

Research Article**Study of protolith, thermobarometry and formation condition of garnet cordierite hornfelses from south of the Serkan area (SW of the Hamedan Province)**Ali Asghar Sepahi¹, Mirmohammad Miri^{2*}, Mehrak Mansouri¹

1- Geology Department, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan

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

Keywords: Hornfels, Thermobarometry, Pseudosection diagram, Alvand, Sanandaj-Sirjan**1- Introduction**

The study area is located near the Tuyserkan town (Hamedan Province), and the northern part of the Sanandaj-Sirjan zone. This is a part of the Alvand batholith contact aureole intruded in the regional metamorphic sequence of the Hamedan area in the Middle Jurassic (Shahbazi et al., 2010; Mahmoudi et al., 2011; Sepahi et al., 2019; 2020). Hornfelses containing andalusite, garnet and cordierite porphyroblasts of different sizes and amounts formed in various parts of the aureole. In the south of the Serkan area, garnet cordierite hornfelses crop out. In the present paper, we study protolith properties and formation P-T condition of these hornfelses using the chemistry of minerals, whole-rock compositions and phase diagrams (pseudosections).

2- Results**2-1- Petrography**

The samples contain cordierite, garnet, biotite, orthoclase, plagioclase and quartz and porphyroblastic texture. Cordierite porphyroblasts (2 to 5 mm) show cyclic twinning. Garnets are the other porphyroblasts (up to 2 mm) but with less abundance. The assemblage cordierite + garnet + biotite + orthoclase formed at the peak metamorphic condition.

2-2- Whole-rock geochemistry

The XRF whole-rock analyses show that the samples contain high SiO₂ (58-65 wt%) and Al₂O₃ (19-22 wt%) and moderate FeO_t (~ 6 wt%), K₂O (3-5 wt%) and low Na₂O (0.5 – 0.9 wt%) and CaO (0.3- 0.5 wt%). The chemical compositions are formed from pelitic sediments containing some CaO impurities.

2-3- Mineral chemistry

The electron probe micro-analyses (EPMA) reveal that the cordierites are Fe-rich. The biotites have similar compositions containing high FeO and Al₂O₃ contents and are of siderophyllite type. The garnets are almandine rich in general; however, they also show chemical zoning with almandine and pyrope increasing toward the rims. The plagioclases contain relatively equal Ca and Na (Ab_{0.58-64}An_{0.35-0.43}) with no significant chemical zoning and fall in the field of andesine on the feldspar classification diagram.

2-4- Thermobarometry

* Corresponding author: m.miri@scu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2021.36418.2196

Received 2021-01-17

Accepted 2021-03-12

Regarding the mineral assemblage, the garnet-cordierite (Holdaway and Lee, 1977) and garnet-biotite (Holdaway, 2000) thermometers and garnet-biotite-plagioclase-quartz (Wu et al., 2004) barometer were used to estimate the P-T conditions of the samples. The results show that the samples formed in 530 to 620 °C and 2 to 3.6 kbar conditions of middle to upper hornblende hornfels facies.

3- Discussion

3-1- Pseudosection

A pseudo section in a system including SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, CaO, K₂O, FeO, MgO, MnO and H₂O (MnNCKFMASH) was calculated using the samples Perple_x (Connolly, 2005) version 6.9.0 issued at 2020.6.21. The average composition of the samples was used for the calculations. The pseudosection indicates that cordierite was stable at 500 °C and below 3.5 kbar in the studied samples. No field contains both the cordierite and garnet. The average estimated P-T falls between cordierite and garnet stability fields indicating that assemblage cordierite + garnet + biotite + orthoclase formed in a transition P-T condition. According to the diagram, it can be concluded that in a constant pressure, andalusite bearing assemblages were replaced by cordierite bearing ones.

The occurrence of cordierite + garnet assemblages in meta-pelitic rocks needs some conditions, including (1) rock to be formed in P-T stability of muscovite; (2) garnet contains sufficient Mn and Ca to become stable in low P, (3) high Mg contents of cordierites, (4) impure fluid composition, and (5) decompression (Osberg, 1971; Holdaway and Lee, 1977; García-Casco et al., 1999; Bucher and Grapes, 2011). The chemical compositions of the garnets and cordierites made permitted them to remain stable in different P-T conditions. On the other hand, the intrusion of granitoid bodies usually causes local uplift and associated decompression (Acocella, 2000; Yoshinobu et al., 2003). Mohajjel and Fergusson (2014) reported plutonism associated with uplift in northern Sanandaj-Sirjan during Jurassic. Also, satellite image processing indicated an uplift in vicinity of the study area (Chegini et al., 2015).

