

سیرجان جنوبی.



چکیده

مجموعه دگرگونی باروین قوری که در بخش جنوبی پهنه سندنج-سیرجان رخمون دارند، دارای تناوبی از تنوع سنگ‌شناسی متاولترامافیک، متابازیت، متاپلیت، متاکالک‌سیلیکات و مرمر می‌باشد. بررسی انواع مرمرهای دولومیتی در این مجموعه بر اساس نمودارهای ترمودینامیکی فازی و مطالعات پتروگرافی، نشان داد که پارائزهای آمفیبول + کلسیت + دولومیت، آمفیبول + کلینوپیروکسن + گارنت + کلسیت + دولومیت، کلینوپیروکسن + گارنت + کلسیت + دولومیت، کلینوپیروکسن + گارنت + الیون + کلسیت + دولومیت، کلینوپیروکسن + گارنت + الیون + کلسیت + دولومیت، کلینوپیروکسن + گارنت + الیون + کلسیت + دولومیت و الیون + کلسیت + دولومیت + گاهنیت + بروسیت در انواع رخمون‌ها قابل تشخیص بودند. در کلیه نمونه‌ها بلورهای الیون به طور بخشی و یا کامل به آنتی‌گوریت (نوعی سرپانتین) تبدیل شده‌اند. با استفاده از نمودارهای ترمودینامیکی فاز که بر مبنای تجزیه شیمیایی سنگ کل ترسیم شده‌اند و با شواهد پتروگرافی و فابریکی انطباق داده شده‌اند، مشخص گردید که نمونه‌های کالک‌سیلیکات قوری که بالاترین درجات دگرگونی را در خود ثبت نموده‌اند، دو مرحله دگرگونی M1 و M2 را متحمل شده‌اند. مرحله اول رشد بلوری که با فشار حداکثری همراه بوده دارای پارائز دگرگونی کلینوپیروکسن + گارنت + کلسیت + دولومیت و مرحله دوم رشد بلوری با افزایش دما و کمی کاهش فشار توأم بوده است. این دو مرحله دگرگونی، با دو سن ۱۸۷ و ۱۴۷ میلیون سال پیش ارائه شده برای منطقه، هماهنگی دارد. به نظر می‌رسد که مراحل مختلف فرورانش نفوتتیس به زیر پهنه سندنج-سیرجان عامل افزایش گرادیان زمین‌گرایی و فشار دگرگونی برای تکامل رشد فازهای کانیایی متعادل دگرگونی بوده است. عملکرد متفاوت گسل‌های تراستی در بخش‌های غربی و شرقی رخمون‌های دگرگونی قوری، منجر به ایجاد مسیرهای مختلف دگرگونی قهقرایی شده است؛ به طوری که، در بخش غربی عملکرد شدید گسل‌های تراستی منجر به ایجاد دگرگونی قهقرایی کاهش فشار ناگهانی در دمای تقریباً ثابت شده است، در مقابل بخش غربی با کاهش عادی فشار و حرارت ناشی از فرسایش بخش‌های فوقانی پوسته، دگرگونی قهقرایی را نمایش می‌دهد.

مقدمه

به عنوان مثال، مرمرهای دولومیتی دارای کانی دولومیت و مرمرهای کلسیتی حاوی کانی کلسیت می‌باشند (Hollocher, 2014). برخی از سنگ‌مرمرهای دولومیتی، حاوی سیلیکات‌های منیزیم‌دار قابل توجهی هستند. برای مثال، سنگ‌مرمر ترمولیت‌دار، سنگ‌مرمر دیوپسیددار، سنگ‌مرمر فورستریت (الیون) دار و غیره. به دلیل نوع ترکیب شیمیایی مرمرهای دولومیتی، اغلب حاوی بیوتیت قهوه‌ای کم رنگ و یا فلوگوپیت

دولومیت‌ها و سنگ‌های آهکی سیلیسی، بخش بزرگی از نهشته‌های رسوبی، به ویژه در رسوبات فانروزوئیک را تشکیل می‌دهند (Bucher and Grapes, 2011). معادل‌های دگرگونی آنها را مرمر (marbles) می‌نامند. اگر سنگ‌مرمرها از نظر کانی‌های سیلیکاته بسیار فقیر باشند، آنها را از روی کانی کربناته غالب موجود در سنگ نامگذاری می‌نمایند.

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.101162>*نویسنده مسئول: عبدالناصر فضل‌نیا a.fazlnia@urmia.ac.ir

استناد به این مقاله: فضل‌نیا، ع.، میری، م.م. (۱۴۰۳). شرایط دگرگونی مرمرهای دولومیتی مجموعه دگرگونی قوری، پهنه سندنج-سیرجان جنوبی، با استفاده از نمودارهای ترمودینامیکی فازی. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۰، شماره ۲، صفحه ۴۶۵ تا ۴۹۰. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.101162>



Berberian and King, 1981; Fazlnia et al., 2023; Jafari et al., 2023; Hassanpour, 2021; Pang et al., 2020; Stern et al., 2021). دو واقعه دگرگونی در بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان که با وقایع تکنونیکي فعالیت نئوتتیس همراه بود، انواع سنگ-های رسوبي-آذرین را تحت تاثیر قرار داد و منجر به رشد بلورهای نو ظهور در طول ۱۸۷ و ۱۴۷ میلیون سال گردید. این مطالعه به سنگ-های رسوبي کربناته همین دگرگونی‌ها می‌پردازد.

هدف این مطالعه، بررسی شرایط دگرگونی در دو زمان ۱۸۷ و ۱۴۷ میلیون سال است. این مطالعه به دو پرسش اساسی در مورد ابهام‌های زمان ژوراسیک در بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان می‌پردازد. برخی تحقیقات جدید (Azizi and Stern, 2019; Azizi et al., 2020; Shirdashtzadeh et al., 2024) نشان می‌دهد که کافت‌زایی در بخشی از سرزمین ژوراسیک ایران، برای ایجاد پهنه سنندج-سیرجان جنوبی رخ داده است. آیا چنین رخدادی برای بخش شمالی این پهنه (Azizi et al., 2018; Azizi et al., 2023; Nouri et al., 2023) نیز قابل ارزیابی است؟ آیا شواهد سنگ‌شناسی دگرگونی سری رخساره باروین، با چنین ساختارهای ژئودینامیک سازگاری دارد؟ چه عواملی باعث دو واقعه دگرگونی باروین در این دو زمان مختلف در بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان شده است؟

جایگاه زمین‌شناسی و مطالعات صحرائی

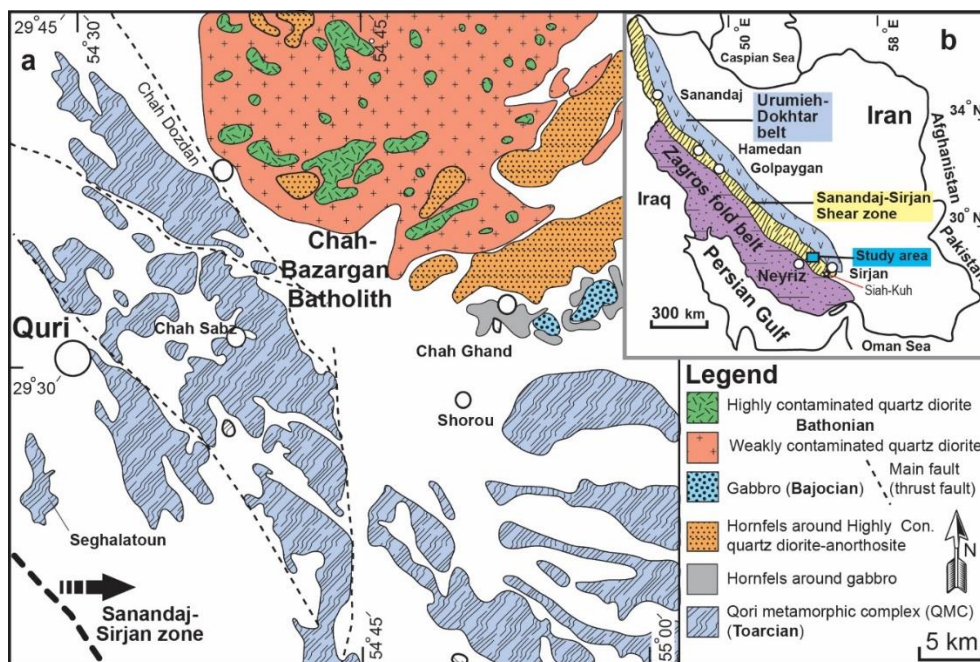
پهنه سنندج-سیرجان جنوبی بیشتر شامل گرانیتوئیدهای کالک-آلکان، گابرو و برخی سنگ‌های آتشفشانی همراه با آمفیبولیت و گارنت-کیانیت شیبست می‌باشد که در طی فرورانش نئوتتیس به زیر صفحه ایران مرکزی تشکیل شده است (برای مثال، Dehghan Nayeri et al., 2024; Hassanzadeh and Wernicke, 2016; Fazlnia, 2017; Miri and Fazlnia, 2024; Shikholeslami, 2015; Shirdashtzadeh et al., 2024). در محدوده مورد مطالعه، بسیاری از این سنگ‌ها قابل مشاهده هستند و اکثر سنگ‌های آذرین و دگرگونی در این منطقه در هنگام و در نتیجه فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه ایران مرکزی شکل گرفته‌اند (برای مثال، Agard et al., 2011; Fazlnia et al., 2013;

Satish-Kumar et al., 2006; Bucher and Grapes, 2011). مرمرهای الیوین‌دار درجه بالا ممکن است حاوی کانی‌های اسپینل و یا هومیت نیز باشند. مرمرها در سرزمین‌های دگرگونی مرتبط با کمرندهای کوهزایی بسیار گسترده هستند. در این مناطق، مرمرها معمولاً به صورت بین لایه‌ای با سایر رسوبات ایجاد می‌شوند (Mposkos et al., 2006). بخش عمده‌ای از کمرند کوهزایی زاگرس از چنین سنگ‌هایی تشکیل شده است. با توجه به اینکه پهنه سنندج-سیرجان بخشی از این کمرند کوهزایی در ایران است، مرمرهای دولومیتی در بخش‌های مختلف این پهنه در غرب ایران گسترش قابل توجهی دارند.

