

Research Article

## Investigating the progressive dynamothermal metamorphic evolution of metabasites from the Qori complex (NE Neyriz) using phase diagrams

Mirmohammad Miri<sup>1\*</sup>, Abdolnaser Fazlnia<sup>2</sup>

1- Geology department, Faculty of earth sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz

2- Department of Geology, Urmia University, 57153-165, Urmia

**Keywords:** *Metabasic, Phase diagram, Qori complex, Neyriz, Sanandaj-Sirjan*

### 1- Introduction

The study area belongs to the SE part of the Sanandaj-Sirjan zone (SaSZ) in Iran, a long (approximately 1200 km) narrow zone primarily comprising regional metamorphic rocks intruded by Mesozoic plutonic rocks (Stöcklin, 1968; Hassanzadeh and Wernicke, 2016). The Qori complex mainly consists of basic rocks, metacarbonate, metabasites, and metapelites formed during metamorphic events associated with the subduction of the Neotethys oceanic crust beneath the Iranian micro-plate during the Jurassic period (Fazlnia et al., 2009; Sheikholeslami, 2015). The complex has endured at least two regional metamorphic events: (1) Barrovian-type metamorphism at 187 to 180 Ma, contemporaneous with orogeny related to the thickening of the continental crust, and (2) a high T-moderate P event at approximately 147 Ma associated with subduction at the active continental margin of the Sanandaj-Sirjan zone (Sheikholeslami et al., 2008; Fazlnia et al., 2009).

In this research, we investigate the metamorphic evolution of the Qori complex by calculating thermodynamic phase diagrams. This study aims to complement previous research and provide researchers with a broader understanding of the thermodynamic conditions of the metamorphic events related to the tectonic evolution of the southern SaSZ.

### 2- Material and methods

Fifty metabasic samples from the Qori metamorphic complex were systematically collected and studied using a polarizing microscope. Five fresh samples were selected for whole-rock geochemistry analysis. The samples were analyzed using a Philips PW1480 X-ray fluorescence (XRF) instrument at the laboratory of Kiel University, Germany. The results are available in Table 1.

### 3- Results and discussions

#### 3-1- Petrography

The samples exhibit a nematoblastic texture partly replaced by a granoblastic texture with increasing metamorphic grade. The assemblage hornblende + plagioclase + garnet + clinopyroxene + quartz + titanite represents the peak metamorphic condition (lower granulite facies) in the studied metabasites. Conversely, the assemblage actinolite + zoisite + plagioclase + chlorite + epidote + quartz + titanite represents the lower limit of metamorphic conditions (green schist facies). In intermediate conditions (amphibolite facies), the assemblage hornblende + actinolite + garnet + plagioclase + quartz formed.

#### 3-2- Geochemistry

Low SiO<sub>2</sub> (46 to 50 wt%), moderate Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (14 to 17 wt%), and high FeO<sub>t</sub> (10 to 13 wt%), CaO (8 to 12 wt%) and MgO (3 to 11 wt%) of the samples are consistent with a basic igneous protolith (Fig. 4).

#### 3-3- Phase diagram modelling

A pseudosection phase diagram was calculated by Theriak/Domino software (de Capitani, 2010) version 2018 for the AF-71 sample in the NCFMASHO (Na<sub>2</sub>O-CaO-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-O<sub>2</sub>) chemical

\* Corresponding author: M.miri@scu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2024.44786.2403

Received: 2023-09-18

Accepted: 2024-02-13

system (Fig. 5). Solid solution models include GARNET (White et al., 2007) for garnet, CHLR (Holland et al., 1998) for chlorite, OMPH for clinopyroxene (Green et al., 2007), OPX for orthopyroxene (White et al., 2002) and LIQtC (White et al. 2007) for the melt. The fluid was considered as pure water and excess in the calculations. The diagram show that the peak P-T assemblage is stable at 640 to 750 C° and 6.5 to 10 kbar. In higher P-T, partial melting occurs and form the migmatites that is consistent with results of Fazlnia et al. (2017).

A temperature versus Mg# (MgO/MgO+FeO) phase diagram (T-Mg#) in 7 kbar pressure (Fig. 7) indicates that the assemblage plagioclase + garnet + clinopyroxene + amphibole is stable in Mg# values range 0.01-0.5, which is consistent with the Mg# of the samples (0.2 – 0.5). Moreover, a temperature versus water activity (T-aH<sub>2</sub>O) phase diagram in constant pressure of 7 kbar (Fig. 8) reveals that the assemblage plagioclase + garnet + clinopyroxene + amphibole requires more water activity for stability in higher temperatures. At temperatures 640 to 750 C° (the peak condition), water activity passes 0.4, showing that CO<sub>2</sub> could also be effective in the formation of the mineral assemblage in peak metamorphic conditions in the Qori complex.

#### 4- Conclusion

The results of the present study are summarized as follow:

- The metabasites of the Qori metamorphic complex have different mineral assemblages representing metamorphism from the upper green schist facies to the lower granulite facies.
- In the peak of metamorphism (granulite facies), the assemblage hornblende + plagioclase + garnet + clinopyroxene + quartz + titanite minerals formed.
- The chemical compositions of these rocks show that they formed form metamorphism of a basic rock with a higher FeO content than MgO that is characteristics for ocean floor tholeiitic basalts.
- The calculated phase pseudosections a sample indicates that the peak condition obtained at 640 to 750 C° and 6.5 to 10 kbar, consistent with results of the other studies in the area.
- According to the other calculated phase diagrams (Mg# – T and aH<sub>2</sub>O – T), the high FeO content of the protolith and low CO<sub>2</sub> content of the metamorphic fluid were influential in the formation and stability of the granulite facies assemblage.

#### 5- References

- de Capitani, C., Petrakakis, K., 2010. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. *American Mineralogist* 95, 1006-1016. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3354>
- Fazlnia, A., 2017. Geochemical characteristics and conditions of formation of the Chah-Bazargan peraluminous granitic patches, ShahrBabak, Iran. *Geologica Carpathica* 68, 5, 445-463. <https://doi.org/10.1515/geoca-2017-0029>
- Fazlnia, A., Schenk, V., van der Straaten, F., Mirmohammadi, M., 2009. Petrology, geochemistry, and geochronology of trondhjemites from the Qori Complex, Neyriz, Iran. *Lithos* 112, 413-433. <https://10.1016/j.lithos.2009.03.047>
- Green, E., Holland, T., Powell, R., 2007. An order-disorder model for omphacitic pyroxenes in the system jadeite-diopside-hedenbergite-acmite, with applications to eclogitic rocks. *American Mineralogist* 92, 1181-1189. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2401>
- Hassanzadeh, J., Wernicke, B., 2016. The Neotethyan Sanadaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. *Tectonics* 35, 586-621. <https://doi.org/10.1002/2015TC003926>.
- Holland, T., Baker, J., Powell, R., 1998. Mixing properties and activity-composition relationships of chlorites in the system MgO-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *European Journal of Mineralogy* 116, 395-406. <https://doi.org/10.1127/ejm/10/3/0395>
- Sheikholeslami, M.R., 2015. Deformations of Palaeozoic and Mesozoic rocks in southern Sirjan, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 106. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.03.007>

- Sheikholeslami, M.R., Pique, A., Mobayen, P., Sabzehei, M., Bellon, H., Emami, M.H., 2008. Tectono-metamorphic evolution of the Neyriz metamorphic complex, Qori-Kor-e-Sefid area (Sanandaj-Sirjan Zone, SW Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 31, 504-521. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.07.004>
- Stöcklin, J., Nabavi, M.H., 1973. Tectonic Map of Iran, Geological Survey of Iran, Teheran.
- White, R.W., Powell, R., Clarke, G.L., 2002. The interpretation of reaction textures in Fe-rich metapelitic granulites of the Musgrave Block, central Australia: constraints from mineral equilibria calculations in the system  $K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-Fe_2O_3$ . *Journal of metamorphic Geology* 20, 41-55. <https://doi.org/10.1046/j.0263-4929.2001.00349.x>
- White, R.W., Powell, R., Holland, T.J.B., 2007. Progress relating to calculation of partial melting equilibria for metapelites. *Journal of metamorphic Geology* 25, 511-527. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00711.x>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Miri, M., Falznia, A., 2024. Investigating the progressive dynamothermal metamorphic evolution of metabasites from the Qori complex (NE Neyriz) using phase diagrams. *Adv. Appl. Geol.* 13(4), 1176-1192.