3-2- Metamorphic fluid composition

A T-XCO₂ pseudosection was calculated for the average composition of the studied samples in a MnNCKFMASH system to investigate the role of fluid composition in the formation of garnet + cordierite assemblages. The pressure was assumed stable at 3 kbar. The diagram shows that garnet + cordierite assemblages are stable at fluid CO₂ contents of about 0.18. CaO impurities in the protolith could provide this condition.

4-Conclusion

Assemblage cordierite + garnet + biotite + plagioclase + orthoclase in the Serkan area hornfelses formed at 550 to 600 °C and P > 3kbar from a meta - pelitic protolith containing some CaO impurities. Calculated pseudo sections indicate that the garnet + cordierite assemblage occurred due to sufficient Mn, Mg and Ca contents of the garnets and cordierites, the metamorphic fluid's CO₂ content, and decompression associated with intrusion of granitoid bodies in the area.

References

- Acocella, V., 2000. Space accommodation by roof lifting during pluton emplacement at Amiata (Italy). *Terra Nova* 12, 149-55
- Berberian, M., King G., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: Reply. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 1764-6.
- Bucher, K., Grapes, R., 2011. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*, Springer, p. 428.
- Chegini, A., Sorbi, A., Arian, M., 2015. Active Tectonics of Hamedan Area, West Iran. *International Journal of Geography and Geology* 4(6), 109-28.
- García-Casco, A., Torres-Roldán, R.L., 1999. Natural metastable reactions involving garnet, staurolite and cordierite: implications for petrogenetic grids and the extensional collapse of the Betic-Rif Belt. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 136, 131-53.

- Hassanzadeh, J., Wernicke, B., 2016. The Neotethyan Sanadaj–Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin–arc transitions. *Tectonics* 35, 586–621.
- Holdaway, M., Lee, S.M., 1977. Fe–Mg cordierite stability in high-grade pelitic rocks based on experimental, theoretical, and natural observations. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 63, 175–98.
- Holdaway, M.J., 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet–biotite geothermometer. *American Mineralogist* 85, 881–892.
- Mahmoudi, S., Corfu, F., Masoudi, F., Mehrabi, B., Mohajjel, M., 2011. U–Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj–Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 41, 238–249.
- Mohajjel, M., Fergusson, C., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. *International Geology Reviews* 56, 263–287.
- Osberg, P.H., 1971. An equilibrium model for Buchan-type metamorphic rocks south-central Maine. *American Mineralogist* 56, 569–576.
- Sepahi, A.A., Jafari, S.R., Osanai, Y., Shahbazi, H., and Moazzen, M., 2019. Age, petrologic significance and provenance analysis of the Hamedan low pressure migmatites, Sanandaj–Sirjan zone, west Iran. *International Geology Review* 61, 1446–61.
- Sepahi, A.A., Vahidpour, H., Lentz, D.R., McFarlane, C.M., Maanijou, M., Salami, S., Miri, M., Mansouri, M., Mohammadi, R., 2020. Rare sapphire-bearing syenitoid pegmatites and associated granitoids of the Hamedan region, Sanandaj–Sirjan zone, Iran: analysis of petrology, lithogeochemistry and zircon geochronology / trace element geochemistry. *Geological Magazine* 157, 1499–1525.
- Shahbazi, H., Siebel, W., Pourmoafee, M., Ghorbani, M., Sepahi, A., Shang, C., 2010. Geochemistry and U–Pb zircon geochronology of the Alvand plutonic complex in Sanandaj–Sirjan Zone (Iran): New evidence for Jurassic magmatism. *Journal of Asian Earth Sciences* 39(6), 668–83.
- Stöcklin, J., Nabavi, M.H., 1973. Tectonic Map of Iran: Geological Survey of Iran, scale 1:2 500 000. Ghasemi, A., Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 26, 683–93.
- Wu, C., Zhang, J., Ren L., 2004. Empirical Garnet–Biotite–Plagioclase–Quartz (GBPQ) Geobarometry in Medium- to High-Grade Metapelites. *Journal of Petrology* 45, 1907–1921.
- Yoshinobu, A.S., Fowler, T.K., Paterson, S.R., Llambias, E., Tickyj, H., Sato, A.M., 2003. A view from the roof: magmatic stoping in the shallow crust, Chita pluton, Argentina. *Journal of Structural Geology* 25, 37–48.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Sepahi, A., Miri, M., Mansouri, M., 2022. Study of protolith, thermobarometry and formation condition of garnet cordierite hornfels from south of the Serkan area (SW of the Hamedan province). *Adv. Appl. Geol.* 11(4), 12–30.