پهنه سنندج-سیرجان بخشی از کوهزایی برخورداری زاگرس است که بین کمرند چین‌خورده زاگرس در غرب و نوار کمان ماگمایی ارومیه-دختر در شرق (شکل ۱) قرار دارد (Alavi, 1994; Berberian and King, 1981) و بخش میانی کمرند کوهزایی تصادمی آلپ-همیالیا است. این پهنه در طول بسته شدن نئوتتیس در اواخر کرتاسه و یا سنوزوئیک تکامل یافت (برای مثال، Mouthereau et al., 2012; Chu et al., 2021). در هر حال عمده سنگ‌های این پهنه، انواع دگرگونی زمان مزوزوئیک و رسوبي زمان سنوزوئیک است (Alavi, 1994; Berberian and King, 1981). گلونکا (Golonka, 2004) نشان داد که پهنه سنندج-سیرجان در طول پالئوزوئیک بخشی از ابرقاره گندوانا بوده و در اواخر این زمان (اواخر کربونیفر) به وسیله اقیانوس پالئوتتیس از این ابرقاره جدا گردید. در مقابل، برخی پژوهشگران (برای مثال، Fazlnia et al., 2024a) نشان دادند که در اواخر کربونیفر-اوایل پرمین سیستم کافتی نئوتتیس فعال شد و منجر به جدایی این پهنه از سرزمین گندوانا گردید. در طول اواخر پرمین-ژوراسیک این پهنه به سمت اوراسیا حرکت و در نتیجه باعث دو واقعه دگرگونی ناحیه‌ای در بخشی از این پهنه گردید (Fazlnia, 2017; Miri and Fazlnia, 2024). در نهایت این پهنه در طول سنوزوئیک پس از تصادم قاره‌ای بین صفحات عربی و اوراسیا بخشی از پهنه تصادمی زاگرس گردید (برای مثال، Alavi, 1994;

بررسی‌های شیخ‌السلامی (Sheikholeslami, 2015) نشان داد که در سنگ‌های مجموعه دگرگونی قوری دو جهت‌یافتگی ترجیحی وجود دارد که هر یک با رشد بلورهای متعادل همراهند. بررسی سنگ‌های گابرویی (Fazlnia et al., 2013) نزدیک به مجموعه دگرگونی قوری، تحت عنوان تله‌پهلوانی، نشان داد که این سنگ‌ها در حدود ۱۷۳ میلیون سال در نتیجه فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی تشکیل شدند. همچنین سنگ‌های لوکو کوارتز دیوریتی، همزمان با گابروها، که به داخل مجموعه دگرگونی قوری تزریق شده‌اند، به خوبی شواهد فرورانشی لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی را تایید می‌نمایند (Fazlnia, 2017).

(Hassanzadeh and Wernicke, 2016). حسن‌زاده و ورنیک (Hassanzadeh and Wernicke, 2016) با مطالعه سنگ‌های دگرگونی بخش جنوبی پهنه ساندج-سیرجان نشان دادند که وقایع دگرگونی ژوراسیک در این پهنه مرتبط با فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی بوده است. میری و فضل‌نیا (Miri and Fazlnia, 2024) بر اساس نمودارهای فازی، تحولات دگرگونی متناوب‌های مجموعه دگرگونی قوری را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که این سنگ‌ها دو مرحله رشد دگرگونی را به ترتیب در ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۹ کیلو بار و ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد و ۷ کیلو بار محتمل شده‌اند. این شرایط، با مطالعات فضل‌نیا (Fazlnia, 2009) که دو سن ۱۸۷ و ۱۴۷ میلیون سال را نشان داده‌اند انطباق دارد. به‌علاوه



شکل ۱- (a) نقشه زمین‌شناسی مجموعه قوری و مناطق اطراف، شرق نیریز (با تغییرات از Fazlnia et al., 2009). (b) پهنه‌های ساختاری ایران (Stöcklin, 1968).

Fig. 1. a) Geology map of the Qori complex and surrounded area, east Neyriz (after Fazlnia et al., 2009). b) litho-structural zones of Iran (Stöcklin, 1968)

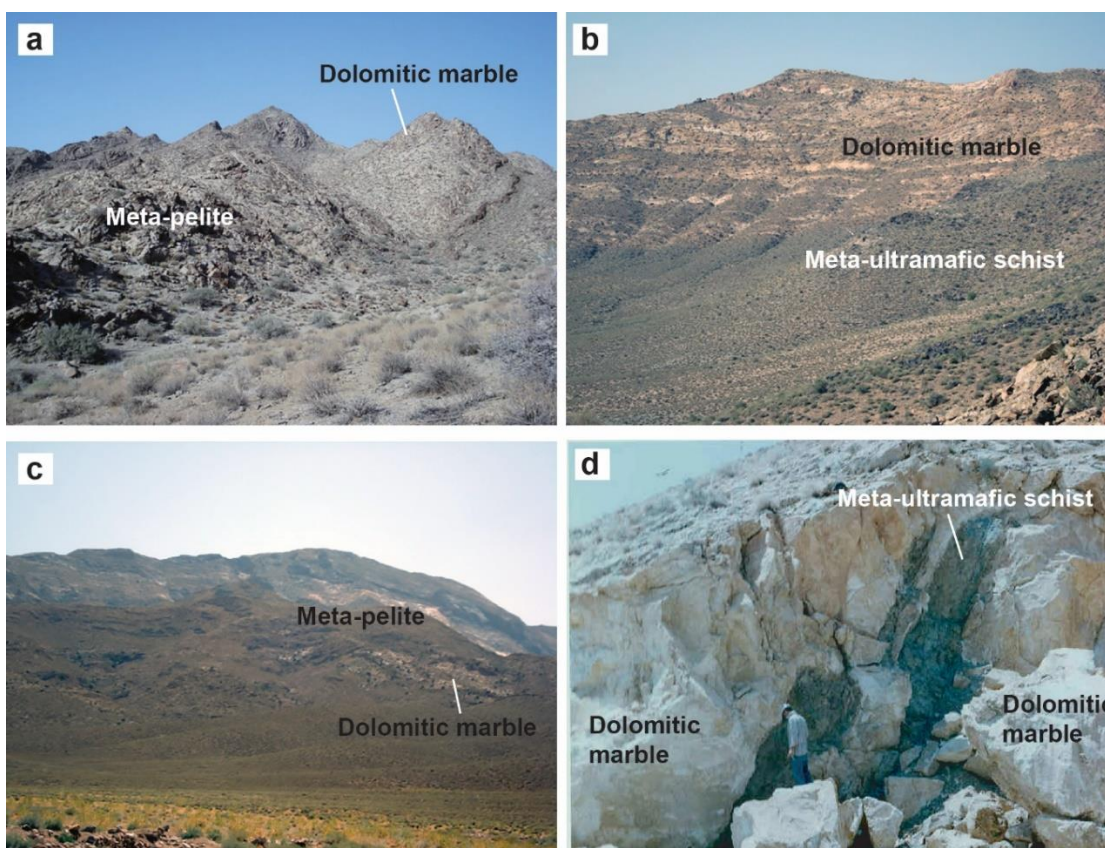
دارند. نمونه‌های سنگی مرمر دولومیتی از این رخنمون‌ها برداشت شده است. گردهمایی کانیایی متعادل در هر دو دسته مرمر دولومیتی چه به صورت توده‌ای چه متناوب با دیگر انواع سنگ‌ها، تفاوتی ندارند. در

مطالعات صحرائی نشان می‌دهد که رخنمون‌های سنگی مرمر دولومیتی به صورت توده‌ای مجزا (شکل ۲- a و b) و یا متناوب با سنگ‌های رسی (شکل ۲- c و d)، مافیک و اولترامافیک دگرگون شده بروزند

با درجه دگرگونی قوی، دو مرحله دگرگونی قابل مشاهده است که دو مرحله رشد بلورین به ترتیب با سن حدود ۱۸۷ و ۱۴۷ میلیون سال را در خود ثبت کرده‌اند.

بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که رخنمون‌های دگرگونی در اطراف قوری تحت تاثیر گسل‌های راندگی قرار گرفته است، به طوری که رخنمون‌های با درجه دگرگونی قوی کنار رخنمون‌های با درجه ضعیف دگرگونی قرار گرفته‌اند. در مقابل در بخش‌های جنوب و شرق شورو (شکل ۱) گسل‌های تراست غایب هستند و درجه دگرگونی رخنمون‌های سنگی به سمت شرق کاهش می‌یابد. بر همین اساس مطالعه پتروگرافی سنگ‌های با درجات مختلف دگرگونی از انواع رسی، مافیک و آهکی دگرگونی انجام گردید.

بخش‌هایی که مرم‌های دولومیتی به صورت توده‌ای رخنمون دارند، نظم در لایه‌بند‌های اولیه حفظ شده است. البته این رخنمون‌ها در بخش‌های با درجه دگرگونی ضعیف که میلونیتی نشده‌اند قابل مشاهده هستند (شکل ۲-ب). عدسی‌های بزرگ که حالتی معلق درون سنگ-های رسی دگرگون شده رخنمون دارند، بی‌ریشه هستند و احتمالاً در زمان‌ها بعدی با دیگر سنگ‌ها درآمیخته شده‌اند (شکل ۲-ا). در بخش-هایی که به صورت متناوب و یا میان‌لایه‌ها و یا عدسی‌های کوچک درون دیگر سنگ‌ها حضور دارند (شکل ۲-د و c)، درجات دگرگونی شدیدتر بوده و دو مرحله گردهمایی متعادل دگرگونی توانسته به ثبت برسد. بررسی‌های فضل‌نیا و همکاران (Fazlnia et al., 2009) و میری و فضل‌نیا (Miri and Fazlnia, 2024) نشان دادند که در بخش‌های



شکل ۲- رخنمون‌های مختلف سنگی در مجموعه دگرگونی قوری، شرق نیریز.

