

Research Article

OPENOACCESS

# 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<sup>1</sup>\*, Mirmohammad Miri<sup>2</sup>

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 A 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

CC O S

[DOI: 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 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  $650^{\circ}$  C and 9 kbar and  $720^{\circ}$  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  $\pm$ chromiferous magnetite in the metaultramafic rocks formed at the peak metamorphic condition of 700-800  $^{\circ}$ 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 (H<sub>2</sub>O-) and LOI (Loss on ignition) were obtained by heating the powders at 110 and 900  $^{\circ}$  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 Khoor 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 teremolite between olivinedolomite 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 SiO<sub>2</sub>. To determine the parent rock, the AFC diagram  $[A = Al_2O_3 - (Na_2O + K_2O), C = CaO - (3.3 \times P_2O_5), F = MgO + MnO + FeOt, all in molecular percentage (Barton et al., 2018; Winter, 2014)] was used, in which the samples are placed in the carbonate section (Fig. 5A). However, regarding the presence of MgO and SiO<sub>2</sub>, the parent rock should be considered as impure limestone or dolomitic marble (Fig. 5B).$ 

# **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-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O) were used to allow the occurrence of the maximum mineral phases. The fluid composition was considered to be H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> with a ratio of 10-90 because higher amounts of CO<sub>2</sub> 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 gahneite (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-XCO<sub>2</sub> diagram at a constant pressure of 8 kbar shows that the stability of the studied mineral assemblage

occurs at  $CO_2$  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**

occurrence of The 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 SiO<sub>2</sub>-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 + gahneite + 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 foldthrust 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., Nasrabady, M., Jamshidibadr, 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 metaultramafic 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 Quri 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.

CRediT authorship contribution statement



Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Investigation, Resources, Data Curation, Writing - Original Draft, Supervision, Project administration, Funding acquisition

Methodology, Formal analysis, Software, Validation, Investigation, Resources, Writing - Review & Editing Winter, J.D., 2014. Principles of igneous and metamorphic petrology. Pearson Education Limited, Edinburgh, pp 684.

شاپا چاپی: ۴۴۹x– ۲۵۳۸ شاپا الکترونیکی: ۱۶۱۹–۲۹۸۱



Research Article OPENOACCESS Kharazmi Journal of Earth Sciences Journal homepage https://gnf.khu.ac.ir



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

# عبدالناصر فضلنیا<sup>\*۱</sup>، میرمحمد میری<sup>۲</sup>

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

چکیدہ	طلاعات مقاله
مجموعه دگرگونی بارووین قوری که در بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان رخنمون دارند، دارای تناوبی از تنوع سنگشناسی متااولترامافیک،	تاريخچه مقاله
متابازیت، متاپلیت، متاکالکسیلیکات و مرمر میباشد. بررسی انواع مرمرهای دولومیتی در این مجموعه بر اساس نمودارهای ترمودینامیکی فازی و	دريافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۳
مطالعات پتروگرافی، نشان داد که پاراژنزهای آمفیبول + کلسیت + دولومیت، آمفیبول + کلینوپیروکسن + گارنت + کلسیت + دولومیت، کلینوپیروکسن	ېذيرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵
+ گارنت + كلسيت + دولوميت، كلينوپيروكسن + گارنت + اليوين + كلسيت + دولوميت، كلينوپيروكسن + اليوين + كلسيت + دولوميت و اليوين +	واژههای کلیدی
کلسیت + دولومیت + گاهنیت + بروسیت در انواع رخنمونها قابل تشخیص بودند. در کلیه نمونهها بلورهای الیوین به طور بخشی و یا کامل به	مرمرهای دولومیتی،
آنتی گوریت (نوعی سرپانتین) تبدیل شدهاند. با استفاده از نمودارهای ترمودینامیکی فاز که بر مبنای تجزیه شیمیایی سنگ کل ترسیم شدهاند و با	مودارهاي ترموديناميكي
شواهد پتروگرافی و فابریکی انطباق داده شدهاند، مشخص گردید که نمونههای کالکسیلیکات قوری که بالاترین درجات دگرگونی را در خود ثبت	فازی، مجموعه دگرگونی
نمودهاند، دو مرحله دگرگونی M1 و M2 را متحمل شدهاند. مرحله اول رشد بلوری که با فشار حداکثری همراه بوده دارای پاراژنز دگرگونی	فورى، پهنه سنندج-
۔ کلینوپیروکسن + گارنت + کلسیت + دولومیت و مرحله دوم رشد بلوری با افزایش دما و کمی کاهش فشارتوأم بوده است. این دو مرحله دگرگونی،	سيرجان جنوبي.
با دو سن ۱۸۷ و ۱۴۷ میلیون سال پیش ارائه شده برای منطقه، هماهنگی دارد. به نظر می سد که مراحل مختلف فرورانش نئوتتیس به زیر یهنه	
سنندج-سیرجان عامل افزایش گرادیان زمین گرمایی و فشار دگرگونی برای تکامل رشد فازهای کانیایی متعادل دگرگونی بوده است. عملکرد متفاوت	
- گسلهای تراستی در بخشهای غربی و شرقی رخنمونهای دگرگونی قوری، منجر به ایجاد مسیرهای مختلف دگرگونی قهقرایی شده است؛ به	
طوری که، در بخش غربی عملکرد شدید گسل های تراستی منجر به ایجاد دگرگونی قهقرایی کاهش فشار ناگهانی در دمای تقریباً ثابت شده است،	
د در مقابل بخش غربی با کاهش عادی فشار و حرارت ناشی از فرسایش بخشهای فوقانی پوسته، دگرگونی قهقرایی را نمایش میدهد.	