DOI: 10.22055/AAG.2024.44786.2403

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_18940.html](https://aag.scu.ac.ir/article_18940.html)

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

## بررسی تحولات دگرگونی دیناموترمال پیشرونده در متابازیت‌های مجموعه قوری (شمال شرق نیریز) با استفاده از نمودارهای فازی

میرمحمد میری\*

دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

عبدالناصر فضل‌نیا

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه ارومیه، ۱۶۵-۵۷۱۵۳/ارومیه، ایران

\*M.miri@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴

### چکیده

مجموعه دگرگونی قوری در شمال شرق نیریز (پهنه سنندج-سیرجان) تحت تاثیر فازهای دگرگونی مختلفی در طی ژوراسیک تا کرتاسه و در نتیجه فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر خرده‌صفحه ایران شکل گرفته است. ترکیب شیمیایی سنگ کل، آشکار ساخت که برخی از واحدهای این مجموعه از دگرگونی سنگ‌مادرهای با ترکیب بازیک تشکیل شده‌اند. بررسی‌های سنگ نگاری نشان دادند که متابازیت‌ها در پائین‌ترین حد دگرگونی (رخساره شیبست سبز) محتوی گردهمایی کانی‌های اکتینولیت + زوئیزیت + پلاژیوکلاز + کلریت + اپیدوت + کوارتز ± تیتانیت بوده که در شرایط اوج دگرگونی (رخساره گرانولیت پائینی) با گردهمایی هورنبلند + پلاژیوکلاز + گارنت + کلینوپیروکسن + کوارتز ± تیتانیت جایگزین شده است. بر اساس نمودارهای ترمودینامیکی فازی (سودوسکشن) محاسبه شده برای این سنگ‌ها، دگرگونی رخساره شیبست سبز در دمای کمتر از ۵۵۰ درجه سانتیگراد و فشار پائین‌تر از ۵ کیلوبار و اوج دگرگونی در شرایط دما و فشار ۶۴۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد و ۶/۵ تا ۱۰ کیلوبار رخ داده‌اند. سایر نمودارهای فازی نشان می‌دهند که محتوای پائین منیزیم در سنگ مادر و کربن‌دی‌اکسید در سیال دگرگونی، نقش مهمی در شکل‌گیری و پایداری گردهمایی‌های دگرگونی مشاهده شده در متابازیت‌های مجموعه دگرگونی قوری داشته‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** متابازیت، نمودار فازی، مجموعه دگرگونی قوری، نیریز، سنندج-سیرجان

### ۱- مقدمه

ادامه دارد. محدوده مورد مطالعه از نظر تقسیمات کشوری مابین شهرستان نیریز استان فارس و شهرستان شهربابک استان کرمان و در ۷۵ کیلومتری شمال شرق شهر نیریز و ۵۰ کیلومتری جنوب غرب شهر بابک قرار دارد (شکل ۱). بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران (Stöcklin, 1973)، متابازیت‌های مجموعه قوری در نزدیکی سیرجان و درون بخش جنوب شرقی پهنه سنندج-سیرجان رخمون دارد (شکل ۱). این مجموعه عمدتاً متشکل از سنگ‌های بازیک، آهکی و رسی دگرگون شده می‌باشد که طی رویدادهای مختلف دگرگونی در ارتباط با فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر صفحه ایران در ژوراسیک تکامل پیدا کرده اند (Fazlnia et al. 2009; Sheikholeslami 2015). این مجموعه توسط دو رخداد

سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای، سرتاسر ایران پراکنده هستند و شامل انواع دگرگونی کوهزایی مرتبط با فرورانش و مجاورتی (تماسی و گرمایی) می‌شود (Berberian and King, 1981). بیشترین رخمون‌های دگرگونی کوهزایی در پهنه سنندج-سیرجان در نتیجه عملکرد گسل‌های تراستی یا معکوس به صورت تکه‌های منظم یا درهم‌ریخته قابل مشاهده هستند (Sheikholeslami 2015 Alavi, 1994;). این پهنه ساختاری در نتیجه کوهزایی زاگرس بین پهنه ماگمایی ارومیه-دختر و کمربند چین خورده زاگرس از شمال غرب در نزدیکی افیولیت‌های خوی شروع و تا جنوب شرق در نزدیکی سیرجان

دگرگونی ناحیه‌ای تکامل یافته است (Fazlnia, et al. 2009). رخداد اول، دگرگونی ناحیه‌ای و دگرشکلی همزمان با کوهزایی است که در حدود ۱۸۷ تا ۱۸۰ میلیون سال پیش اتفاق افتاده است. بر اساس یافته‌های محققان مختلف همچون (Sheikholeslami et al., 2008; Fazlnia et al., 2009, ) (2013) این رخداد بر اثر ضخیم‌شدگی پوسته قاره‌ای توسعه یافته و منجر به دگرگونی و دگرشکلی در حد فشار و دما متوسط سری باروین گردیده است. رخداد دگرگونی دوم در زمان حدود ۱۴۷ میلیون سال پیش در ارتباط با کمان قاره‌ای فعال پهنه سندانج- سیرجان جنوبی رخ داده است (Sheikholeslami et al. 2009; Fazlnia et al., 2009). شرایط دگرگونی بخش‌های مختلف این مجموعه از طریق شیمی کانی‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند (مانند Fazlnia et al. 2009; Sheikholeslami et al. 2015; Fazlnia 2017).

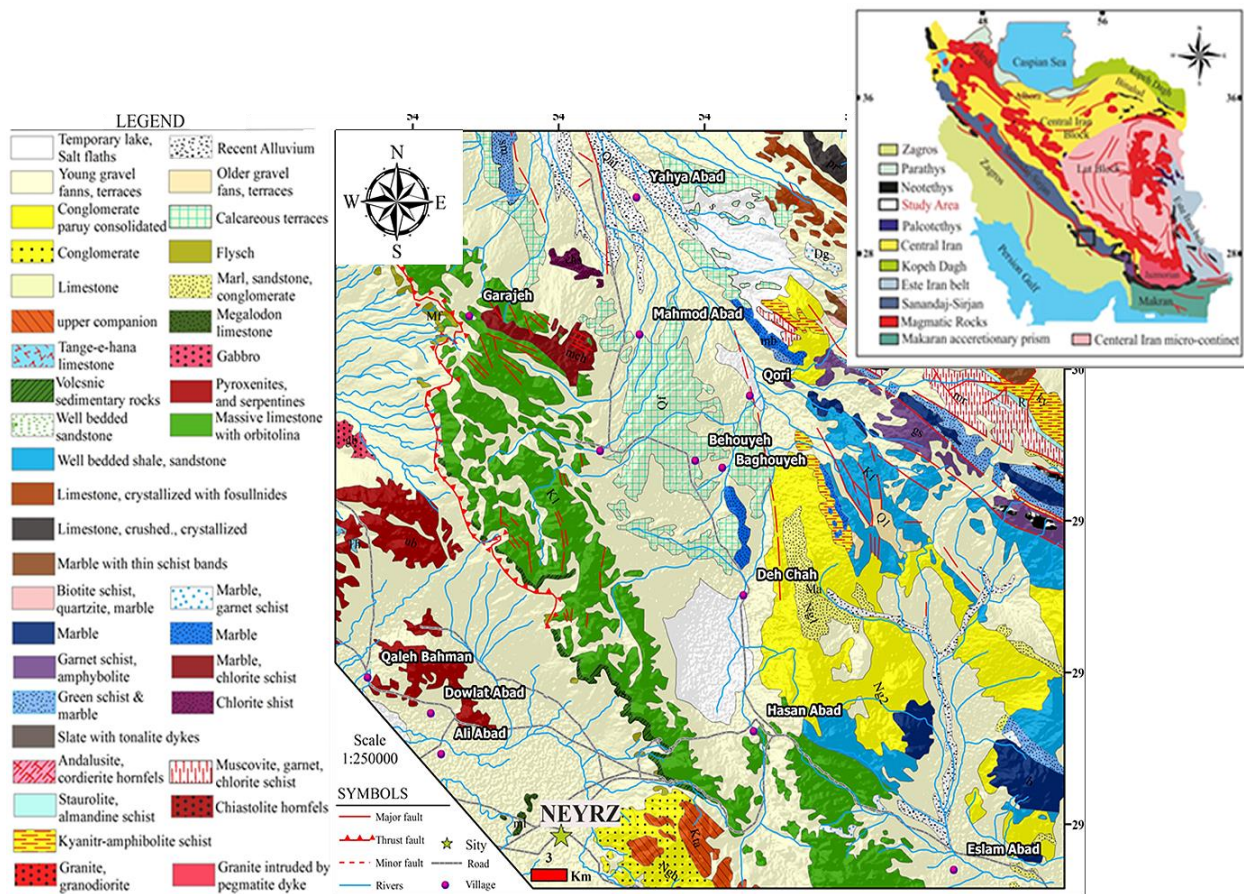
سنگ‌های متابازیت می‌توانند تحولات پیچیده دگرگونی را با توجه به مشخصات سنگ‌شناسی، تکتونیک منطقه و وقایع تغییرات دما نشان دهند. حل این پیچیدگی‌ها می‌تواند منجر به شناسایی نحوه رشد در فازهای مختلف ترمودینامیکی گردد؛ بطوریکه می‌تواند به ابهامات در نحوه تغییرات در وقایع دمایی پاسخ دهد. در پژوهش پیش‌رو، سعی شده است که تحول دگرگونی متابازیت‌های مجموعه قوری توسط محاسبه نمودارهای فازی ترمودینامیکی سنجیده و بررسی شود. این تحقیق می‌تواند باعث افزایش دقت مطالعات قبلی شده و به پژوهشگران دیدی وسیع‌تر از شرایط ترمودینامیکی وقایع دگرگونی کوهزایی پیش‌رونده مرتبط با تکامل تکتونیک پهنه سندانج- سیرجان جنوبی را ارائه نماید.