Fig. 2. Outcrops of various lithologies from the Qori complex, east of Neyriz.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های مورد مطالعه به صورت منظم و همراه با نمونه‌های دیگر سنگی که به صورت میان‌لایه قرار دارند برداشت گردید. در حین نمونه برداری، سعی شد با توجه به فابریک، اندازه دانه‌ها و رنگ رخنمون سنگی، نمونه دستی برداشت شود. با توجه به اینکه کل محدوده مورد مطالعه جهت یافتگی ترجیحی دارد، پس از نمونه‌گیری امتداد شمال و جهت‌یافتگی ترجیحی بر روی نمونه‌های سنگی مشخص گردید. پس از مطالعه پتروگرافی، بر اساس پاراژنز دگرگونی بهترین نمونه‌های سنگی که کمترین هوازدگی و متعادل‌ترین گردهمایی کانیاپی را داشت انتخاب گردیدند. نمونه‌های سنگی انتخابی توسط دستگاه XRF (فلورسانس پرتو ایکس مدل Philips PW 1480) در دانشگاه کیل آلمان تجزیه شدند (جدول ۱). مقادیر رطوبت سنگ (H_2O) و LOI (Loss on ignition) به ترتیب با حرارت دادن پودرها در دمای ۱۱۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت به دست آمدند. با توجه به اینکه نمونه‌ها با مشخصات جغرافیایی، برداشت گردیده بودند، بررسی آنها بر روی نقشه‌های زمین‌شناسی و انطباق آنها با شواهد تکتونیکی و ژئودینامیک منطقه مورد مطالعه، انجام گردید. در این پژوهش برای بررسی روند دگرگونی و تغییرات گردهمایی کانی‌های مرمر دولومیتی مجموعه قوری از محاسبات ترمودینامیکی نمودارهای فازی استفاده می‌شود.

بحث

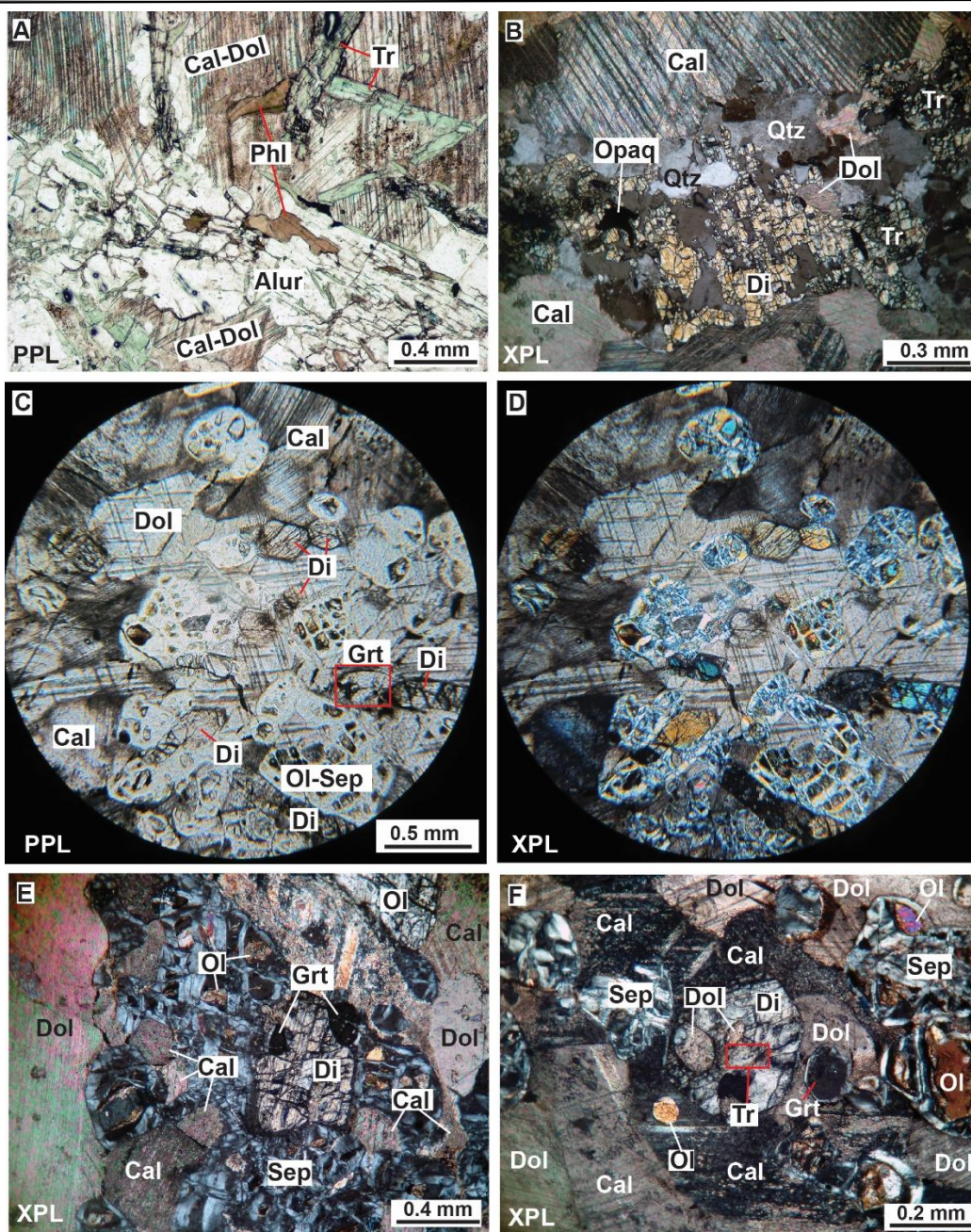
پتروگرافی

در رخنمون‌های دگرگونی ضعیف از بخش شرقی و جنوبی شورو و یا رخنمون‌های با درجه ضعیف دگرگونی از بخش‌های تراستی اطراف قوری (شکل ۱)، سنگ‌های آهکی دولومیتی، دارای جهت‌یافتگی ترجیحی با گردهمایی کانیاپی دولومیت + کلسیت + ترمولیت + فلوگوپیت + آلورژیت (نوعی میکای سفید در سنگ‌های دگرگونی آهکی) هستند (شکل ۳-ا). تمایز دو کانی کلسیت و دولومیت بر مبنای

مشخصات میکروسکوپی و پتروفابریکی انجام گردید. این سنگ‌ها دانه متوسط تا درشت بوده و با افزایش تدریجی درجه دگرگونی، رخ بلورهای کلسیت و دولومیت قطورتر شده و از درصد مودال آلورژیت و فلوگوپیت کاسته می‌گردد. در نمونه‌هایی با درجه دگرگونی بالاتر، ترمولیت به شدت کاهش یافته و دانه‌های کوارتز ظهور می‌یابند. این سنگ‌ها، گردهمایی کانیاپی دیوپسید + دولومیت + کلسیت + ترمولیت + کوارتز + فازهای کدر دارند (شکل ۳-ب). این گردهمایی در بخش بزرگی از رخنمون‌های دگرگونی مجموعه قوری قابل مشاهده است. در این سنگ‌های درجه بالا، جهت‌یافتگی ترجیحی کاهش می‌یابد. با افزایش درجه دگرگونی در بخش شرقی و جنوبی شورو و یا رخنمون‌های با درجه دگرگونی قوی از بخش‌های تراستی اطراف قوری، درصد مودال ترمولیت و کوارتز به صفر متمایل می‌شود و بجای آن درصد مودال دیوپسید به شدت افزایش می‌یابد. بعلاوه بلورهای الیوین و گارنت در رخنمون‌های سنگی ظاهر می‌شوند و در نتیجه گردهمایی کانیاپی متعادل دیوپسید + الیوین + گارنت + دولومیت + کلسیت ظاهر می‌گردد (شکل ۳-ج و د). در این سنگ‌ها، جهت‌یافتگی ترجیحی جای خود را به فابریک هم بعد (گرانوبلاستیک) داده است. این گردهمایی‌های کانیاپی در کنار سنگ‌های رسی دگرگونی و یا مافیک دگرگونی با بیشترین درجه دگرگونی قابل مشاهده هستند. فضل‌نیا و همکاران (Fazlnia et al., 2009) نشان دادند که این بخش‌ها دارای شرایط دگرگونی باروین با مشخصات ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۹ کیلوبار با سنی معادل ۱۸۷ میلیون سال است. بسیاری از بلورهای الیوین به سرپانتین آنتی‌گوریتی تبدیل شده‌اند. تغییر شرایط دگرگونی (۷۲۰ درجه سانتی‌گراد و ۷ کیلوبار) در ۱۴۷ میلیون سال (Fazlnia et al., 2009) منجر به این شد که به تدریج از درصد مودال گارنت کاسته شود (شکل ۳-ع و ف) و این دانه‌ها از بلورهای دانه درشت در زمینه گرنوبلاستیک (شکل ۴-ا و ب) به بلورهای تحلیل رفته (شکل‌های ۳-ع و ف؛ c-۴) تبدیل گردند. بلورهای گارنت به شدت تحلیل رفته‌اند و درصد مودال دیوپسید و الیوین افزایش چشم‌گیری داشته است. این سنگ‌ها، با مرحله دوم دگرگونی که M2 است و سنی معادل ۱۴۷

شده است. این سنگ‌ها عمدتاً در بخش جنوبی و شرقی روستای شورو (شکل ۱) قابل مشاهده‌اند که در آنها تبدیل رخنمون دگرگونی درجه ضعیف به قوی به صورت تدریجی هستند. در برخی دیگر از رخنمون‌ها که در اطراف روستای قوری برونزد دارند، گردهمایی کانیایی دیوپسید + الیوین + دولومیت (همراه درصد مودال بسیار کم گارنت تحلیل رفته) با بلورهای درشت بروسیت و گاهنیت همراهی می‌شوند. بروسیت‌ها دانه‌های الیوین (که بعداً سرپانتینی شده‌اند) را در بر گرفته‌اند. در همین سنگ‌ها، بلورهای کوچک گاهنیت با بروسیت همراه هستند. به نظر می‌رسد که مسیر دگرگونی قهقرایی این سنگ‌ها با انواع قبلی متفاوت است که در بخش بعدی بحث خواهد شد.