#### مقدمه

دولومیتها و سنگهای آهکی سیلیسی، بخش بزرگی از نهشتههای رسوبی، به ویژه در رسوبات فانروزوئیک را تشکیل میدهند ( Bucher (marbles). 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.

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 (الیوین) دار و غیره. به دلیل نوع ترکیب شیمیایی مرمرهای دولومیتی، اغلب حاوی بیوتیت قهوهای کم رنگ و یا فلوگوپیت

# DOI http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.101162

\*نويسنده مسئول: عبدالناصر فضلنيا a.fazlnia@urmia.ac.ir

**استناد به این مقاله**: فضلنیا، ع.، میری، م.م. (۱۴۰۳). شرایط دگرگونی مرمرهای دولومیتی مجموعه دگرگونی قوری، پهنه سنندج-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



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

پهنه سنندج-سیرجان بخشی از کوهزایی برخوردی زاگرس است که بین کمربند 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 کمربند کوهزایی تصادمی آلپ-هیمالیا است. این پهنه در طول بسته شدن نئوتتیس در اواخر کرتاسه و یا سنوزوئیک تکامل یافت (برای مثال، Mouthereau Chu et al., 2021; et al., 2012). در هر حال عمده سنگهای این پهنه، انواع دگرگونی زمان مزوزوئیک و رسوبی 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

Berberian and King, 1981; Fazlnia et al., 2023; Jafari et al., 2023; Hassanpour, 2021; Pang et al., 2020; Stern et - مندج. (al., 2021; . دو واقعه دگرگونی در بخش جنوبی پهنه سنندج. (al., 2021) مسیرجان که با وقایع تکتونیکی فعالیت نئوتتیس همراه بود، انواع سنگ مای رسوبی-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 رسوبی کربناته همین دگرگونیها می پردازد.

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. Azizi and Stern, 2019; Azizi et al., می دهد که کافتزایی برخی تحقیقات جدید ( ,2020; Shirdashtzadeh et al., 2024 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 بارووین، با چنین ساختارهای ژئودینامیک سازگاری دارد؟ چه عواملی باعث دو واقعه دگرگونی بارووین در این دو زمان مختلف در بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان شده است؟

# جایگاه زمینشناسی و مطالعات صحرایی

پهنه سنندج-سیرجان جنوبی بیشتر شامل گرانیتوئیدهای کالک-آلکالن، گابرو و برخی سنگهای آتشفشانی همراه با آمفیبولیت و گارنت-کیانیت شیست میباشد که در طی فرورانش نئوتتیس به زیر Dehghan ، مرکزی تشکیل شده است (برای مثال، Nayeri et al., 2024; Hassanzadeh and Wernicke, 2016; Fazlnia, 2017; Miri and Fazlnia, 2024; Sheikholeslami, Fazlnia, 2017; Miri and Fazlnia, 2024; Sheikholeslami, 2015; Shirdashtzadeh et al., 2024 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، ;2013; Fazlnia et al., 2013; مثال