## ۲- زمین شناسی

متابازیت‌های قوری بخشی از مجموعه دگرگونی شمال شرق نیریز می‌باشد. رخساره‌های سنگی مشاهده شده عمدتاً از نوع دگرگونی و مربوط به سنگ مادر با سن دونین و کربونیفر زیرین می‌باشد (Fazlnia et al. 2009; Sheikholeslami 2015). مهمترین واحدهای سنگی منطقه عبارتند از: (۱) دگرگونی‌های کوهزایی با سنگ مادر مربوط به دونین- کربونیفر (متاکربنات،

متابلیت و آمفیبولیت)، (۲) زون رادیولاریت‌های پیچگان به سن تریاس، (۳) پیکره الترامافیک- گابرویی به سن ژوراسیک، (۴) اسکارنها و مرمراه‌های تنگ حنا (سن‌سنجی نشده)، (۵) سازند ساچون به سن کرتاسه بالایی شامل آهک‌های مارنی، ماسه-سنگ‌ها و کنگلومراهای قرمز رنگ و ژیبس، (۶) سازند جهرم به سن پالئوسن متشکل از آهک‌های سیلیسی، دولومیتی و مارنی، (۷) زون‌های فلیشی ترشیر به سن ائوسن - الیگوسن (Sabzei et al., 1992; Sheikholeslami et al., 2003, 2008, 2015; Fazlnia et al., 2009; 2017). سنگ‌های دگرگونی به وسیله تکه‌هایی از رخنمون‌های سنگی (عمدتاً آهکی) با سن ژوراسیک پایانی تا الیگوسن پوشانده شده است. در برخی مناطق عملکرد گسل‌های تراستی، معکوس و امتدادلغز باعث بهم-ریختگی همه تشکیلات سنگی در این منطقه شده است و تکه‌هایی از سنگ‌های دگرگونی مشابه مجموعه قوری، در کنار سنگ‌های جوانتر رخنمون یافته است.

Fazlnia (۲۰۰۹)، دگرگونی ناحیه‌ای مجموعه قوری را با استناد به رخداد سنگ‌های دگرگونی رخساره آمفیبولیت تا گرانولیت و دما و فشار به دست آمده از نوع باروین تعیین نموده است. مجموعه دگرگونی باروین قوری به طور کلی شامل متابازیت‌ها (اکتینولیت شایست تا گارنت آمفیبولیت) و مرمر می‌باشد که به همراه لایه‌های متاپسامیتی، متالترامافیکی (الیوین- ارتوپروکسن- اسپینل- هورنبلند شایست) و متابلیتی (بیوتیت تا گارنت- کیانیت- بیوتیت شایست) تحت دگرگونی درجه‌ی متوسط تا بالا قرار گرفته‌اند. تمامی انواع سنگی مانند مقاطع فلسی شکل موجود در افیولیت‌های نیریز به شدت خرد شده و چین خورده هستند (Berberian and King, 1981; Sheikholeslami et al., 2008; Fazlnia et al., 2009). بر اساس دما-فشارسنجی با استفاده از کانی‌های گارنت، هورنبلند و پلاژیوکلاز (Kohn and Spear, 1989; Holland and Blundy, 1994) اوج فشار و دمای مجموعه دگرگونی قوری  $9/2 \pm 11/2$  کیلوبار و  $705 \pm 40$  درجه سانتی گراد محاسبه شده است که ناشی از ضخیم‌شدگی پوسته‌ای در زمان کوهزایی سیمیرین پیشین در ۱۸۰ تا ۱۸۷ میلیون سال پیش بوده است (Fazlnia et al., 2007, 2009; Fazlnia, 2017).



شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه نیریز (برگرفته از Sabzehei et al., 1992)

Fig. 1. Geological map of the Neyriz area (after Sabzehei et al., 1992).

۷۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد و فشار کمتر از ۵ کیلوپا منجر به میگماتیسیته‌ی زایی در حاشیه توده نفوذی و قطعات فرو افتاده به داخل مذاب شده است (Fazlnia et al., 2023).

دومین رخداد دگرگونی ناحیه‌ای در حدود ۱۴۷ میلیون سال پیش، در ارتباط با فرورانش نئوتتیس به زیر کمان قاره‌ای فعال پهنه سنندج- سیرجان جنوبی رخ داده است (Fazlnia et al., 2007, 2009; Sheikholeslami et al., 2008). آغاز فرورانش اقیانوس نئوتتیس کمی قبل تر از این زمان، به زیر لبه پهنه دگرگونی سنندج- سیرجان در حوالی شرق نیریز، این نوع فرآیند را توسعه داده است و در طول رویداد دوم دگرگونی، واکنش‌های آبدگیری دگرگونی باعث ذوب بخشی در سنگ‌های دگرگونی لبه ی کمان فعال قاره ای

اولین رویداد دگرگونی در فواصل زمانی بین ۱۸۷ و ۱۸۰ میلیون سال پیش بر اثر ضخیم شدن پوسته قاره‌ای و همزمان با کوهزایی رخ داده است (Fazlnia et al., 2009). پس از این رویداد، عملکرد سیستم ریف‌ت در سرزمین گندوانا موجب توسعه ماگماتیسم غیر کوهزایی در شمال شرق نیریز گردیده است (Fazlnia et al., 2009). بر اثر این رویداد، باتولیت‌ناهمگن تله پهلوانی به داخل سنگ‌های نیمه رسی تا رسی دگرگون شده مجموعه قوری تزریق شده است. در نتیجه نفوذ توده گرانیتی تله پهلوانی به داخل سنگ‌های پلیتی دگرگون شده در رویداد اول، جریان حرارتی، باعث دگرگونی همبری شدید گردید و در حضور مقادیر آب کافی، ذوب بخشی در دمای

به روش XRF انتخاب گردیدند. تجزیه نمونه‌های سنگی در آزمایشگاه دانشگاه کیل (Kiel) کشور آلمان و توسط دستگاه Philips PW1480 صورت پذیرفتند. نتایج تجزیه شیمیایی در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

### ۵- سنگ‌نگاری

بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، گردهمایی‌های پاراژنزی مقابل قابل شناسایی هستند: (۱) اکتینولیت + زوئیزیت + پلاژیوکلاز + کلریت + اپیدوت + کوارتز  $\pm$  تیتانیت (رخساره شیست سبز)، (۲) هورنبلند + اکتینولیت + گارنت + پلاژیوکلاز + کوارتز (رخساره آمفیبولیت) و (۳) هورنبلند + گارنت + کلینوپیروکسن + پلاژیوکلاز (رخساره گرانولیت پائینی).

فابریک نمانوبلاستیک در نتیجه جهت‌گیری هورنبلندهای کشیده و سوزنی شکل در نمونه‌های درجه پائین و متوسط مشهود است (شکل a<sup>۳</sup> و b). با افزایش درجه دگرگونی و رخداد کانی‌های، دانه‌ها هم‌بعدتر شده و فابریک گرانوبلاستیک در نمونه‌ها پدیدار می‌گردد (شکل c<sup>۳</sup> و d). گارنت، درشت‌بلور اصلی در این سنگ‌هاست که فابریک پورفایروبلاستیک را ایجاد نموده است. در نمونه‌های درجه بالا، درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز نیز دیده می‌شود که معمولاً محتوی میانبرهای کوچک کوارتز هستند (شکل d<sup>۳</sup>). در برخی نقاط، در اثر واکنش بین آمفیبول و گارنت، فابریک کرونا متشکل از بلورهای ریز پلاژیوکلاز و کوارتز همراه با بلورهای ریز میله‌ای بیوتیت در اطراف گارنت توسعه یافته است (شکل f<sup>۳</sup>). حضور میانبرهای گارنت در پلاژیوکلازهای نمونه‌های رخساره گرانولیت پائینی (شکل d<sup>۳</sup>)، نشان می‌دهد که در شرایط اوج دگرگونی، پلاژیوکلاز از طریق واکنش‌های مصرف‌کننده گارنت (بخش بحث، واکنش ۳)، در این سنگ‌ها توسعه یافته است. کلینوپیروکسن به صورت دانه‌های بی‌شکل و در نمونه‌های با بالاترین درجه دگرگونی دیده می‌شود (شکل c<sup>۳</sup>). رخداد این کانی نماینده شرایط گذر از رخساره آمفیبولیت به رخساره گرانولیت است.

شده است (Fazlnia et al., 2007). در ادامه این وقایع و در طول بسته شدن نئوتتیس پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان دگرشکلی برشی را تحمل نموده (Mohajel et al, 2003; Golonka, 2004; Hassanzadeh and Wernicke, 2016) و ماگماتیسیم در پهنه ارومیه-دختر در طول سنوزوئیک این پهنه را توسعه داده است (Berberian and King, 1981; Shahabpour, 2005).