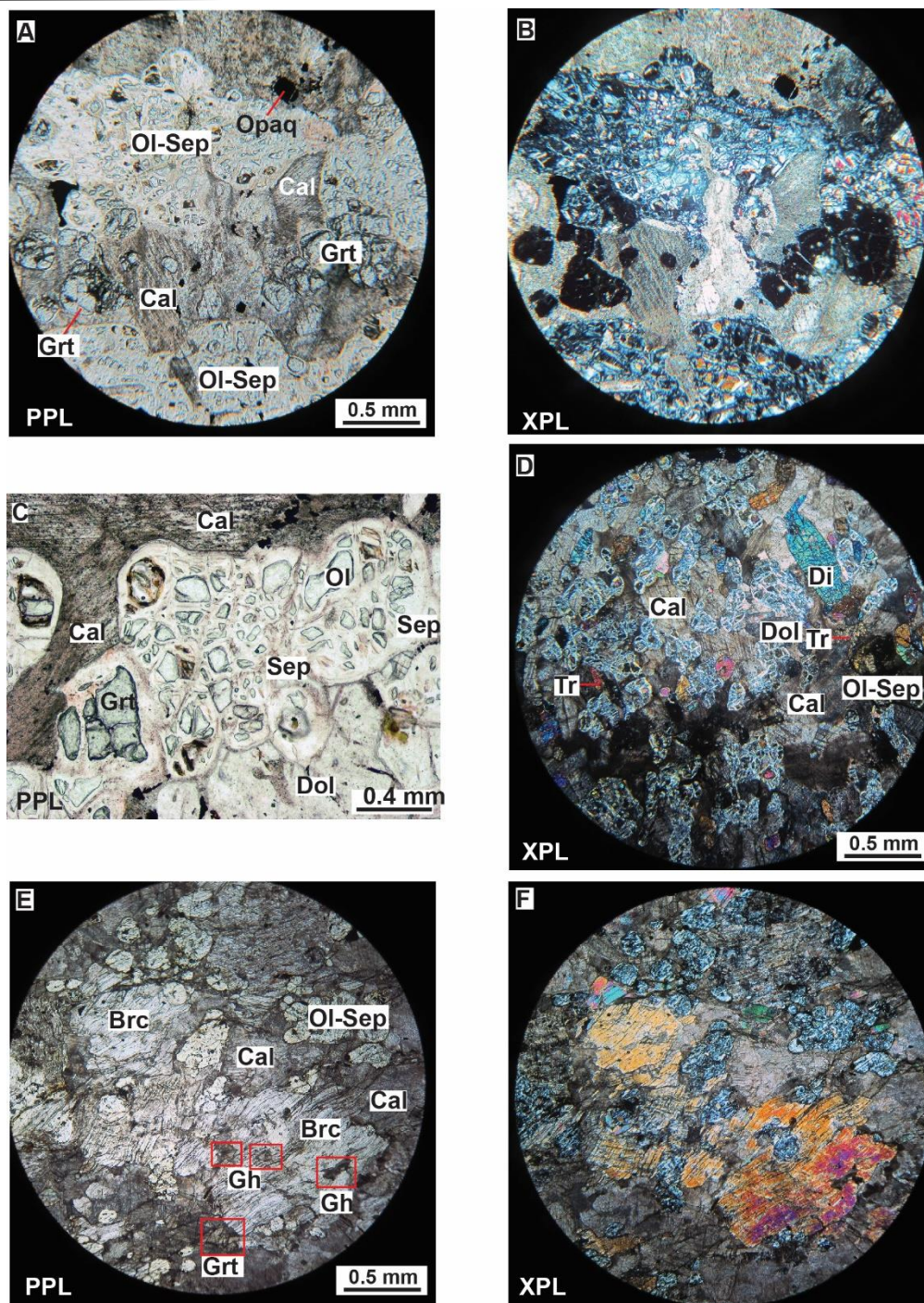
میلیون سال دارد (Fazlnia et al., 2009)، منطبق هستند. در این شرایط، گردهمایی کانیایی غالب دیوپسید + الیوین + دولومیت + کلسیت است (شکل ۴-d). در این سنگ‌ها هم بلورهای الیوین به سرپانتین تبدیل شده‌اند. بلورهای ترمولیت در زمینه و در محل‌های بین الیوین-دولومیت و یا دیوپسید-دولومیت تشکیل شده‌اند. این بلورهای ترمولیت با انواعی که در بخش‌های با درجه دگرگونی ضعیف (شکل ۳-a) تشکیل شده‌اند متفاوت هستند. در انواع رخنمون‌های سنگی با درجه دگرگونی قوی، به وضوح شواهدی از دگرگونی قهقرایی قابل مشاهده است. در انواعی که بلورهای الیوین در گردهمایی کانیایی دیوپسید + الیوین + دولومیت + کلسیت، به آنتی‌گوریت تبدیل شده‌اند (شکل ۴-a و b). در این نمونه‌ها شواهد دگرگونی M2 به خوبی حفظ



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی از سنگ‌های مرم‌ دولومیتی مجموعه دگرگونی قوری. a و b) رخداد گردهمایی کانیاپی ترمولیت + فلوگوپیت + کلسیت + دولومیت + آلورژیت (نوعی میکای سفید) و دیوپسید + ترمولیت + دولومیت + کلسیت + کانی کدر در سنگ‌های با درجه دگرگونی ضعیف تا متوسط در طول مرحله رشد M1 (به شکل ۶ مراجعه شود). c و d) رخداد گردهمایی کانیاپی الیوین + گارنت + دیوپسید + کلسیت + دولومیت در سنگ‌های با درجه دگرگونی قوی در طول مرحله رشد M1. الیوین‌ها در مراحل بعدی دگرگونی سرپانتینی (آنتی‌گوریت) شده‌اند. e و f) رخداد گردهمایی کانیاپی الیوین + گارنت + دیوپسید + کلسیت + دولومیت در سنگ‌های با درجه دگرگونی قوی در طول دگرگونی از مرحله M1 به سمت مرحله M2. الیوین‌ها در مراحل بعدی دگرگونی سرپانتینی شده‌اند. همچنین بقایای ترمولیت با درجه دگرگونی متوسط در داخل دیوپسیدها به دام افتاده است. این گردهمایی‌های کانیاپی مراحل انتهایی رشد دگرگونی M1 را نشان

می‌دهند. مخفف‌ها: XPL: نور پلاریزه متقاطع؛ PPL: نور پلاریزه مسطح؛ Cal: کلسیت، Dol: دولومیت؛ Di: دیوپسید؛ Grt: گارنت؛ Ol: الیون؛ Sep: سرپانتین؛ Tr: ترمولیت (Whitney and Evans, 2010).

Fig. 3. Photomicrographs from the Qori complex dolomitic marbels. a and b) The assemblages tremolite + phlogopite + calcite + dolomite + alurgite (a white mica) and diopside + tremolite + calcite + dolomite + opaque minerals in the low to medium grade rocks formed during M1 metamorphic phase (see the Fig. 6). c and d) The assemblages olivine + garnet + diopside+ calcite + dolomite in high grade rocks formed during M2 metamorphic phase. The olivines were replaced by serpentine after M2. e and f) the assemblage olivine + garnet + calcite + dolomite in the high-grade rocks during M1 to M2 transition. The tremolite relicts from the medium-grade rocks were trapped in the diopsides. This mineral assemblage represents the final steps of the M1 phase. The abbreviations are: XPL: crossed polarized light, PPL: plane polarized light, Cal: calcite, Dol: dolomite, Grt: garnet, Ol: olivine, Sep: serpentine, Tr: tremolite (Whitney and Evans, 2010).



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی از سنگ‌های مرم دولومیتی مجموعه دگرگونی قوری. (a و b) رخداد گردهمایی کانیاپی الیوین + گارنت + دیوپسید + کلسیت + دولومیت در سنگ‌های با درجه دگرگونی قوی در طول دگرگونی M1 به سمت M2 که در مراحل بعدی دگرگونی (انتهای M2)، الیوین به سرپانتین (آنتی‌گوریت) و گارنت به سرسیت و کلریت (پینییتی شدن) تبدیل شده‌اند. (c و d) رخداد گردهمایی کانیاپی الیوین + دیوپسید + کلسیت + دولومیت + کانی کدر در سنگ‌های با درجه دگرگونی قوی در طول دگرگونی M2 (به شکل ۶ مراجعه شود). الیوین‌ها در مراحل بعدی دگرگونی الیوین، سرپانتینی (آنتی‌گوریت) شده‌اند و بلورهای

گارت در حال اضمحلال هستند. بلورهای ترمولیت هم در مراحل قهقرایی تشکیل شده‌اند. (f و e) رخداد گردهمایی کانیاپی الیوین (سرپانتینی شده: آنتی‌گوریت) + کلسیت + دولومیت + گاهنیت + بروسیت در سنگ‌های با درجه دگرگونی قوی. مخفف‌ها: Gh: گاهنیت; Brc: بروسیت (Whitney and Evans, 2010).

Fig. 4. Photomicrographs from the Qori complex dolomitic marbels. a and b) The assemblages olivine + garnet + diopside + calcite + dolomite in high grade rocks formed during M1 to M2 transition. The olivines and garnets were replaced by serpentine (antigorite) and sericite + chlorite (pinitization), respectively, after that phase. c and d) The assemblages olivine + garnet + diopside + calcite + dolomite + opaque minerals in the high-grade rocks formed during M2 (see Fig. 6). The olivines were replaced by serpentine (antigorite), and the garnets were resorbed after M2. The tremolites formed during the retrograde phase. e and f) the mineral assemblage olivine (serpentinized) + calcite + dolomite + gahnite + brucite in the high grade rocks. The abbreviations are as Fig. 3 plus Gh: gahnite, Brc: brucite (Whitney and Evans, 2010).

(Barton et al. 2018; Winter 2014) به کار گرفته شد که در آن

نمونه‌ها در بخش کربنات‌ها قرار می‌گیرند (شکل ۵-ا). البته با توجه به حضور منیزیم و سیلیس باید سنگ مادر را یک آهک ناخالص یا مرمر دولومیتی در نظر گرفت (شکل ۵-ب). بر این اساس نمونه‌های مورد مطالعه از دولومیت و سپس کلسیت غنی هستند. البته برخی از نمونه‌های دارای مقادیری از سیلیس به صورت کوارتز در پتروگرافی نمایش می‌دهند (شکل ۳-ب). به نظر می‌رسد که برخی از نمونه‌های سنگی مورد مطالعه ترکیب مرمر کالک‌سیلیکاته نیز دارند که در تجزیه شیمیایی غایب هستند.