(Hassanzadeh and Wernicke, 2016). حسنزاده و ورنیک (Hassanzadeh and Wernicke, 2016) دگرگونی بخش جنوبی پهنه سنندج-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 ینوتتیس به زیر ایران مرکزی بوده است. میری و فضلنیا ( FazInia, 2024 متابازیکهای مجموعه دگرگونی قوری را مورد بررسی قرار داده و نتیجه متابازیکهای مجموعه دگرگونی قوری را مورد بررسی قرار داده و نتیجه متابازیکهای مجموعه دگرگونی و مرحله رشد دگرگونی را به ترتیب در ۶۵۰ درجه سانتی گراد و فشار ۹ کیلوبار و ۲۰۲۰ درجه سانتی گراد و فشار ۹ کیلوبار و ۲۰۲۰ درجه سانتی گراد و ۷ کیلوبار متحمل شدهاند. این شرایط، با مطالعات فضلنیا (FazInia, 2009) که دو سن ۱۸۷ و ۱۹۰۰ میلیون سال را نشان دادهاند انطباق دارد. به علاوه

بررسیهای شیخالسلامی (Sheikholeslami, 2015) نشان داد که در سنگهای مجموعه دگرگونی قوری دو جهتیافتگی ترجیحی وجود دارد که هریک با رشد بلورهای متعادل همراهند. بررسی سنگهای گابرویی (FazInia et al., 2013) نزدیک به مجموعه دگرگونی قوری، تحت عنوان تله پهلوانی، 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 (FazInia, 2017).



شکل ۱- a) نقشه زمین شناسی مجموعه قوری و مناطق اطراف، شرق نیریز (با تغییرات از Fazlnia et al., 2009). b) پهنههای ساختاری ایران ( Stöcklin, ) انقشه زمین شناسی مجموعه قوری و مناطق اطراف، شرق نیریز (با تغییرات از 1009).

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 صحرایی نشان میدهد که رخنمونهای سنگی مرمر دولومیتی به صورت تودهای مجزا (شکل ۲- a وb) و یا متناوب با سنگ-های رسی (شکل ۲-c و d)، مافیک و اولترامافیک دگرگون شده برونزد

بخشهایی که مرمرهای 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-d). عدسیهای بزرگ که حالتی معلق درون سنگ-های رسی دگرگونشده رخنمون دارند، بی رشه هستند و احتمالاً در زمانها بعدی با دیگر سنگها در آمیخته شدهاند (شکل ۲-a). در بخش-هایی که به صورت متناوب و یا میان لایهها و یا عدسیهای کوچک درون دیگر سنگها حضور دارند (شکل ۲-c) و ا)، درجات دگرگونی شدیدتر بوده و دو مرحله گردهمایی متعادل دگرگونی توانسته به ثبت برسد. بررسیهای فضل نیا و همکاران (FazInia et al., 2009) و میری و فضل نیا (FazInia et al., 2009) نشان دادند که در بخشهای

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 رخنمون-های 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.



شکل ۲- رخنمون های 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 میان لایه 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 نمونه گیری 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 کانیایی را داشت انتخاب گردیدند. نمونههای سنگی انتخابی توسط دستگاه XRF (فلورسانس پرتو ایکس مدلPhilips PW 1480) در دانشگاه کیل LOI و  $(H_2O^-)$  و المان تجزیه شدند (جدول ۱). مقادیر رطوبت سنگ ( $H_2O^-$ ) (Loss on ignition) به ترتیب با حرارت دادن پودرها در دمای ۱۱۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت به دست آمدند. با توجه به اينكه نمونهها با مشخصات جغرافيايي، برداشت گرديده بودند، بررسي 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 مىشود.