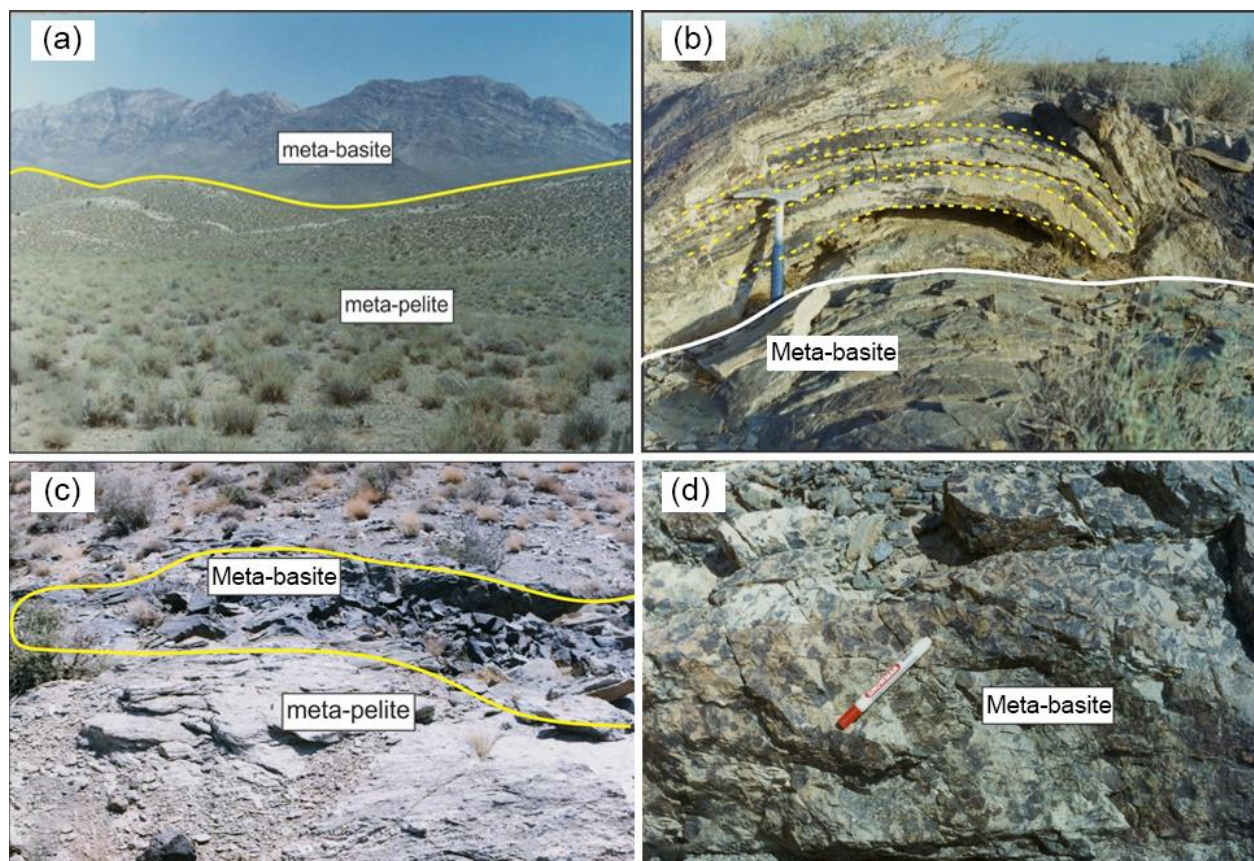
### ۳- بررسی‌های صحرایی

دگرگونی‌های ناحیه‌ای شمال شرق نیریز تناوبی درهم‌تنیده از انواع سنگ‌های متاپلیتی، متابازیتی، متاپسامیتی، کالک-سیلیکات و متاولترامافیک است. فرآیندهای دگرشکلی و چین‌خوردگی، تمام این واحدها را تحت تاثیر قرار داده. گسل-خوردگی موجب به هم‌ریختگی و درهم‌تنیدگی لیتولوژی‌های دگرگونی با درجات مختلف گردیده است. (شکل ۲). در بسیاری از نقاط، تناوبی از سنگ‌های متاپلیتی و متابازیتی (شکل ۲) که به طور موضعی دچار دارای درجه دگرگونی درجه بالای گشته‌اند، مشاهده می‌شوند.

متابازیت‌های مجموعه قوری رنگ تیره داشته و حاوی بلورهای ریز تا درشت گارنت می‌باشند (شکل ۲ و ۳). این سنگ‌ها در مناطقی با درجه دگرگونی پایین دارای برگوارگی کامل هستند (شکل b<sup>۲</sup>). اما در مناطقی با درجه دگرگونی بالاتر برگوارگی آن‌ها از بین رفته و ساخت گرانوبلاستیک نشان می‌دهند (شکل d<sup>۲</sup>). برخی از آمفیبولیت‌ها نوارهای تیره و روشن دارند که نوارهای تیره غنی از هورنبلند و گارنت و نوارهای روشن غنی از فلدسپار و کوارتز می‌باشند.

### ۴- مواد و روش‌ها

در طی عملیات‌های صحرایی صورت گرفته در منطقه، تعداد ۵۰ نمونه از سنگ‌های متابازیتی مجموعه دگرگونی قوری به صورت منظم برداشت و جهت انجام بررسی‌های سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی انتخاب شدند. پس از بررسی مقاطع نازک نمونه‌ها، تعداد ۵ نمونه جهت تجزیه شیمیایی سنگ کل



شکل ۲- تصاویر صحرایی از رخنمون‌های تناوب متاپلیت و متابازیت در مجموعه قوری. (a) نمای کلی از متابازیت‌ها که بر روی متاپلیت‌ها قرار گرفته‌اند، (b) چین خوردگی و ایجاد برگوارگی در بخش‌هایی از مجموعه (c) میان لایه متابازیت در متاپلیت‌ها و (d) ساخت گرانوبلاستیک در متابازیت‌های مورد بررسی.

Fig. 2. Field photographs of the alternative meta-pelites and meta-basites from the Qori complex. (a) Overall view of meta-basites overlies the meta-pelites, (b) Folding in some parts of the complex, (c) Meta-basite interlayers in the meta-pelites, (d) Granoblastic structure in the meta-basites.

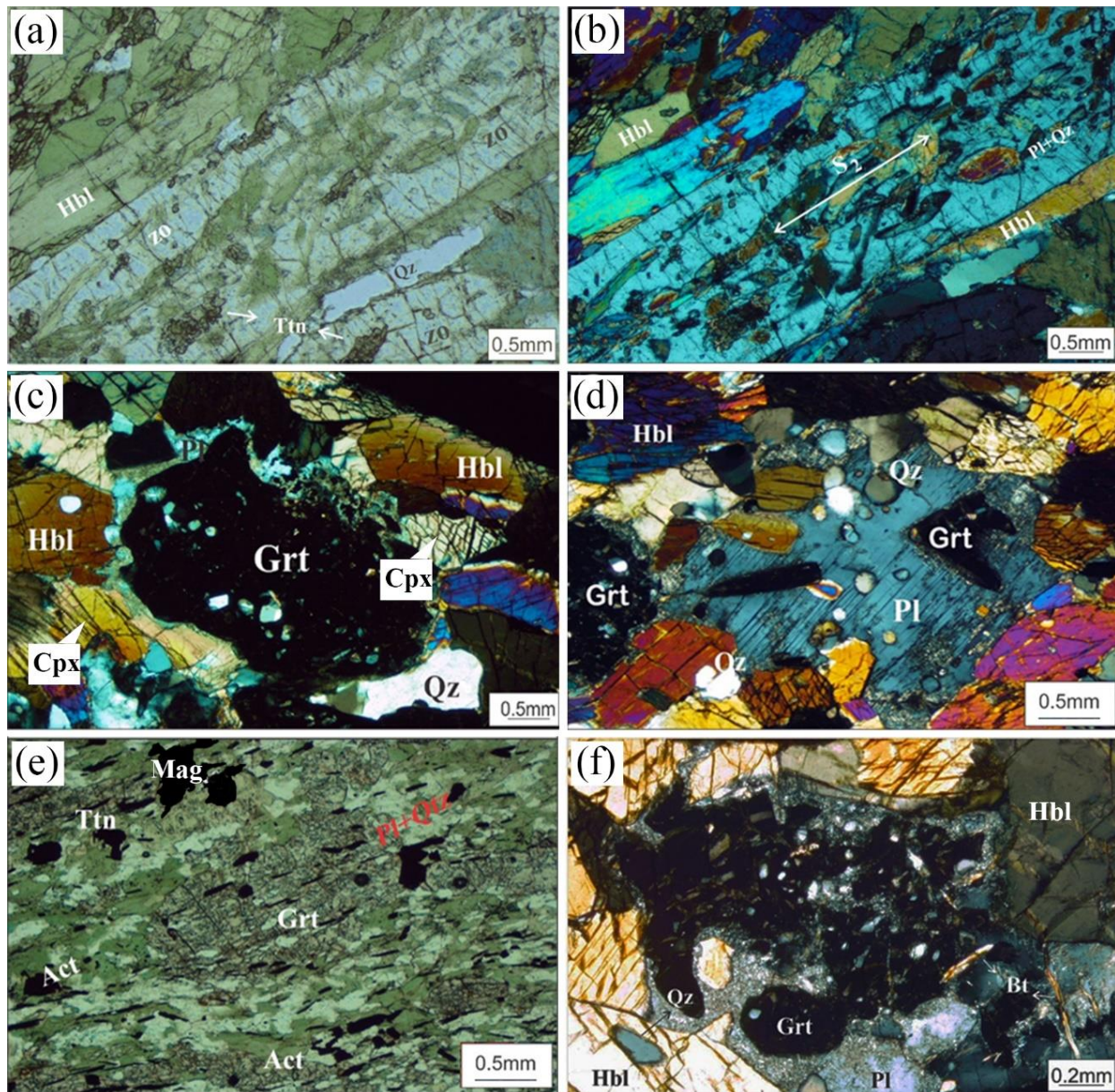
FeO (۱۰ تا ۱۳ درصد وزنی)، CaO (۸ تا ۱۲ درصد وزنی)، MgO (۳ تا ۱۱ درصد وزنی) و Na<sub>2</sub>O (۱/۷ تا ۳ درصد وزنی) قرار می‌گیرند (جدول ۱). ترکیب شیمیایی نمونه‌ها با یک سنگ مادر آذرین بازیک سازگاری دارد. ترسیم ژئوشیمیایی این سنگ‌ها در نمودارهای توصیفی (شکل ۴) نیز قابل مشاهده است که در آن نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده سنگ‌های بازیک قرار می‌گیرند.