ژئوشیمی سنگ کل

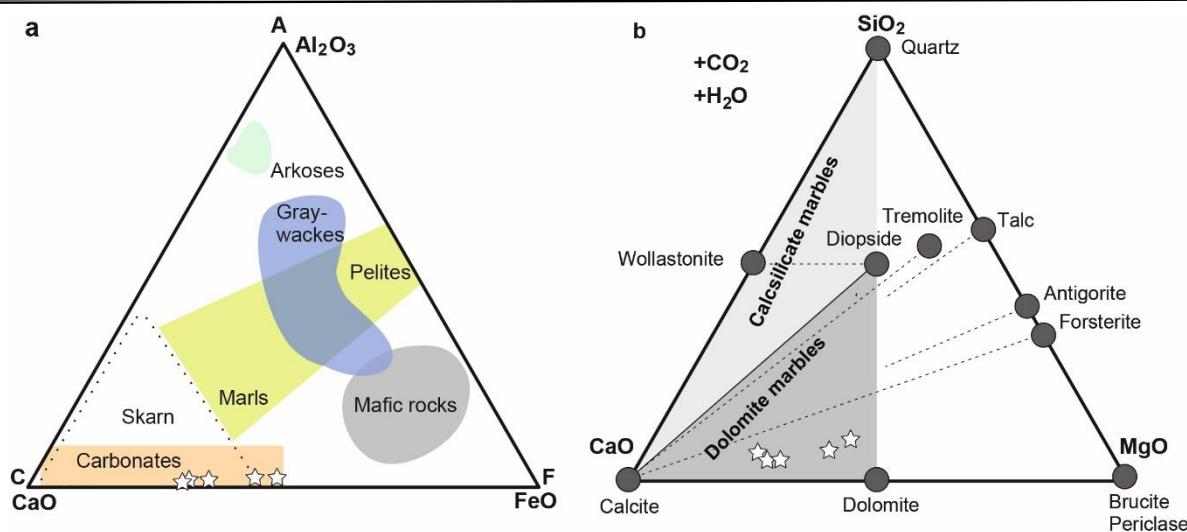
ترکیب شیمیایی سنگ کل سنگ‌های دگرگونی می‌تواند نماینده ترکیب شیمیایی سنگ‌مادر آنها باشد. نتایج آنالیز شیمیایی سنگ کل نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود CaO مهم‌ترین اکسید در این نمونه‌ها بوده و پس از آن MgO و SiO₂ قرار می‌گیرند. جهت تعیین سنگ‌مادر این نمونه‌ها از نمودار ACF [A = Al₂O₃ - (Na₂O + K₂O), C = CaO -]، همه در درصد مولکولی [(3.3×P₂O₅), F = MgO + MnO + FeO]

جدول ۱- تجزیه شیمیایی نمونه‌های سنگی مرمر دولومیتی. نمونه‌های سنگی با درجه دگرگونی قوی‌تر در سمت چپ نشان داده شده‌اند.

Table 1. Compositions of the dolomitic marble samples. Samples of higher metamorphic grades are in the left part.

Oxide	Sample ID / Detect Limit	AF-57	AF-59	AF-111	AF-62	AF-71
	wt. %	High grade				Low grade
SiO ₂	0.04	4.04	3.76	3.35	4.38	5.03
Al ₂ O ₃	0.02	1.02	1.21	1.45	2.05	2.25
TiO ₂	0.01	0.05	0.08	0.11	0.09	0.12
Fe ₂ O ₃	0.01	0.07	0.07	0.09	0.08	0.25
MgO	0.01	13.01	13.21	14.78	18.45	19.34
MnO	0.002	0.04	0.05	0.06	0.05	0.08
CaO	0.006	41.18	40.44	38.56	32.29	29.06
K ₂ O	0.01	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07
Na ₂ O	0.02	0.06	0.07	0.07	0.05	0.08
P ₂ O ₅	0.002	0.003	0.003	0.004	0.003	0.007
LOI	0.05	40.25	40.71	41.12	42.02	43.23
Total		99.78	99.66	99.66	99.54	99.52
CaO/MgO		3.17	3.06	2.61	1.75	1.50

Total Fe as Fe₂O₃



شکل ۵- نمودارهای مثلثی جهت تعیین سنگ‌مادر نمونه‌های مورد بررسی. (a) نمودار مثلثی ACF (Barton et al. 2018; Winter, 2014). نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده سنگ‌های کربناته ترسیم شده‌اند. (b) نمودار مثلثی $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$ (Bucher and Grapes, 2011). نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده سنگ‌های مرمر دولومیتی قرار می‌گیرند.

Fig. 5. Protolith discrimination ternary diagrams for the studied samples. a) The ACF (Barton et al. 2018; Winter, 2014). The samples fall in the carbonate rocks. b) The $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$ diagram (Bucher and Grapes, 2011). The samples plot in the dolomitic marble field.

Padrón-Navarta et al., 2015) و Atg(PN) برای سرپانتین (Padrón-Navarta et al., 2013) در محاسبات مورد استفاده قرار گرفتند.

نمودارهای فازی

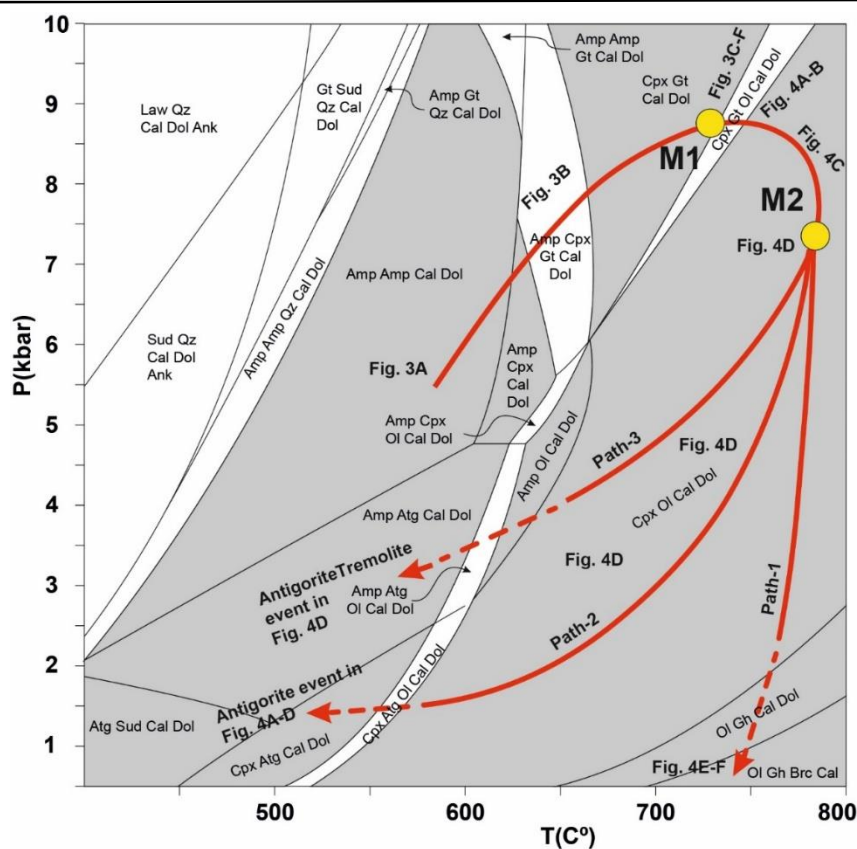
برای بررسی مسیرها و روندهای دگرگونی و تغییراتی که ممکن است در پاراژنز کانیایی مجموعه قوری اتفاق افتاده باشد از محاسبات ترمودینامیکی نمودارهای فازی استفاده می‌شود. این نمودارها با استفاده از نرم افزار Perplex (Connolly, 2005) نسخه 7.01.10 و پایگاه داده hp62ver.dat منتشر شده در سال ۲۰۲۳ محاسبه شدند. ترکیب شیمیایی نمونه AF-57 که دارای بالاترین مقدار منیزیم است و سیستم شیمیایی CFMASH ($\text{CaO-FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$) به کار برده شد تا امکان رخداد بیشترین تعداد فاز ممکن فراهم گردد. به دلیل حضور کربنات کلسیم در محیط، ترکیب سیال به $\text{H}_2\text{O-CO}_2$ و با نسبت ۹۰-۱۰ لحاظ شد، چرا که مقادیر بالاتر CO_2 تاثیری در نتایج به دست آمده نداشتند. مدل‌های محلول جامد Amph(DPW) برای آمفیبول (Dale et al., 2005)، Augite(G)، کلاینوپروکسن (Green et al., 2016)، Gt(W) برای گارنت (White et al., 2014)، Ol(JH) برای الیوین (Jennings and Holland, 2014)

نمودار فازی دما-فشار

این نمودار بر اساس تغییرات دما از ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۰/۵ تا ۱۰ کیلو بار محاسبه گردید (شکل ۵). با بررسی گردهمایی‌های کانیایی در محدوده‌های مختلف نمودار، می‌توان به روند رخداد دگرگونی و شرایط آن را، تخمین زد. انطباق فازهای دگرگونی با گردهمایی‌های کانیایی شکل گرفته در نمودار فازی دما-فشار محاسبه شده و نیز نمونه‌های مورد مطالعه (شکل‌های ۳ و ۴) امکان پذیر می‌باشد. روند رخداد فازهای دگرگونی با منحنی‌های قرمز رنگ بر روی نمودار نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، فرایند رشد دگرگونی با تشکیل کانی‌های ترمولیت و آلورژیت در این مرمرها نمود یافته است (شکل ۳- a و b). در ادامه واکنش‌های دگرگونی پیشرونده فاز M1، در دمای حدود ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار بالاتر از ۵ کیلو بار، کلاینوپروکسن و گارنت نیز به این سنگ‌ها اضافه شده‌اند

آمدگی و دگرگونی قهقرایی پس از رخداد M2 احتمالاً در طی چند مرحله به وقوع پیوسته است. بررسی‌های صحرایی همراه با مطالعات پتروگرافی-پتروفابریک نشان می‌دهد که در بخش جنوب و شرق روستای شورو (Shorou) (شکل ۱) سنگ‌های مورد مطالعه مسیرهای ۲ و ۳ را به نمایش می‌گذارند. در این بخش‌ها گسل‌های تراستی غایب هستند و به نظر می‌رسد که رخنمون بخش‌های عمیق دگرگونی به آرامی و در نتیجه فرسایش سنگ‌پوش انجام شده است. نتیجه اینکه کاهش دما و فشار به صورت تدریجی و پیوسته رخ داده است. در مقابل، نمونه‌های سنگی از اطراف روستای قوری و رخنمون‌های سنگی، به خوبی شواهدی از فعالیت شدید گسل‌های تراستی را برای رخنمون بخش‌های مختلف دگرگونی از قوی تا ضعیف را نشان می‌دهند. در این ناحیه، رخنمون‌های دگرگونی قوی شامل سنگ‌های رسی یا مافیک و یا آهکی در کنار رخنمون‌های با درجه دگرگونی ضعیف رخ می‌دهند. در همین رخنمون‌ها است که شواهدی از رشد بروسیت + گاهنیت در سنگ‌های مرمر دگرگونی مشاهده می‌گردد که توانسته‌اند بلورهای مرحله M2 را به صورت فابریک پوئی کیلوبلاستیک (شکل ۴-e و f) در بر بگیرند. بنابراین عملکرد گسل‌های تراستی در این رخنمون‌ها، موجب به سطح رسیدن سریع در زمانی محدود شده با کاهش جزئی دما شده، در نتیجه باعث ایجاد مسیر ۱ دگرگونی قهقرایی در اطراف قوری شده است (شکل ۶).