DOI: 10.22055/AAG.2021.36418.2196

url: https://aag.scu.ac.ir/article_16822.html

بررسی سنگ مادر، دما - فشارسنجی و شرایط تشکیل گارنت کردیریت هورنفلس های جنوب منطقه سرکان (جنوب غرب استان همدان)

علی اصغر سپاهی

استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

میر محمد میری*

استادیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

مهترک منصوری

دانشجوی دکترا، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۲

*m.miri@scu.ac.ir

چکیده

هورنفلس های هاله دگرگونی باتولیت الوند در جنوب منطقه سرکان (شمال غرب استان همدان) محتوی مجموعه دگرگونی کردیریت + گارنت + بیوتیت + پلاژیوکلاز + پتاسیم فلدسپارمی باشند. ترکیب شیمیایی سنگ کل این هورنفلس ها نشان می دهد که آنها از دگرگونی یک سنگ مادر پلیتی (با مقادیری ناخالصی کربنات کلسیم) شکل گرفته اند که حاصل هوازدگی سنگ های آذرین اسیدی تا حد واسط بوده است. آنالیزهای شیمیایی الکترون میکروپروب آشکار نمودند که کردیریت ها و بیوتیت ها از انواع غنی از آهن بوده، گارنت ها محتوی مقادیر بالای اعضای انتهایی آلماندین و اسپسارتین هستند و پلاژیوکلازها از نوع آندزین می باشند. محاسبات دما و فشار سنجی بر اساس مجموعه کانی های در تعادل این سنگ ها دمای ۵۵۰ تا ۶۲۰ درجه سانتیگراد و فشار کمتر از ۳ کیلو بار را برای تشکیل آنها نشان می دهند. همچنین، نمودارهای سودوسکشن محاسبه شده برای ترکیب میانگین این سنگ ها نشان می دهند که تشکیل مجموعه های کردیریت + گارنت دار در نتیجه محتوای بالای منگنز و کلسیم گارنت، منیزیم کردیریت و احتمالاً تحت تأثیر بالا آمدگی ناشی از نفوذ توده های آذرین شکل گرفته است. علاوه بر این، بررسی تغییر ترکیب سیال در طی دگرگونی مشخص نمود که پایداری مجموعه های کردیریت + گارنت دار نیازمند حضور مقادیری کربن دی اکسید در محیط بوده اند.

کلمات کلیدی: هورنفلس، دما - فشارسنجی، نمودار سودوسکشن، الوند، سنندج - سیرجان

مقدمه

۲). سنگ های دگرگونی منطقه همدان تا کنون توسط پژوهشگران زیادی بررسی شده اند مانند (Baharifat et al., 2004; Sepahi et al., 2009; Saki et al., 2012; Mahmoudi and Baharifar, 2018; Saki et al., 2020; Monfaredi et al., 2020). اگرچه تمرکز عمده این پژوهش ها بر روی کل دگرگونی منطقه همدان بوده و هورنفلس های منطقه سرکان به طور اختصاصی بررسی نشده اند. بخشی از این پژوهش ها از نمودارهای فازی جهت تعیین شرایط دگرگونی و تشکیل سنگ ها بهره برده اند. Saki (۲۰۱۷) به بررسی تفاوت شرایط دگرگونی در بخش های شمالی و جنوبی باتولیت الوند از طریق نمودار فازی پرداخته است. Mahomoudi و Baharifar (۲۰۱۸) تشکیل شیبست های آلومینوسیلیکات دار و فاقد آلومینوسیلیکات را از طریق محاسبه و رسم نمودارهای فازی بررسی نموده اند. Monfaredi و همکاران (۲۰۲۰) نیز علاوه بر شیبست های منطقه همدان، شرایط تشکیل هورنفلس های زون های