## ۶- بحث

### ۶-۱- ژئوشیمی

نتایج آنالیزهای شیمیایی نمونه‌های مورد بررسی در منطقه قوری در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در بین اکسیدهای اصلی متابازیت‌های مجموعه دگرگونی قوری SiO<sub>2</sub> فراوان‌ترین اکسید در این نمونه‌ها است که مقدار آن از ۴۶ تا ۵۰ درصد وزنی تغییر می‌کند. پس از Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (۱۴ تا ۱۷ درصد وزنی)،



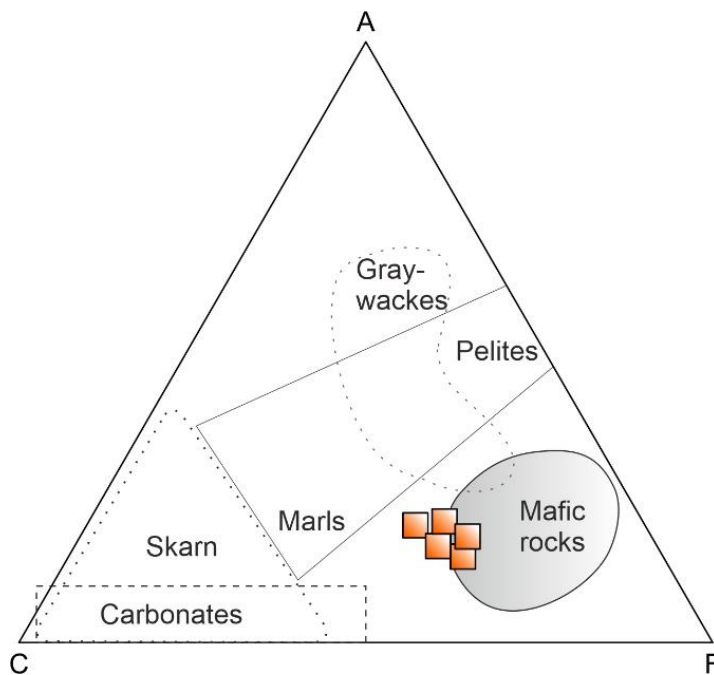


شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی متابازیت‌های مجموعه دگرگونی قوری. (a) و (b) فابریک نematoblastیک در نتیجه جهت‌گیری بلورهای هورنبلند، (c) و (d) فابریک گرانوبلاستیک و پوئیکیلوبلاستیک در نمونه‌های درجه بالا، (e) گردهمایی کانیاپی اکتینولیت + گارنت در نمونه‌های رخساره آمفیبولیت و (f) تشکیل فابریک کرونا در نتیجه واکنش بین هورنبلند و گارنت. علائم اختصاری کانی‌ها: Act: اکتینولیت، Cpx: کلینوپیروکسن، Hbl: هورنبلند، Grt: گارنت، Mag: مگنتیت، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، Ttn: تیتانیت، Zo: زوئیزیت (Whitney and Evans, 2010).

Fig. 3. Photomicrographs of meta-basites from the Qori metamorphic complex. (a) and (b) Nematoblastic fabric resulted from the orientation of the hornblende crystals, (c) and (d) Granoblastic fabric in the high-grade samples, (e) The mineral assemblage actinolite + garnet in the amphibolite facies samples, and (f) Formation of corona fabric due to reaction between the hornblendes and garnets. Mineral abbreviations are Act: actinolite, Cpx: clinopyroxene, Hbl: hornblende, Grt: garnet, Mag: magnetite, Qz: quartz, Ttn: titanite, Zo: zoisite (Whitney and Evans, 2010).

جدول ۱- ترکیب شیمیایی نمونه‌های متابازیت مجموعه دگرگونی قوری  
Table 1. Chemical compositions of metabasites from the Qori complex

Sample No.	AF-X-17	AF-31	AF-38	AF-66	AF-114-b	AF-71	AF-140-f
Rock type	Amph	Amph	Amph	Amph	Amph	Amph	Amph
SiO <sub>2</sub>	46.42	45.88	50.29	50.19	57.57	49.29	40.89
TiO <sub>2</sub>	1.92	0.46	2.10	3.01	1.30	1.61	4.36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.43	14.34	14.25	15.56	14.11	15.07	15.81
FeO*	10.55	10.12	11.13	12.52	7.66	13.67	17.33
MgO	4.98	11.53	5.53	3.37	4.75	6.59	6.25
MnO	0.16	0.17	0.18	0.43	0.10	0.26	0.38
CaO	10.70	12.27	9.89	8.28	9.09	9.46	9.69
Na <sub>2</sub> O	3.31	1.70	3.12	2.29	2.03	2.24	1.13
K <sub>2</sub> O	0.52	0.49	0.68	1.14	0.80	0.68	0.42
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.35	0.03	0.27	0.64	0.22	0.17	0.59
Total	97.69	98.28	98.83	97.43	98.61	99.13	96.85
LOI	2.79	2.56	1.16	0.94	1.68	0.96	1.75



شکل ۴- نمودار ACF (A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O), C = CaO - (3.3×P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) and F = MgO + MnO + FeO) همه در درصد ملکولی جهت تعیین سنگ‌مادر سنگ‌های دگرگونی مورد بررسی از مجموعه دگرگونی قوری (Winter, 2013; Barton et al., 2018).

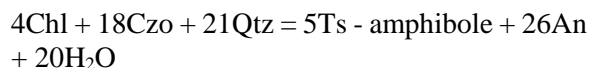
Fig. 4. The ACF diagram (A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O), C = CaO - (3.3×P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) and F = MgO + MnO + FeO), all in molecular proportions) for determining protolith of the studied rocks from the Qori metamorphic complex (Barton et al., 2018).

**۲-۶- مدل سازی با استفاده از نمودارهای فازی**

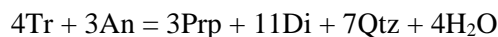
جهت بررسی هرچه بیشتر نحوه رویداد دگرگونی و تشکیل گردهمایی کانی‌های مشاهده شده در نمونه‌های مورد مطالعه، چند نمودار فازی ترمودینامیکی یا سودوسکشن توسط نرم افزار Theriak/Domino (de Capitani, 2010) نسخه ۲۰۱۸ محاسبه و رسم شدند. ترکیب شیمیایی نمونه AF-71 به دلیل داشتن مقادیر مناسب  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{FeO}$ ،  $\text{MgO}$  و  $\text{CaO}$  و نیز برخورداری از گردهمایی کانی‌های اوج دگرگونی جهت محاسبات برگزیده شد. در محاسبات، مدل‌های محلول جامد CHLR (White et al., 2007) GARNET برای گارنت، OMPH (Holland et al., 1998) برای کلریت، OPX (Green et al., 2007) برای کلینوپیروکسن و LIQtc (White et al., 2002) و (White et al., 2007) برای مذاب استفاده گردیدند. سیستم شیمیایی  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  (NCFMASHO) و سیال به عنوان آب خالص و مازاد در محاسبات وارد شدند. شکل‌های ۵ تا ۸ نتایج این محاسبات را نشان می‌دهند.