(شکل ۳-b). نخستین رخداد الیوین در این نمودار، در دمای حدود ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار حدود ۶ کیلوبار می‌باشد. بررسی‌های صورت گرفته بر روی دگرگونی منطقه قوری (Fazlnia et al., 2009; Fazlnia et al., 2017; Miri and Fazlnia, 2024) نشان داده‌اند که شرایط اوج دگرگونی ناحیه‌ای در این منطقه دمای حدود ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۷ تا ۹ کیلوبار رخ داده است. این مقادیر با نخستین رخداد الیوین در نمودار فازی شکل ۵ انطباق دارد. پس از رسیدن به شرایط اوج دگرگونی M1 (فشار حدود ۸ کیلوبار و دمای حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد)، دگرگونی فاز M2 در نتیجه نفوذ توده‌های آذرین مافیک و بروز شوک حرارتی به وقوع پیوسته که در آن تاثیر دما قابل توجه‌تر از فشار بوده است. نمود این فاز، رخداد گردهمایی کانیاپی کلینوپیروکسن + الیوین در این سنگ‌هاست (شکل ۴-c و d). بر اساس بررسی‌های پتروگرافی، می‌توان سه مسیر برای ادامه این رخداد رشد دگرگونی در نظر گرفت: ۱- افت قابل توجه فشار همراه با کاهش اندک دما که سبب جایگزینی الیوین با بروسیت و گاهنیت شده است (شکل ۴-e و f)، ۲- کاهش دما در فشارهای کم موجب جایگزینی الیوین‌ها با آنتیگوریت شده است (شکل ۴-a و c)، ۳- در فشارهای متوسط (۳ تا ۵ کیلوبار)، ترکیبات حدواسط بین محلول‌های جامد ترمولیت-اکتینولیت نیز دوباره به همراه آنتیگوریت رخ می‌دهند (شکل ۴-d). بر اساس این مسیرها، می‌توان استنباط نمود که بالا



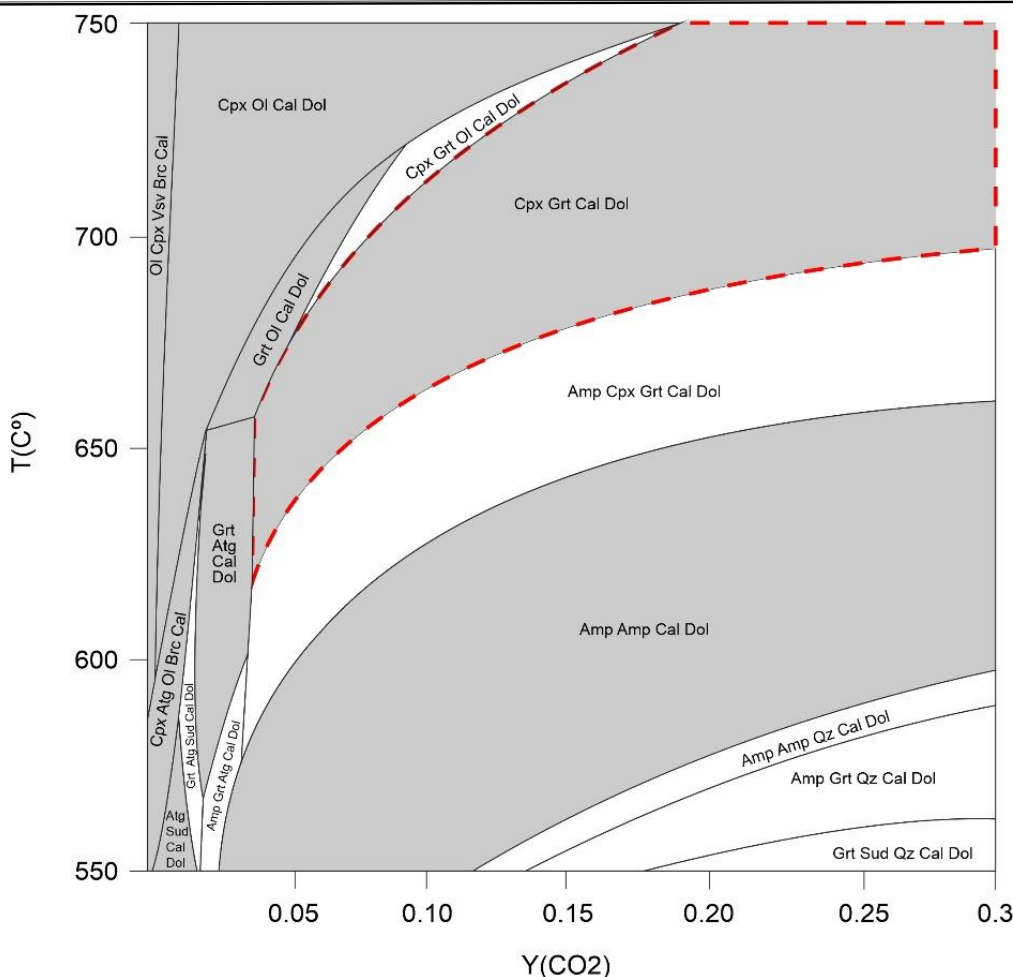
شکل ۶- نمودار فازی دما - فشار محاسبه شده برای نمونه AF-57. علامت‌های اختصاری کانی‌ها شامل Atg: آنتیگوریت، Amp: آمفیبول، Brc: بروسیت، Cal: کلسیت، Cpx: کلینوپروکسن، Dol: دولومیت، Grt: گارنت، Ol: الیوین، Sud: سودوئیت، Gh: گانهیت (Whitney and Evans, 2010).

Fig. 6. The P-T phase diagram calculated for the sample AF-57. The mineral abbreviations are: Atg: antigorite, Amp: amphibole, Brc: brucite, Cal: calcite, Cpx: clinopyroxene, Dol: dolomite, Grt: garnet, Sud: sudoite, Gh: gahnite, Ol: olivine (Whitney and Evans, 2010).

توسط نرم‌افزار Perplex (CaO-FeO) در دماها و فشارهای منطبق با مراحل مختلف دگرگونی محاسبه شدند تا درک بهتری از نحوه تغییر و تبدیل کانی‌ها حاصل شود (شکل ۷). هدف از استفاده از دو نوع نمودار این است که برخی کانی‌ها مانند الیوین و گارنت بر روی یک نمودار به تنهایی رسم می‌شوند. مسیرهای مختلف دگرگونی، نمودارهای سه‌تایی و پتروگرافی انطباق بالایی داشته و بنابراین مسیرهای دگرگونی تعیین شده برای مجموعه دگرگونی قوری قابل اعتماد می‌باشند.

نمودارهای سه‌تایی

نمودارهای سه‌تایی جهت نشان دادن گردهمایی کانی‌ها در یک دما و فشار خاص به کار برده می‌شوند. بر اساس اینکه از کدام اکسیدها در این نمودارها استفاده شده باشد، اسامی مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اینجا به منظور نشان دادن گردهمایی کانیایی کالک-سیلیکات، نمودارهای SCM (SiO₂-CaO-MgO) و ACF (-Al₂O₃)



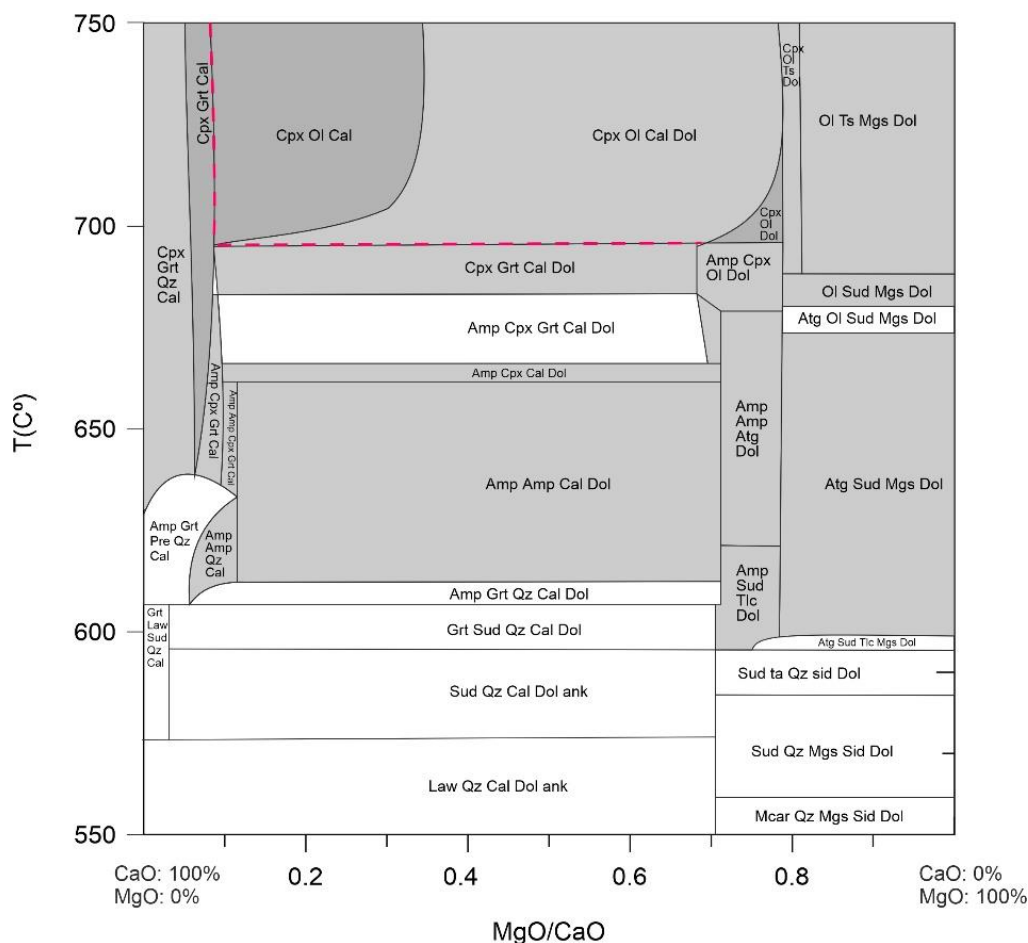
شکل ۸- نمودار فازي T-XCO₂ محاسبه شده برای نمونه AF-57.