# 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 کانیایی دولومیت + کلسیت + ترمولیت + فلوگوپیت + آلورژیت (نوعی میکای سفید در سنگهای دگرگونی آهکی) هستند (شکل ۳-۵). 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 می گردد. در نمونههایی با درجه دگرگونی بالاتر، ترومولیت به شدت کاهش یافته و دانههای کوارتز ظهور می یابند. این سنگها، گردهمایی کانیایی دیویسید + دولومیت + کلسیت + ترمولیت + کوارتز + فازهای کدر دارند (شکل ۳-b). 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 می شود و بجای آن درصد مودال ديوپسيد به شدت افزايش مي يابد. بعلاوه بلورهاي اليوين و گارنت در رخنمون های سنگی ظاهر می شوند و در نتیجه گردهمایی کانیایی متعادل ديويسيد + اليوين + گارنت+ دولوميت + كلسيت ظاهر مي گردد (شکل ۳- c و d). در این سنگها، جهت یافتگی ترجیحی جای خود را به فابریک هم بعد (گرانوبلاستیک) داده است. این گردهماییهای کانیایی 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 بارووین با مشخصات ۶۵۰ درجه سانتی گراد 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 سانتی گراد 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 – e و f) و این دانهها از بلورهای دانه درشت در زمینه گرنوبلاستیک (شکل ۴- a و b) به بلورهای تحلیل رفته (شکلهای ۳e و f؛ f-f) تبدیل گردند. بلورهای گارنت به شدت تحلیل رفتهاند و درصد مودال ديويسيد و اليوين افزايش چشم گيري داشته است. اين سنگها، با مرحله دوم دگرگونی که M2 است و سنی معادل ۱۴۷

Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-04-29

میلیون سال دارد (FazInia et al., 2009)، منطبق هستند. در این شرایط، گردهمایی کانیایی غالب دیوپسید + الیوین + دولومیت + کلسیت است (شکل ۴-۵). 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 ۳-۵) 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 آنتی گوریت تبدیل شدهاند (شکل ۴-۵ و d). در این نمونهها شواهد دگرگونی M2 به خوبی حفظ

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 + کلسیت (همراه درصد مودال بسیار کم گارنت تحلیل رفته) با بلورهای درشت بروسیت و گاهنیت همراهی می شوند. بروسیتها دانههای الیوین (که بعداً سرپانتینی شدهاند) را در بر گرفته-اند. در همین سنگها، بلورهای کوچک گاهنیت با بروسیت همراه هستند. به نظر می رسد که مسیر دگرگونی قهقرایی این سنگها با انواع قبلی متفاوت است که در بخش بعدی بحث خواهد شد.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی از سنگهای مرمر دولومیتی مجموعه دگرگونی قوری. a و b) رخداد گردهمایی کانیایی 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 b) رخداد گردهمایی کانیایی 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 کانیایی 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 کانیایی 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 گردهمایی کانیایی مراحل انتهایی رشد دگرگونی آل را نشان

مىدهند. مخففها: XPL: نور پلاریزه متقاطع ؛ PPL: نور پلاریزه مسطح؛ Cal: كلسیت، Dol: دولومیت؛ Di: دیوپسید؛ Grt: گارنت؛ Ol: الیوین؛ 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, OI: olivine, Sep: serpentine, Tr: tremolite (Whitney and Evans, 2010).



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی از سنگهای مرمر دولومیتی مجموعه دگرگونی قوری. a و b) رخداد گردهمایی کانیایی 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 (آنتی گوریت) و گارنت به سریسیت و کلریت (پینیتی شدن) تبدیل شدهاند. c و b) رخداد گردهمایی کانیایی 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

ژئوشیمی سنگ کل

گارنت در حال اضمحلال هستند. بلورهای ترمولیت هم در مراحل قهقرایی تشکیل شدهاند. e و f) رخداد گردهمایی کانیایی الیوین (سرپانتینی شده: آنتی گوریت) + 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 + gannite + brucite in the high grade rocks. The abbreviations are as Fig. 3 plus Gh: gannite, Brc: brucite (Whitney and Evans, 2010).