نمودار سودوسکشن P-T (دما-فشار) محاسبه شده (شکل ۵) نشان دهنده تغییرات کانی‌شناسی متابازیک‌های مورد مطالعه از شرایط رخساره شیست سبز بالایی تا گرانولیت است. در شرایط رخساره شیست سبز، (دماهای کمتر از ۵۵۰ درجه سانتیگراد)، گردهمایی پایدار شامل پلاژیوکلاز + آمفیبول + کلریت + اپیدوت و زونیزیت می‌شود. البته در فشارهای بالاتر زونیزیت جایگزین اپیدوت می‌گردد. با افزایش درجه دگرگونی تا حد رخساره آمفیبولیت (پیکان نشان داده شده در شکل ۵)، فازهای کلریت، اپیدوت و زونیزیت حذف شده و کلینوپیروکسن و گارنت جانشین آنها می‌شوند. واکنش‌های زیر جهت رخداد این گردهمایی‌های کانیایی پیشنهاد شده‌اند (Bucher and Grapes, 2011):

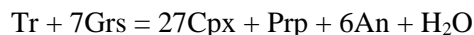
واکنش ۱



واکنش ۲



واکنش ۳

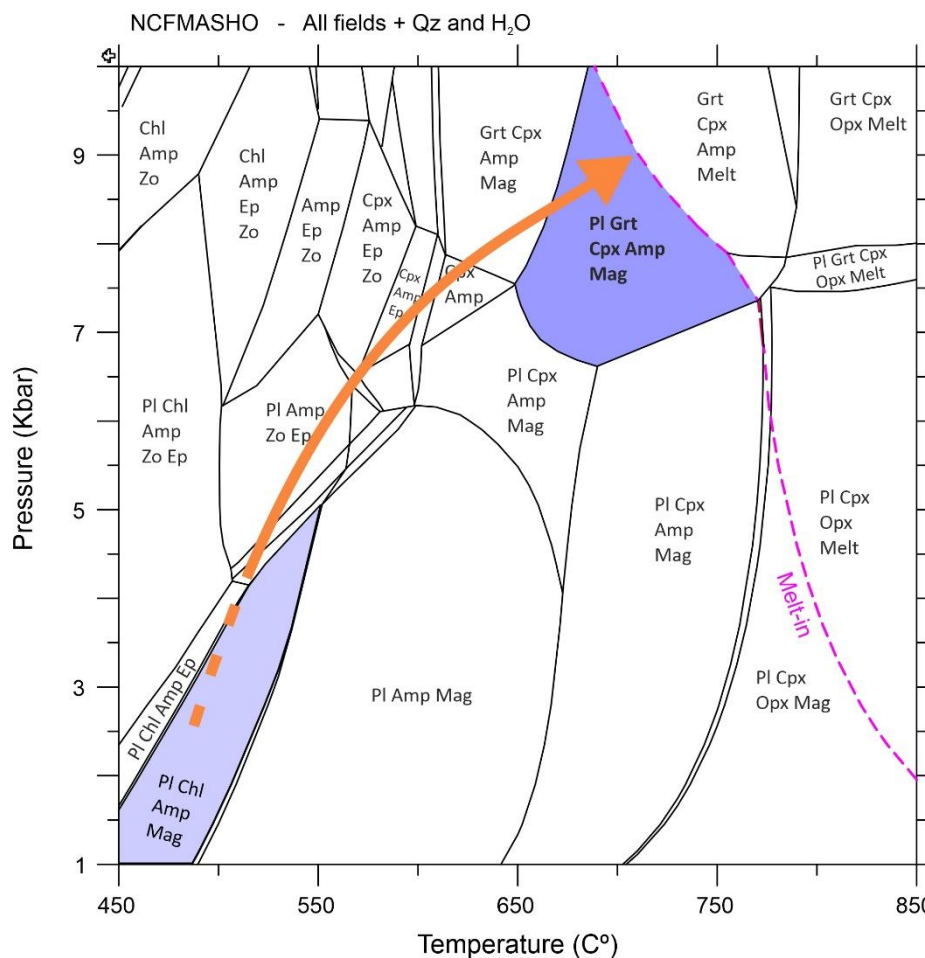


گردهمایی کانی‌های مشاهده شده در نمونه‌های مورد مطالعه شامل پلاژیوکلاز + گارنت + کلینوپیروکسن + آمفیبول (هورنبلند) در شرایط دمای ۶۴۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد و فشارهای ۶/۵ تا ۱۰ کیلوپا پایدار است (محدوده آبی‌رنگ در شکل ۵). بر این اساس، حضور گارنت در نمونه‌های مورد مطالعه نشان دهنده تاثیر فشارهای بالاتر از ۶/۵ کیلوپا در تشکیل متابازیت‌هاست. همچنین، در فشارهای کمتر از ۷ کیلوپا، با افزایش دما به بالاتر از ۷۶۰ سانتیگراد، ذوب بخشی رخ داده و مذاب وارد محدوده‌های پایداری گردهمایی‌های کانیایی می‌گردد. در فشارهای بالاتر از ۷ کیلوپا، دمای منحنی لیکوئیدوس به دماهای حدود ۶۵۰ درجه سانتیگراد نیز می‌رسد که به دلیل حضور آب مازاد در محاسبات ایجاد شده و نشان می‌دهد در شرایط مساعد، تشکیل میگماتیت‌های مجموعه قوری در دماهای بالاتر از ۶۵۰ درجه سانتیگراد امکان پذیر بوده. این موضوع با نتایج ارائه شده توسط Fazlnia و همکاران (۲۰۱۷) سازگار است و یک مسیر زمان-دما-فشار (P-T-t) ساعتگرد را برای رخداد دگرگونی این مجموعه نشان می‌دهد.

تغییرات گردهمایی‌های کانی‌ها و تغییرات فراوانی آنها در شکل ۶ به نمایش درآمده‌اند. در اینجا برای شرایط رخساره-های شیست سبز، آمفیبولیت و آمفیبولیت - گرانولیت نمودارهای ACF (Molar  $A=\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ;  $C=$ ) (شکل ۶ a, b و c). بر مبنای این نمودارها، در شرایط رخساره شیست سبز آمفیبول، کوارتز، کلریت، زونیزیت کانی‌های پایدار می‌باشند. در شرایط گذر از رخساره شیست سبز به آمفیبولیت، کلریت کاهش و آمفیبول افزایش می‌یابد اما مقدار پلاژیوکلاز و کوارتز تقریباً ثابت است. از رخساره آمفیبولیت میانی (دمای حدود ۶۵۰ درجه سانتیگراد) تا رخساره گرانولیت مقدار

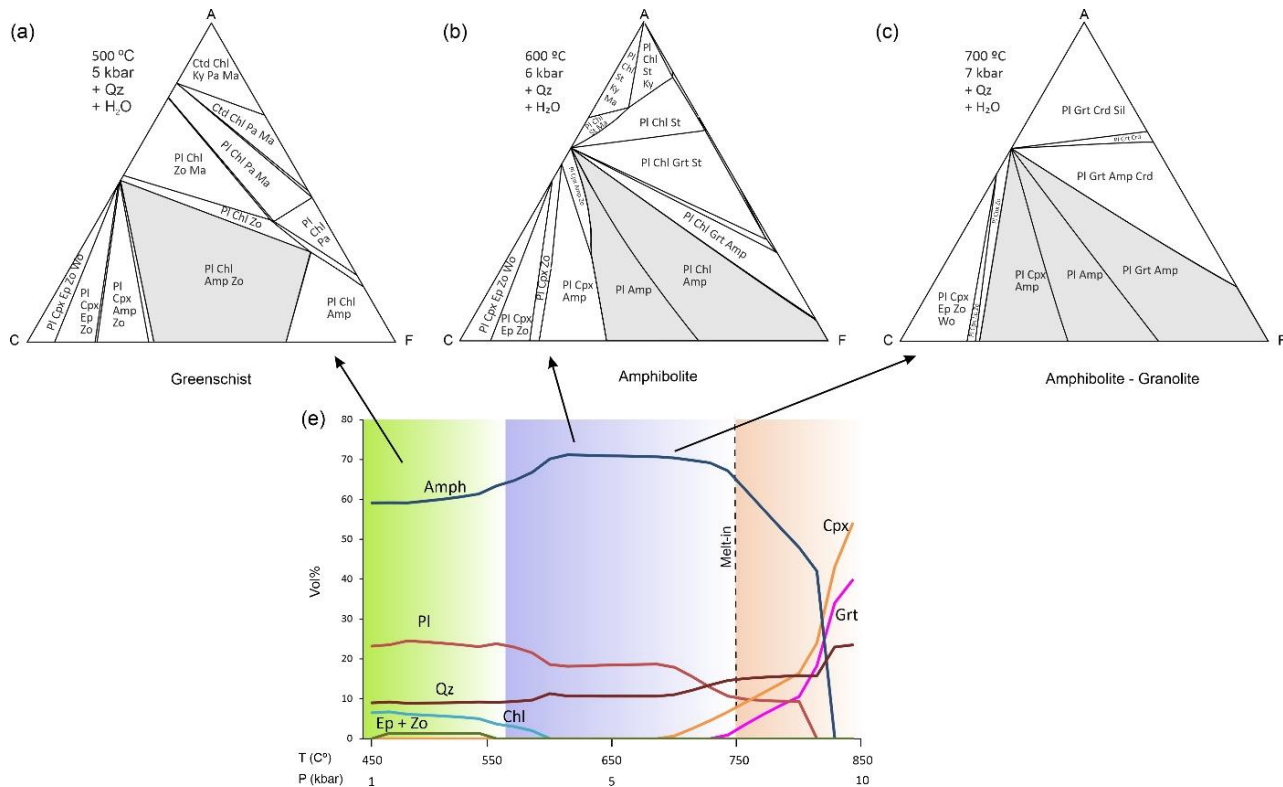
ذوب بخشی و تشکیل میگماتیت‌های منطقه است. بنابراین، وجود هورنبلند و پلاژیوکلاز در سنگ‌های مورد بررسی نشان دهنده تشکیل آنها در شرایط قبل از رخداد ذوب بخشی است.