منطقه مورد مطالعه در محدوده شهرستان تویسرکان (استان همدان) و در بخش شمالی پهنه سنندج - سیرجان قرار دارد (شکل ۱). این منطقه بخشی از هاله دگرگونی باتولیت الوند است که در ژوراسیک میانی به درون توالی سنگ های دگرگونی ناحیه ای منطقه همدان نفوذ نموده است (Shahbazi et al., 2010; Mahmoudi et al., 2011; Sepahi et al., 2019; 2020) در نتیجه این نفوذ، فیلیت ها و اسلیت های منطقه دچار دگرگونی مجاورتی شده و به هورنفلس تبدیل شده اند. به طور کلی این هورنفلس ها محتوی فنوبلاست های آندالوزیت، گارنت و کردیریت هستند که مقدار و نوع این فنوبلاست ها در بخش های مختلف توده تفاوت دارد.

در جنوب منطقه سرکان (شکل b1) گارنت کردیریت هورنفلس برونزد دارد. این سنگ ها تقریباً در کنتاکت باتولیت الوند شکل گرفته اند (شکل

فرورانش اقیانوس نئوتتیس به زیر ورقه ایران در طی مزوزوئیک سبب فعالیت آتشفشانی گسترده و نفوذ توده‌ای آذرین در آن شده است (مانند Ghasemi and Talbot, 2006; Sepahi et al., 2014, 2020; Hassanzadeh and Wernicke, 2016; Yang et al., 2018).

باتولیت الوند یکی از مهمترین توده‌های آذرین بخش شمالی پهنه سنندج سیرجان می‌باشد که در فاصله زمانی ۱۶۵ تا ۱۳۵ میلیون سال پیش (Shahbazi et al., 2010; Mahmoudi et al., 2011; Yang et al., 2018; Sepahi et al., 2019; 2020) به درون فیلیت‌های همدان نفوذ کرده و انواعی از هورنفلس‌ها و میگماتیت را ایجاد نموده است (Sepahi et al., 2009; Mahmoudi and Baharifar, 2018; Sepahi et al., 2018; Saki et al., 2020; Monfaredi et al., 2020).

در جنوب سرکان نیز توالی رخداد این رویداد آشکار است. این منطقه شامل سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای با درجات مختلف می‌شود که توسط بخشی از باتولیت الوند با ترکیب گابرودیوریت و گرانودیوریت قطع شده است (شکل a۲). دگرگونی مجاورتی در این بخش از هاله دگرگونی الوند، سبب تشکیل هورنفلس‌های کردیریت، گارنت و آندالوزیت دارگشته است. با فاصله از مرز توده‌های آذرین، از مقدار کردیریت کاسته شده و آندالوزیت فزونی می‌یابد. این هورنفلس‌ها در مراحل بعدی ماگماتیسیم و میگماتیت‌زایی تحت تأثیر نفوذ دایک‌های گرانیتی قرار گرفته (شکل b۲) و در مجاور آنها تاحدی دگرسان شده‌اند. سنگ‌های مورد مطالعه تحت تأثیر فرآیندهای زمین‌ساختی پس از تشکیل دچار گسل‌خوردگی نیز شده‌اند که روند عمومی آن شمال غرب - جنوب شرق می‌باشد.