(Barton et al. 2018; Winter 2014) به کار گرفته شد که در آن نمونهها در بخش کربناتها قرار می گیرند (شکل ۵-۵). البته با توجه به حضور منیزیم و سیلیس باید سنگ مادر را یک آهک ناخالص یا مرمر دولومیتی در نظر گرفت (شکل ۵-۵). بر این اساس نمونههای مورد مطالعه از دولومیت و سپس کلسیت غنی هستند. البته برخی از نمونه-های دارای مقادیری از سیلیس به صورت کوارتز در پتروگرافی نمایش میدهند (شکل ۳-۵). به نظر میرسد که برخی از نمونههای سنگی مورد مطالعه ترکیب مرمر کالکسیلیکاته نیز دارند که در تجزیه شیمیایی غایب هستند.

ترکیب شیمیایی سنگ کل سنگهای دگرگونی می تواند نماینده ترکیب شیمیایی سنگ مادر آنها باشد. نتایج آنالیز شیمیایی سنگ کل نمونههای مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود CaO مهمترین اکسید در این نمونهها بوده و پس از مشاهده می شود CaO مهمترین اکسید در این نمونهها بوده و پس از آن MgO و SiO2 قرار می گیرند. جهت تعیین سنگمادر این نمونهها از نمودار ACF ی SiO2 + K<sub>2</sub>O), C= CaO این مولکولی] از نمودار ACF (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O), F= MgO + MnO + FeOt

جدول ۱- تجزیه شیمیایی نمونههای سنگی مرمر دولومیتی. نمونههای سنگی با درجه دگرگونی قوی تر در سمت چپ نشان داده شدهاند. Tabe 1. Compositions of the dolomitic marble samples. Samples of higher metamorphic grades are in the left part.

Oxide	Sample ID / Detect	AF-57	AF-59	AF-111	AF-62	AF-71
	Linnit	High grade				Low grada
	W1.%	High grade				Low grade
$SiO_2$	0.04	4.04	3.76	3.35	4.38	5.03
$Al_2O_3$	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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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
$K_2O$	0.01	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.06	0.07	0.07	0.05	0.08
$P_2O_5$	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

شرایط دگرگونی مرمرهای دولومیتی مجموعه دگرگونی قوری، پهنه ...

فضلنيا و ميري



شکل ۵- نمودارهای مثلثی جهت تعیین سنگمادر نمونههای مورد بررسی. a) نمودار مثلثی Barton et al. 2018; Winter, 2014) ACF). نمونههای مورد مطالعه در محدوده سنگهای کربناته ترسیم شدهاند. b) نمودار مثلثی Bucher and Grapes, 2011) SiO<sub>2</sub>-CaO-MgO). نمونههای مورد مطالعه در محدوده سنگهای مرمر دولومیتی قرار می گیرند.

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 SiO<sub>2</sub>-CaO-MgO diagram (Bucher and Grapes, 2011). The samples plot in the dolomitic marble field.

# 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 Connolly, 2005) Perplex) نسخه 7.01.0 و پایگاه داده hp62ver.dat منتشر شده در سال ۲۰۲۳ محاسبه شدند. پایگاه داده hp62ver.dat منتشر شده در سال ۲۰۲۳ محاسبه شدند. و سیستم شیمیایی نمونه AF-57 که دارای بالاترین مقدار منیزیم است (CaO-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O) CFMASH و رمحت فراهم گردد. و سیستم شیمیایی امکان رخداد بیشترین تعداد فاز ممکن فراهم گردد. به کار برده شد تا امکان رخداد بیشترین تعداد فاز ممکن فراهم گردد. و با نسبت ۱۰–۹۰ لحاظ شد، چرا که مقادیر بالاتر OD تاثیری در به دلیل حضور کربنات کلسیم در محیط، ترکیب سیال به Augite(G) برای آمفیبول (Gt(W) و Gt(W) و Gt(W) و Gt(JH) برای گارنت (Jennings and Holland).

# نمودار فازی دما-فشار

این نمودار بر اساس تغییرات دما از ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد و فشار ۱۵. تا ۱۰ کیلوبار 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 می-باشد. 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 d). در ادامه واکنشهای دگرگونی پیشرونده فاز 1M، در دمای حدود ۶۲۰ درجه سانتی گراد و فشار بالاتر از ۵ کیلوبار، کلینوپیروکسن و گارنت نیز به این سنگها اضافه شدهان

Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-04-29

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 می گذارند. در این بخشها گسلهای تراستی غایب

هستند و به نظر می سد که رخنمون بخشهای عمیق دگرگونی به

آرامی و در نتیجه فرسایش سنگ پوش 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  $e^{-4}$  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