Fig. 8. T-XCO₂ phase diagram calculated for the AF-57 sample.

آمده نشان می‌دهد که رخداد مجموعه‌های دگرگونی الیون و دولومیت‌دار که در بالاترین حد دمایی شکل گرفته‌اند نیاز به نسبت MgO/CaO حداقل ۰/۱ می‌باشد. منحنی خط‌چین قرمز در شکل ۹ این محدوده‌ها را مشخص می‌کند. از سوی دیگر، رخداد آنتیگوریت نیز نیازمند مقادیر MgO/CaO حدود ۰/۷ است. نسبت‌های MgO/CaO در نمونه‌های مورد مطالعه (۰/۳۲ تا ۰/۶۷) با نتایج این نمودار هم‌خوانی مناسبی دارند. به عبارت دیگر، محتوای مناسب منیزیم در سنگ‌مادر این مرم‌های دولومیتی امکان تشکیل گردهمایی‌های کانی‌شناسی یافت شده در آنها را فراهم ساخته است.

نمودار T-MgO/CaO

عامل دیگری که می‌تواند در رخداد کانی‌های مختلف در طی دگرگونی مرم‌های دولومیتی مهم باشد، میزان ناخالصی منیزیم و آهن سنگ‌مادر است. در مورد نمونه‌های مجموعه قوری، به دلیل اینکه مقدار آهن اندک است (جدول ۱)، رخداد کانی‌های فرومنیزین تحت تاثیر مقدار منیزیم بوده است. از این رو، برای بررسی این موضوع نمودار فازي دما در برابر تغییرات نسبت MgO/CaO برای نمونه شماره AF-57 محاسبه گردید (شکل ۹). همانند نمودار قبل، در اینجا نیز فشار ثابت و معادل با شرایط اوج دگرگونی در نظر گرفته شد. نمودار به دست



شکل ۹- نمودار فازی نشان دهنده تغییرات نسبت MgO/CaO در برابر دما محاسبه شده برای نمونه شماره AF-57.

Fig. 9. Phase diagram representing MgO/CaO variation versus T for the FF-57 sample.

Ilkhchi et al., 2011; Bröcker et al., 2014; Sheikholeslami, 2015; Hassanzadeh and Wernicke, 2016; Yang et al., 2018; Shakerardakani et al., 2022; Jafari et al., 2023; Miri and Fazlnia, 2024; Dehghan Nayeri et al., 2024 بر اساس

مطالعات این پژوهشگران، در بخش جنوبی این زون، حداکثر دما و فشار دگرگونی به ترتیب ۶۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۷ تا ۹ کیلوبار (در زمان ژوراسیک) به دست آمده است. این محققین نشان داده‌اند که چنین دگرگونی‌هایی منطبق با فرورانش نئوتتیس به زیر ایران مرکزی رخ داده است. بنابراین دگرگونی‌های ژوراسیک پهنه ساندج-سیرجان مرتبط با یک رویداد مرتبط با کمان ماگمایی حاشیه قاره‌ای بوده است. در مقابل، برخی دیگر از پژوهشگران با مطالعه سنگ‌های ماگمایی زمان

ملاحظات زمین‌ساختی

دگرگونی باروین (Barrovian) در اثر ضخیم شدن پوسته در قاعده‌های یک کمربند کوهزایی (زیر رشته‌های کوه‌زایی) در طول دگرگونی ناحیه‌ای رخ می‌دهد (Best, 2003). این نوع از دگرگونی‌ها به خوبی در مناطق فرورانشی به صورت یکی از رشته دگرگونی‌های زوج نوارهای دگرگونی گسترش می‌یابند (Spear, 1993). این نوع دگرگونی در کمربند کوهزایی زاگرس متداول هستند. رخداد دگرگونی‌های کوهزایی مرتبط با ژوراسیک در پهنه ساندج-سیرجان جنوبی با انواع باروین تطابق دارند (برای مثال، Fazlnia et al., 2009; Rahmati

با کمائی تلفیق می‌شوند، می‌توان نتیجه گرفت که ارتباط تنگاتنگی بین این ماگماتیسم‌ها و جریان‌های حرارتی راه یافته به پوسته قاره‌ای در یک سیستم کمان قاره‌ای، برای ایجاد فرایند دگرگونی کوهزایی مرتبط با فرورانش وجود دارد. بعلاوه هیچ گزارشی از شواهد دگرگونی مرتبط با کافت، که به صورت سری رخساره‌های دگرگونی باکان قابل ردیابی هستند (Raymond, 2007)، را نمی‌توان در ژوراسیک بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان یافت. این شواهد نشان می‌دهد که در ژوراسیک، بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان یک کمان قاره‌ای فعال بوده است و دو فرایند رشد دگرگونی باروین با سن‌های ۱۸۷ و ۱۴۷ میلیون سال مرتبط با فرورانش نئوتتیس به زیر ایران مرکزی تکامل یافته‌اند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان می‌دهد که سنگ‌های مرمر دولومیتی همراه با انواع سنگ‌های رسی و مافیک در منطقه قوری، در نتیجه دو واقعه رشد دگرگونی، با مشخصه باروین، در نتیجه فرورانش نئوتتیس به زیر ایران مرکزی در پهنه سنندج-سیرجان جنوبی در طول ژوراسیک یکی در ۱۸۷ و دیگری در ۱۴۷ میلیون سال رخ دادند. در نتیجه این دو واقعه، به ترتیب دو گردهمایی کانیایی متعادل کلینوپیروکسن + گارنت + کلسیت + دولومیت و کلینوپیروکسن + الیوین + کلسیت + دولومیت در شرایط اوج دگرگونی تشکیل شدند. رویداد رشد دگرگونی مرحله دوم در مسیرهای مختلف به صورت قهقرایی باعث ایجاد گردهمایی کانیایی (۱) الیوین + کلسیت + دولومیت + گاهنیت + بروسیت به صورت کاهش فشار سریع با دمای تقریباً ثابت و (۲) آنتیگوریت + ترمولیت + کلینوپیروکسن + الیوین + کلسیت + دولومیت در نتیجه کاهش تدریجی فشار و حرارت تدریجی گردید. عملکرد گسل‌های تراستی بزرگ مقیاس، گردهمایی کانیایی برگشتی اولی و رخنمون یافتن به سطح آرام، دومین گردهمایی کانیایی برگشتی را باعث گردید.

ژوراسیک بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان (Azizi and Stern, 2019; Azizi et al., 2020; Shirdashtzadeh et al., 2024) مشخص نموده‌اند که در این زمان یک سیستم کافت فعال بوده که باعث ایجاد بخشی از نئوتتیس در این ناحیه از ایران شده است. از سوی دیگر، سایر بررسی‌های صورت گرفته بر ماگماتیسم‌هایی ژوراسیک بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان (Bayati et al., 2017; Chu et al., 2021; Fazlnia et al., 2013; Maghdour-Mashhour et al., 2021; Shabanian and Neubauer, 2024; Shafaii Moghadam et al., 2024) نشان دادند که در این زمان یک سیستم کمان قاره‌ای، فعال بوده است. آنها نشان دادند که آغاز فرورانش آن به زیر ایران مرکزی در بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان قبل از ژوراسیک رخ داده است که سبب ماگماتیسیم نفوذی قابل توجهی در این بخش از این پهنه طی ژوراسیک و کرتاسه گشته است. بسیاری از شواهد ماگماتیسیم مرتبط با کافت بر اساس فقط یک نوع سنگ (برای مثال گرانیت نوع-S یا سنگ‌های مافیک) متمرکز شده‌اند. در بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان شواهدی که با ماگماتیسیم کافتی ژوراسیک در ارتباط باشد، مانند ماگماتیسیم آلکالن (تراکیت، فنولیت، تفریت، بازائیت، نفلینیت و ...)، کربناتیت‌ها، ماگماهای پتاسیک تحت اشباع از سیلیس، لامپروفیرهای اولترامافیک و ماگماتیسیم با توزیع دوگانه (Gill, 2010; Hutchison et al., 2018)، قابل مشاهده نیستند. بارزترین شاهد ماگماتیسیم ریفتی، گردهمایی همزمان ماگماتیسیم کربناتیتی-نفلینیتی است که به مانند موارد قبلی در ژوراسیک بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان وجود ندارند. علاوه بر این موارد، دگرگونی‌ها نوع فشار و حرارت متوسط که باروین نامیده می‌شود نمی‌تواند با گردهمایی سنگ‌شناسی مخصوص پهنه‌های ریفتی درون قاره‌ای همزمان رخ دهد. بنابراین دو واقعه رشد دگرگونی در قوری با سیستم ریفتی هم‌خوانی ندارد.

هنگامی که دو واقعه رشد دگرگونی باروین مربوط به ژوراسیک قوری از بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان با ماگماتیسیم‌های مرتبط