کلینوپیروکسن و گارنت افزایش می‌یابند. در شرایط رخساره گرانولیت و آغاز ذوب بخشی، پلاژیوکلاز و آمفیبول شدت کاهش می‌یابد که نشان دهنده شرکت آنها در واکنش‌های



شکل ۵- نمودار فازی سودوسکشن محاسبه شده برای نمونه AF-17. محدوده آبی‌رنگ، محتوی گردهمایی کانی‌های مشاهده شده در شرایط اوج دگرگونی و محدوده خاکستری، گردهمایی پائین‌ترین حد دگرگونی نمونه‌های مورد مطالعه هستند. علائم اختصاری کانی‌ها عبارتند از Amp: آمفیبول، Chl: کلریت، Cpx: کلینوپیروکسن، Ep: اپیدوت، Grt: گارنت، Opx: ارتوپیروکسن، Pl: پلاژیوکلاز، Zo: زونیزیت (Whitney and Evans, 2010). نشانه پیکان مسیر رخداد دگرگونی را نشان می‌دهد.

Fig. 5. Phase diagram pseudosections calculated for the Af-17 sample. The blue field contains the mineral assemblage observed in the peak metamorphic condition and the gray filed contains the lowest metamorphism grade of the studied samples. The arrow show the path of metamorphism. Mineral abbreviations are Amp: amphibole, Chl: chlorite, Cpx: clinopyroxene, Ep: epidote, Opx: orthopyroxene, Qz: quartz, Zo: zoisite (Whitney and Evans, 2010).



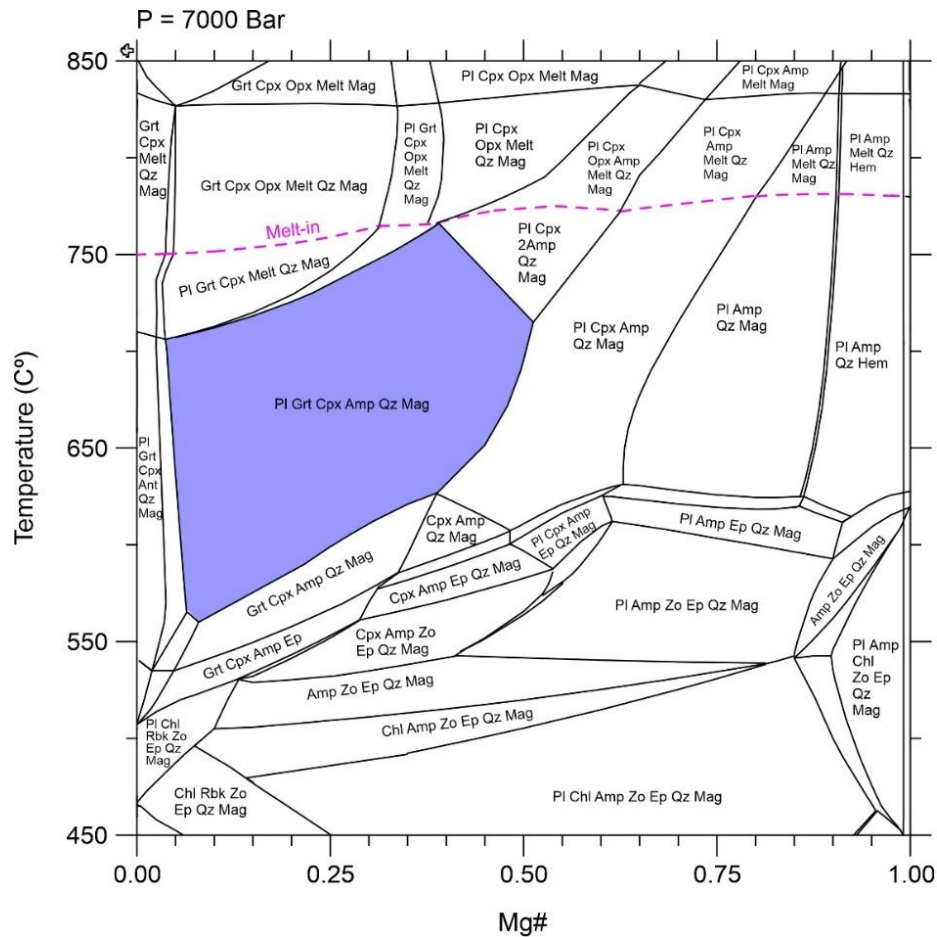
شکل ۶- (a, b و c) نمودارهای ACF و (e) نمودار تغییرات درصد حجمی کانی‌ها در طی فرایند دگرگونی در متابازیت‌های مجموعه قوری. علائم اختصاری کانی‌ها مشابه با شکل ۵.

Fig. 6. (a, b and c) the ACF diagrams and (e) the mineral vol% variation diagram during metamorphic process of the Qori complex metabasites. The mineral abbreviations are as in Fig. 5.

### ۶-۳- ترکیب سنگ‌مادر

پلاژیوکلاز + گارنت + کلینوپیروکسن + آمفیبول (محدوده آبی‌رنگ) در مقادیر  $Mg\#$  ۰/۱ تا ۰/۵ پایدار است و با افزایش  $Mg\#$  در یک دمای ثابت، گارنت و کلینوپیروکسن به ترتیب سیستم را ترک می‌کنند. نتایج این نمودار سازگاری بسیار خوبی با نتایج تجزیه‌های XRF نمونه‌ها دارد (جدول ۱) که در آنها  $Mg\#$  در محدوده ۰/۲۱ تا ۰/۵۳ تغییر می‌کند و نشان می‌دهد که محتوای آهن بالای نمونه‌های مورد مطالعه نقشی مهم در تشکیل گردهمایی نهایی دگرگونی در آنها داشته است.

ترکیب شیمیایی سنگ‌مادر می‌تواند تا حد زیادی گردهمایی کانی‌ها در درجات مختلف دگرگونی را تعیین کند (Bucher and Grapes, 2011). در اینجا جهت بررسی این موضوع، تاثیر تغییر نسبت منیزیم به آهن به صورت  $Mg\#$  ( $MgO/MgO+FeO$ ) در برابر دما در قالب یک نمودار فازی با فشار ثابت ۷ کیلوبار (حداقل فشار لازم برای تشکیل گارنت بر اساس شکل ۵) محاسبه شده است (شکل ۷). این نمودار نشان می‌دهد که گردهمایی



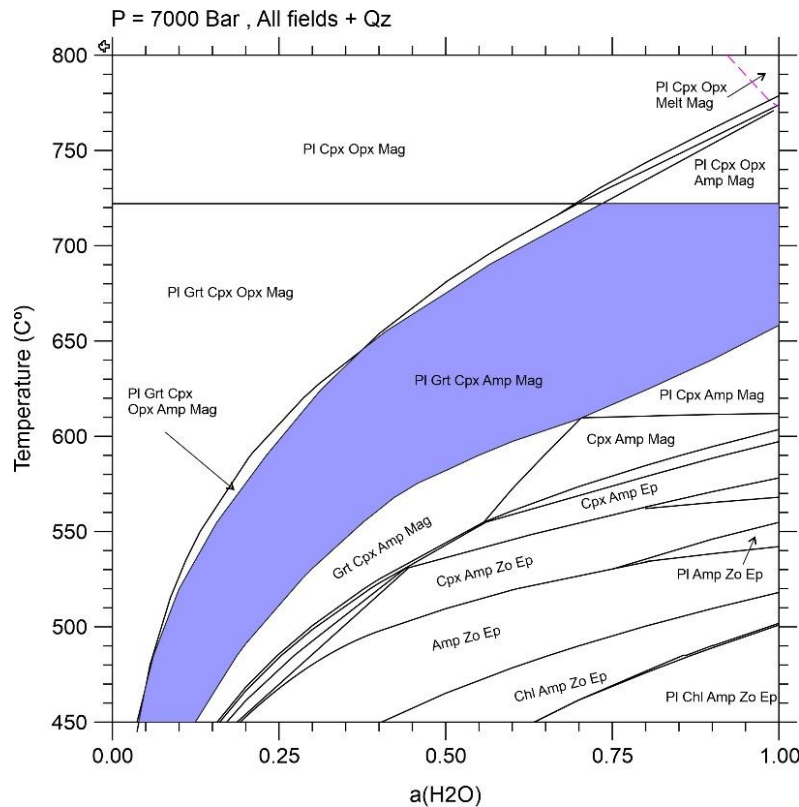
شکل ۷- نمودار فاز  $(MgO/MgO+FeO)$  Mg# در برابر دما در فشار ثابت ۷ کیلو بار برای ترکیب شیمیایی نمونه AF-71. محدوده آبی رنگ، محتوی گردهمایی کانی‌های مشاهده شده در شرایط اوج دگرگونی نمونه‌های مورد مطالعه است. علائم اختصاری کانی‌ها مشابه با شکل ۵.