(شکل b-۳). نخستین رخداد الیوین در این نمودار، در دمای حدود ۶۵۰ درجه سانتی گراد و فشار حدود ۶ کیلوبار می باشد. بررسی های صورت گرفته بر روی دگرگونی منطقه قوری ( ;Fazlnia et al., 2009 Fazlnia, 2017; Miri and Fazlnia, 2024) نشان دادهاند که شرایط اوج دگرگونی ناحیهای در این منطقه دمای حدود ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد 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 ۲۰۰ درجه سانتی گراد)، دگر گونی فاز M2 در نتیجه نفوذ توده-های 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 کانیایی کلینوپیروکسن + الیوین در این سنگهاست (شکل ۴-c و b). 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 آنتگوریت رخ میدهند (شکل f-۴). بر اساس این مسیرها، می توان استنباط نمود که بالا

است (شكل ۶).



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: کلینوپیروکسن، Dol: دولومیت، Grt: گارنت، Ol: الیوین، Sud: سودوئیت، Gh: گاهنیت (Whithney 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).

Perplex نرمافزار 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 جهت نشان دادن گردهمایی کانیها در یک دما و فشار خاص به کار برده می شوند. بر اساس اینکه از کدام اکسیدها در این نمودارها استفاده شده باشد، اسامی مختلفی مورد استفاده قرار می گیرد. در اینجا به منظور نشان دادن گردهمایی کانیایی کالک-سیلیکات، نمودارهای SCM (SiO2-CaO-MgO) و ACF (-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-

نمودارهای سه تا یی



شکل ۲- نمودارهای سهتایی SCM و ACF محاسبه شده برای دما و فشارهای مختلف در طی دگرگونی مرمرهای دولومیتی مجموعه قوری. .Fig. 7. The SCM and ACF diagrams calculated for the various P and T during metamorphism of the Qori complex dolomitic marbles.

# نمودار T-XCO<sub>2</sub>

در دگرگونی متاکربناتها، ترکیب شیمیایی سیال دگرگونی همواره عامل مهم محسوب می شود. ترکیب سیال در چنین سنگهایی از آب و کربندی اکسید (شکل ۵-۵) تشکیل شده است که تغییرات در نسبت این دو سازنده می تواند سبب تغییر آشکار در گردهمایی های کانی ها گردد. به منظور بررسی این موضوع، نمودار 2CO2 می از متغیرها در این نمودار 2CO می باشد، به ناچار باید فشار ثابت در نظر گرفته شود. با توجه به شرایط اوج دگرگونی که در بالا به آن اشاره گردید، فشار ۸

کیلوبار در محاسبه این نمودار به کار گرفته شد. محدوده مربوط به گردهمایی کانیایی متعادل اوج دگرگونی (M1) با خطچین قرمز رنگ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود، پایداری این محدوده در محتوای CO<sub>2</sub> بالاتر از ۴ درصد رخ میدهد. گردهمایی کلینوپیروکسن + الیوین که در دگرگونی M2، شکل گرفته و بعلاوه، الیوین + آنتیگوریت در مقادیر CO<sub>2</sub> کمتر نیز پایدار است؛ به بیان دیگر میتوان نتیجه گرفت که در واپسین مراحل دگرگونی، ترکیب سیال تقریباً اشباع از آب بوده و مقادیر CO<sub>2</sub> بر گردهمایی کانیها بیتاثیر بوده است.



شکل ۸- نمودار فازی T-XCO<sub>2</sub> محاسبه شده برای نمونه AF-57.