References

- Alavi, M., 1994. Tectonic of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229 (3–4), 211–238.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monié, P., Meyer, B., Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. Cambridge University Press. *Mineralogical Magazine* 148, 692–725.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science* 304(1), 1-20.
- Azizi, H., Lucci, F., Stern, R.J., Hasannejad, S., Asahara, Y., 2018. The Late Jurassic Panjeh submarine volcano in the northern Sanandaj-Sirjan Zone, northwest Iran: Mantle plume or active margin? *Lithos* 308–309, 364–380.
- Azizi, H., Nouri, F., Stern, R.J., Azizi, M., Lucci, F., Asahara, Y., Zarinkoub, M.H., Chung, S.L., 2020. New evidence for Jurassic continental rifting in the northern Sanandaj Sirjan Zone, western Iran: the Ghalaylan seamount, southwest Ghorveh. *International Geology Review* 62(13-14), 1635–1657.
- Azizi, H., Stern, R.J., 2019. Jurassic igneous rocks of the central Sanandaj–Sirjan zone (Iran) mark a propagating continental rift, not a magmatic arc. *Terra Nova* 31, 415–423.
- Azizi, H., Stern, R.J., Kandemir, R., Karsli, O., 2023. A Jurassic volcanic passive margin in Iran and Turkey. *Terra Nova* 31, 141–152.
- Barton, M.D., Ilchik, R.P., Marikos, M.A. 2018. Metasomatism. In: Kerrick D.M., (Ed.), *Contact metamorphism*. De Gruyter, pp. 321–350.
- Bayati, M., Esmaily, D., Maghdour-Mashhour, R., Li, X.H., Stern, R.J., 2017. Geochemistry and petrogenesis of Kolah-Ghazi granitoids of Iran: Insights into the Jurassic Sanandaj-Sirjan magmatic arc. *Geochemistry* 77, 281–302.
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a palaeogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210–265.
- Bröcker, M., Fotoohi Rad, G., Abbaslu, F., Rodionov, N., 2014. Geochronology of high-grade metamorphic rocks from the Anjul area, Lut block, eastern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 82, 151–162.
- Bucher, K. and Grapes, R., 2011. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer-Verlag, Heidelberg, p. 428.
- Chu, Y., Wan, B., Allen, M.B., Chen, L., Lin, W., Talebian, M., Xin, G., 2021. Detrital zircon age constraints on the evolution of Paleo-Tethys in NE Iran: Implications for subduction and collision tectonics. *Tectonics* 40 (8), e2020TC006680.
- Connolly, J.A.D., 2005. Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth and Planetary Science Letters* 236, 524–541.
- Dale, J., Powell, R. White, R.W., Elmer, F.L., Jolland, T.J.B., 2005. A thermodynamic model for Ca–Na clin amphiboles in Na₂O–CaO–FeO–MgO–Al₂O₃–SiO₂–H₂O–O for petrological calculations. *Journal of Metamorphic Geology* 23(8), 771–791.
- Dehghan Nayeri, F., Nasrabad, M., Jamshidbadr, M., Ahmadvand, A., 2024. Thermobarometry and tectonic setting of the regional metamorphic rocks from South Sirjan (the Southern SSZ), Iran. *Geopersia* 14(1), 73–88.
- Fazlnia, A., 2017. Geochemical characteristics and conditions of formation of the Chah-Bazargan peraluminous granitic patches, ShahrBabak, Iran. *Geologica Carpathica* 68, 445–463.
- Fazlnia, A., Pang, K.N., Ji, WQ., PiroueiPirouei, M., 2023. Geochemical constraints on Eocene ignimbrite flare-up in the Urumieh-Dokhtar magmatic arc, northwestern Iran. *Lithos* 450–451, 107189.
- Fazlnia, A., Pang, K.N., Sun, Y., Lee, H.Y., 2024. Geochemistry and origin of the Late Carboniferous ultramafic, mafic, and felsic plutonic rocks (NW Iran). *Lithos* 480–481, 107650.
- Fazlnia, A.N., Schenk, V., Appel, P., Alizade, A., 2013. Petrology, geochemistry, and geochronology of the Chah-Bazargan gabbroic intrusions in the south Sanandaj–Sirjan zone, Neyriz, Iran. *International Journal of Earth Sciences* 102, 1403–1426.
- Fazlnia, A.N., Schenk, V., van der Straaten, F., Mirmohammadi, M.S., 2009. Petrology, Geochemistry, and Geochronology of Trondhjemites from the Quri Complex, Neyriz, Iran. *Lithos* 112, 413–433.
- Fazlnia, A., Miri, M., Saki, A., 2024. Metamorphism of meta-ultramafic rocks from the Qori metamorphic complex (Neyriz, Iran): Implications for arc-related metamorphism. *Geologica Carpathica* 75(4), 227 – 242. <https://doi.org/10.31577/GeolCarp.2024.14>

- Gill, R., 2010. *Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide*. 1st edition, John Wiley and Sons, Oxford, UK, p. 428.
- Golonka, J., 2004. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. *Tectonophysics* 381, 235–273.
- Green, E.C.R., White, R.W., Diener, J.F.A., Powell, R., Holland, T.J.B., Palin, R.M., 2016. Activity-composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks. *Journal of Metamorphic Geology* 34(9), 845–869.
- Hassanpour, S., 2021. Lahroud, a Paleo-Tethys Remnant in Northwestern Iran: implications for geochemistry, radioisotope geochronology, and tectonic setting. *Russian Geology Geophysics*, 62, 1107–1126.
- Hassanzadeh, J., Wernicke, B.P., 2016. The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. *Tectonics* 35, 586–621.
- Hollocher, K., 2014. A pictorial guide to metamorphic rocks in the fie Taylor and Francis Group, London, UK, p. 302.
- Hutchison, W., Mather, T.A., Pyle, D.M., Boyce, A.J., Gleeson, M.L.M., Yirgu, G., Blundy, J.D., Ferguson, D.J., Vye-Brown, C., Millar, I.L., Sims, K.W.W., Finch, A.A., 2018. The evolution of magma during continental rifting: New constraints from the isotopic and trace element signatures of silicic magmas from Ethiopian volcanoes. *Earth and Planetary Science Letters* 489, 203–218.
- Jafari, A., Ao, S.A., Jamei, S., 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 Review* 241, 104419.
- Jennings, E.S., Holland, T.J.B., 2015. A simple thermodynamic model for melting of peridotite in the system NCFMASOcr. *Journal of Petrology* 56, 869–892.
- Maghdour-Mashhour, R., Hayes, B., Pang, K.N., Bolhar, R., Tabbakh Shabani, A.A., Elahi- Janatmakan, F., 2021. Episodic subduction initiation triggered Jurassic magmatism in the Sanandaj-Sirjan zone, Iran. *Lithos* 396–397, 106189.
- Miri, M., Fazlnia, A., 2024. Investigating the progressive dynamothermal metamorphic evolution of metabasites from the Qori complex (NE Neyriz) using phase diagrams. *Advanced Applied Geology* 13(4), 1176–1192.
- Mouthereau, F., Lacombe, O., Vergés, J., 2012. Building the Zagros collisional orogen: timing, strain distribution and the dynamics of Arabia/Eurasia plate convergence. *Tectonophysics* 532–535, 27–60.
- Mposkos, E., Baziotis, I., Proyer, A., Hoinkes, G., 2006. Dolomitic marbles from the ultrahighpressure metamorphic Kimi complex in Rhodope, N.E. Greece. *Mineralogy and Petrology* 88, 341–362.
- Nouri, F., Azizi, H., Stern, R.J., Asahara, Y., 2023. The Sanandaj-Sirjan Zone (W. Iran) was a Jurassic passive continental margin: Evidence from igneous rocks of the Songhor area. *Lithos* 440–441, 107023.
- Padrón-Navarta, J.A., Sánchez-Vizcaíno, V.L., Hermann, J., Connolly, J.A.D., Garrido, C.J., Gómez-Pugnaire, M.T., and Marchesi, C., 2013. Tschermak's substitution in antigorite and consequences for phase relations and water liberation in high-grade serpentinites. *Lithos* 178, 186–196.
- Pang, K.-N., Fazlnia, A., Ji, W.Q., Jamei, S., Jafari, A., 2020. Petrogenesis of the Late Oligocene Takht batholith, Southeastern Iran: Implications for the Diachronous Nature of the Arabia–Eurasia Collision. *Frontiers in Earth Science* 8, 354. <https://doi.org/>
- Rahmati-Ilkhchi, M., Faryad, S. W., Holub, F. V., Košler, J., Frank, W. 2011. Magmatic and metamorphic evolution of the Shotur Kuh metamorphic complex (Central Iran). *International Journal of Earth Sciences* 100, 45–62.
- Raymond, L.A., 2007. *Petrology: The Study of Igneous, Sedimentary and Metamorphic Rocks*. 2nd Edition, Waveland Pr Inc, p. 736.
- Sánchez-Vizcaíno, V.L., Hermann, J., Connolly, H.A.D., Garrido, C.J.G., Gómez-Pugnaire, M.T., Marchesi, C., 2013. Tschermak's substitution in antigorite and consequences for phase relations and water liberation in high-grade serpentinites. *Lithos* 178, 186–196.
- Satish-Kumar, M., Motoyoshi, Y., Suda, Y., Hiroi, Y., Kagashima, S.I., 2006. Calc-silicate rocks and marbles from Lu'tzow-Holm Complex, East Antarctica, with special reference to the mineralogy and geochemical characteristics of calc-silicate mega-boudins from Rundva'gshetta. *Polar Geosciences*, 19, 37–61.
- Shabani, N., Neubauer, N., 2024. From Early Jurassic intracontinental subduction to Early-Middle Jurassic slab break-off magmatism during the Cimmerian orogeny in the Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 267, 106153.
- Shafaii Moghadam, H., Xiao, W., Griffin, W.L., Ghorbani, G., Li, Q.-I., Karsli, O., Santos, J.F., Ping, X.P., Bayati, M., O'Reilly, S.Y., 2024. Mesozoic crustal growth and

- recycling along the Southern margin of Eurasia: Magmatic rocks from the Sanandaj-Sirjan Zone of Iran. *Lithos* 482–483, 107700.
- Shakerardakani, F., Neubauer, F., Bernroider, M., Finger, F., Hauzenberger, C., Genser, J., Monfaredi, B., 2022. Metamorphic stages in mountain belts during a Wilson cycle: a case study in the Central Sanandaj-Sirjan zone (Zagros Mountains, Iran). *Geoscience Frontier* 13(2), 101272.
- Sheikholeslami, M.R., 2015. Deformations of Palaeozoic and Mesozoic rocks in southern Sirjan, Sanandaj–Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 106, 130–149.
- Shirdashtzadeh, N., Dilek, Y., Furnes, H., Dantas, E.L., 2024. Early Jurassic and Late Cretaceous plagiogranites in Nain–Baft ophiolitic mélangé zone in Iran: remnants of rift–drift and SSZ evolution of a Neotethyan seaway. *Journal of the Geological Society* 181. <https://doi.org/10.1144/jgs2023-181>
- Stern, R.J., Shafaii Moghadam, H., Pirouz, M., Mooney, W., 2021. The geodynamic evolution of Iran. *Annual Reviews in Earth and Planetary Science Letters*, 49, 9–36.
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52, 1229–1258.
- White, R.W., Powell, R., Holland, T., Johnson, T., and Green, E., 2014, New mineral activity–composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems. *Journal of Metamorphic Geology* 32, 261–286.
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185–187.
- Winter, J.D., 2014. Principles of igneous and metamorphic petrology. Pearson Education Limited, Edinburgh, p. 684.
- Yang, T.N., Chen, J.L., Liang, M.J., Xin, D., Aghazadeh, M., Hou, Z.Q., Zhang, H.R., 2018. Two plutonic complexes of the Sanandaj-Sirjan magmatic-metamorphic belt record Jurassic to early cretaceous subduction of an old Neotethys beneath the Iran microplate. *Gondwana Research* 62, 246–268.