Fig. 7. T-Mg# ( $MgO/MgO+FeO$ ) phase diagram in constant pressure of 7 kbar for the AF-71 sample. The blue colored field contains the mineral assemblage observed in the peak metamorphic condition of the studied samples. The arrow show the path of metamorphism. The mineral abbreviations are as in Fig. 5.

پایدار بوده ( $a_{H_2O} = 0.05 - 1$ ) و تنها در حضور سیال خالص  $CO_2$  پایدار نیست. از سوی دیگر، این مجموعه با افزایش دما، برای پایداری به فعالیت آب بیشتری نیاز دارد. در محدوده دمای شرایط نهایی دگرگونی (دمای ۶۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد)، فعالیت آب به حدود ۰/۵ تا ۱ می‌رسد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که در زمان تشکیل مجموعه نهایی، سیال دگرگونی تا حد بسیار زیادی از آب تشکیل شده بوده و  $CO_2$  نقشی اندک در محیط داشته است. این موضوع، درستی محدوده‌های به‌دست آمده در شکل ۵، که در آن سیال به عنوان آب خالص در نظر گرفته شده بود را تایید می‌کند.

#### ۴-۶- ترکیب سیال

فعالیت آب در محیط‌های دگرگونی نیز می‌تواند بر شرایط دما و فشار و نحوه شکل‌گیری گردهمایی کانی‌های دگرگونی تاثیرگذار باشد. به منظور بررسی این موضوع، نمودار فاز  $a(H_2O)$  در برابر دما در فشار ثابت ۷ کیلو بار برای نمونه AF-71 محاسبه شد (شکل ۸). جزء دیگر سیال در این محاسبات،  $CO_2$  در نظر گرفته شد که فعالیت آن در محیط‌های دگرگونی متداول است. نمودار به دست آمده نشان می‌دهد که گردهمایی پلاژیوکلاز + گارنت + کلینوپیروکسن + آمفیبول (محدوده آبی رنگ) در گستره وسیعی از مقادیر فعالیت آب،



شکل ۸- نمودار فازی  $a(\text{H}_2\text{O})$  (فعالیت آب سیال) در برابر دما در فشار ثابت ۷ کیلو بار برای ترکیب شیمیایی نمونه AF-71. محدوده آبی رنگ، محدوده متناسب با گردهمایی کانی‌های مشاهده شده در نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. علائم اختصاری مشابه با شکل ۵.

Fig. 8.  $a(\text{H}_2\text{O})$  (water activity) versus temperature phase diagram in constant pressure of 7 kbar for the AF-71 sample. The blue colored field contains the mineral assemblage observed in the peak metamorphic condition of the studied samples. The arrow show the path of metamorphism. The mineral abbreviations are as in Fig. 5.

## ۷- نتیجه‌گیری

آنها حاصل دگرگونی یک سنگ بازیک با محتوای آهن بالاتر نسبت به منیزیم هستند که از ویژگی‌های بازالت‌های تولییتی کف اقیانوس محسوب می‌شود.

- نمودارها فازی سودوسکشن محاسبه شده برای یکی از نمونه‌ها نشان می‌دهد که شرایط اوج دگرگونی برای تشکیل گردهمایی کانی‌های مشاهده شده در دمای ۶۴۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد و فشارهای ۶/۵ تا ۱۰ کیلو بار فراهم است که با سایر نتایج به دست آمده توسط دیگر پژوهشگران در این منطقه سازگاری دارد.

- دیگر نمودارهای فازی محاسبه شده نشان می‌دهند

نتایج زیر از یافته‌های این پژوهش قابل برداشت هستند:

- متابازیت‌های مجموعه دگرگونی قوری دارای گردهمایی‌های کانیایی مختلفی بوده که نماینده دگرگونی در حد رخساره شیست سبز بالایی تا رخساره گرانولیت پائینی هستند.
- در بالاترین درجه دگرگونی (رخساره گرانولیت)، گردهمایی کانی‌های هورنبلند + پلاژیوکلاز + گارنت + کلینوپیروکسن + کوارتز  $\pm$  تیتانیت شکل گرفته است.
- ترکیب‌های شیمیایی این سنگ‌ها نشان می‌دهند که

تشکیل و پایداری گردهمایی رخساره گرانولیت موثر بوده‌اند.

که محتوای بالای آهن موجود در سنگ‌مادر و محتوای بسیار اندک CO<sub>2</sub> سیال دگرگونی در

## مراجع

- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211-238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2)
- Barton, M.D., Ilchik, R.P., Marikos, M.A. 2018. Metasomatism. In: Kerrick D.M., (Ed.), *Contact metamorphism*. De Gruyter, PP. 321-350.
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: Reply. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210-265. <https://doi.org/10.1139/e81-163>
- Bucher, K., Grapes, R., 2011. *Petrogenesis of metamorphic rocks*, Springer P. 467.
- de Capitani, C., Petrakakis, K., 2010. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. *American Mineralogist* 95, 1006-1016. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3354>
- Fazlnia, A., 2017. Geochemical characteristics and conditions of formation of the Chah-Bazargan peraluminous granitic patches, ShahrBabak, Iran. *Geologica Carpathica* 68, 445-463. <https://doi.org/10.1515/geoca-2017-0029>
- Fazlnia, A., Miri, M., Saki, A., 2023. Determining the conditions and factors affected partial melting in the Chah-Bazargan migmatitic xenoliths (NE Neyriz) using thermodynamic phase diagrams. *Journal of Geological Researches* 14(53), 18-31. <https://doi.org/10.48308/ESRJ.2023.103056>
- Fazlnia, A., Moradian, A., Rezaei, K., Moazen, M., Ali, P.S., 2007. Synchronous activity of anorthositic and S-type granitic magmas in Chah-Dozdan batholith, Neyriz, Iran: evidence of zircon SHRIMP and monazite CHIME dating. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 18, 221-237.
- Fazlnia, A., Schenk, V., van der Straaten, F., Mirmohammadi, M., 2009. Petrology, geochemistry, and geochronology of trondhjemites from the Qori Complex, Neyriz, Iran. *Lithos* 112, 413-433. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.047>
- Golonka, J., 2004. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. *Tectonophysics* 381, 235-273. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2002.06.004>
- Green, E., Holland, T., Powell, R., 2007. An order-disorder model for omphacitic pyroxenes in the system jadeite-diopside-hedenbergite-acmite, with applications to eclogitic rocks. *American Mineralogist* 92, 1181-1189. <https://doi.org/10.2138/am.2007.2401>
- Hassanzadeh, J., Wernicke, B., 2016. The Neotethyan Sanadaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. *Tectonics* 35, 586-621. <https://doi.org/10.1002/2015TC003926>
- Holland, T., Baker, J., Powell, R., 1998. Mixing properties and activity-composition relationships of chlorites in the system MgO-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *European Journal of Mineralogy*, 395-406. <https://doi.org/10.1127/ejm/10/3/0395>
- Holland, T.J.B., Blundy, J., 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 116, 433-447. <https://doi.org/10.1007/BF00310910>
- Kohn, M.J., Spear, F.S., 1989. Empirical calibration of geobarometers for the assemblage garnet+hornblende+plagioclase+quartz. *American Mineralogist* 74, 77-84. <https://doi.org/10.1007/BF00306445>
- Sabzehei, M., Navazi, M., Ghavidel, M., Hamdi, S.B. 1992. Geological map of Neyriz (1/250000). Geological Survey of Iran, Tehran.
- Sears, J.W., George, G.M.S., Winne, J.C., 2005. Continental rift systems and anorogenic magmatism. *Lithos* 80, 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.05.009>



- Shahabpour, J., 2005. Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Neyriz. *Journal of Asian Earth Sciences* 24, 405-417. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.11.007>
- Sheikholeslami, M.R., 2015. Deformations of Palaeozoic and Mesozoic rocks in southern Sirjan, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 106. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.03.007>
- Sheikholeslami, M.R., Pique, A., Mobayen, P., Sabzehei, M., Bellon, H., Emami, M.H., 2008. Tectono-metamorphic evolution of the Neyriz metamorphic complex, Quri-Kor-e-Sefid area (Sanandaj-Sirjan Zone, SW Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 31, 504-521. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.07.004>
- Stöcklin, J., Nabavi, M.H., 1973. *Tectonic Map of Iran*, Geological Survey of Iran, Teheran.
- White, R.W., Powell, R., Clarke, G.L., 2002. The interpretation of reaction textures in Fe-rich metapelitic granulites of the Musgrave Block, central Australia: constraints from mineral equilibria calculations in the system  $K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-Fe_2O_3$ . *Journal of metamorphic Geology* 20, 41-55. <https://doi.org/10.1046/j.0263-4929.2001.00349.x>
- White, R.W., Powell, R., Holland, T.J.B., 2007. Progress relating to calculation of partial melting equilibria for metapelites. *Journal of metamorphic Geology* 25, 511-527. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00711.x>
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185-187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Winter, J.D., 2013. *Principles of igneous and metamorphic petrology* (Pearson education). P. 720.