### نمودار T-MgO/CaO

عامل دیگری که میتواند در رخداد کانیهای مختلف در طی دگرگونی مرمرهای 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 فازی 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

Fig. 8. T-XCO<sub>2</sub> phase diagram calculated for the AF-57 sample. آمده نشان می دهد که رخداد مجموعههای دگرگونی الیوین و دولومیت دار که در بالاترین حد دمایی شکل گرفته اند نیاز به نسبت MgO/CaO حداقل ۱/۰ می باشد. منحنی خطچین قرمز در شکل ۹ این محدوده ها را مشخص می کند. از سوی دیگر، رخداد آنتیگوریت نیز نیازمند مقادیر MgO/CaO حدود ۷/۰ است. نسبت های نیز نیازمند مقادیر MgO/CaO حدود ۷/۰ است. نسبت های نیز نیازمند مقادیر MgO/CaO حدود ۲/۰ است. نسبت های نیز نیازمند مقادیر مورد مطالعه (۳۲/۰ تا ۱۹۶۷) با نتایج این نمودار هم خوانی مناسبی دارند. به عبارت دیگر، محتوای مناسب منیزیم در سنگ مادر این مرمرهای دولومیتی امکان تشکیل گردهمایی های کانی شناسی یافت شده در آنها را فراهم ساخته است.





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 2018; Shakerardakani et al., 2022; Jafari et al., 2023; Miri 2024; Dehghan Nayeri et al., 2024 adllalı lısi şçeam&رli، در بخش جنوبی این زون، حداکثر دما و فشار دگرگونی به ترتیب ۶۵۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی گراد و ۲ 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 سنندج-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 زمينساختى

دگرگونی بارووین (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 سنندج-سیرجان جنوبی با انواع Fazlnia et al., 2009; Rahmati

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 جنوبي پهنه سنندج-سيرجان ( 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 كمان قارهاي، فعال بوده است. آنها نشان دادند كه آغاز فرورانش آن به زیر ایران مرکزی در بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان قبل از ژوراسیک رخ داده است که سبب ماگماتیسم نفوذی قابل توجهی در این بخش از این پهنه طی ژوراسیک و کرتاسه گشته است. بسیاری از شواهد ماگماتیسم 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 ماگماتیسم کافتی ژوراسیک در ارتباط باشد، مانند ماگماتسیم آلکالن (تراکیت، فنولیت، تفریت، بازانیت، نفلینیت و ...)، کربناتیتها، ماگماهای پتاسیک تحت اشباع از سیلیس، لامپروفیرهای اولترامافیک و ماگماتیسم با توزیع دوگانه (Gill, 2010; Hutchison et al., 2018)، قابل مشاهده نیستند. بارزترین شاهد ماگماتیسم ریفتی، گردهمایی همزمان ماگماتیسم 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 بارووین نامیده می شود نمی تواند با گردهمایی سنگ شناسی مخصوص پهنه های ریفتی درون قارهای همزمان رخ دهد. بنابراین دو واقعه رشد دگر گونی در قوری با سیستم ریفتی همخوانی ندارد.

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

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

# نتيجهگيرى

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 بارووین، در نتیجه فرورانش نئوتتیس به زیر ایران مرکزی در پهنه سنندج-سیرجان جنوبی در طول ژوراسیک یکی در ۱۸۷ و دیگری در ۱۴۷میلیون 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 شرایط اوج دگرگونی تشکیل شدند. رویداد رشد دگرگونی مرحله دوم ارا) الیوین + کلسیت + دولومیت باعث ایجاد گردهمایی کانیایی فشار سریع با دمای تقریباً ثابت و (۲) آنتیگوریت + ترمولیت + کلینوپیروکسن + الیوین + کلسیت + دولومیت در نتیجه کاهش مشار سریع با دمای تقریباً ثابت و رکا آنتیگوریت با ترمولیت با مشار میروکسن بالیوین باکلسیت با دولومیت در نتیجه کاهش مرایخ مقیاس، گردهمایی کانیایی برگشتی اولی و رخنمون یافتن به سطح آرام، دومین گردهمایی کانیایی برگشتی را باعث گردید.

#### 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 foldthrust 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., Esmaeily, 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 clinoamphiboles in Na2O–CaO–FeO–MgO–Al2O3–SiO2–H2O–O for petrological calculations. Journal of Metamorphic Geology 23(8), 771–791.
- Dehghan Nayeri, F., Nasrabady, M., Jamshidibadr, 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 metaultramafic 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. Lithos178, 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<sup>-</sup>tzow-Holm Complex, East Antarctica, with special reference to the mineralogy and geochemical characteristics of calc-silicate mega-boudins from Rundva<sup>o</sup>gshetta. Polar Geosciences, 19, 37–61.
- Shabanian, 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-l., 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 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
- 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.