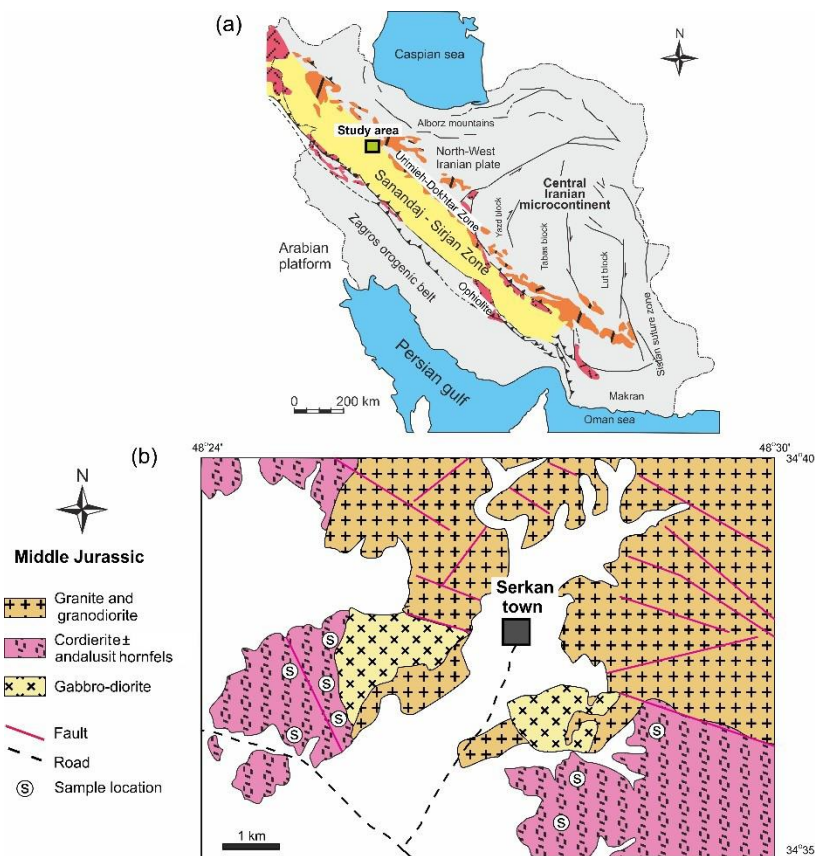
روش مطالعه

نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه مورد مطالعه در ابتدا توسط میکروسکوپ‌های پلاریزان بررسی شده و نمونه‌های تازه و فاقد دگرسانی جهت انجام آنالیز شیمیایی سنگ کل به روش طیف سنجی فلورسسانس پرتوایکس (XRF) به آزمایشگاه شرکت کانساران بینالود فرستاده شدند. محتوای عناصر اصلی تعداد ۵ نمونه هورنفلس محتوی گارنت و کردیریت توسط دستگاه PHILIPS PW1480 تعیین گشت. همچنین جهت تعیین ترکیب شیمیایی کانی‌ها به روش الکترون میکروپروب، تعداد ۳ نمونه هورنفلس به آزمایشگاه شرکت فرآوری مواد معدنی ایران (ایمیدرو کرج) فرستاده و کانی‌های کردیریت، گارنت، بیوتیت و پلاژیوکلاز توسط دستگاه آنالیز نقطه‌ای EPMA مدل SX100 ساخت شرکت Cameca فرانسه، با شدت جریان 20nA، ولتاژ شتاب‌دهنده 0.2-40 Kv و استاندارد فلز مس و زمان شمارش، به‌طور متوسط ۱۵ ثانیه برای هر عنصر مورد آنالیز قرار گرفتند.

آندالوزیت - کردیریت و کردیریت - پتاسیم‌فلدسپار را با بهره‌گیری از نمودارهای فازی مطالعه کرده‌اند. تمامی نمودارهای ترسیم شده در پژوهش‌های پیشین با استفاده از نرم افزار Theriak/Domino صورت پذیرفته است. در این پژوهش، نویسندگان شرایط دگرگونی هورنفلس‌های جنوب سرکان را با استفاده از نمودارهای ترسیم شده توسط نرم‌افزار Perple_x (Connolly, 2005)، نسخه 6.9.0، ارائه شده در سال ۲۰۲۰ بررسی می‌نمایند. برتری این نرم افزار نسبت به نرم افزار Theriak/Domino در تعیین محدوده‌های با متغیر کمتر و درصد اطمینان بالاتر و نیز تخمین درصد مشارکت فازهای مختلف در طی مراحل دگرگونی می‌باشد. همچنین در این پژوهش، ترکیب شیمیایی کانی‌ها و سنگ کل این سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است تا نوع سنگ‌مادر و نحوه پیدایش آن روشن‌تر گردد.

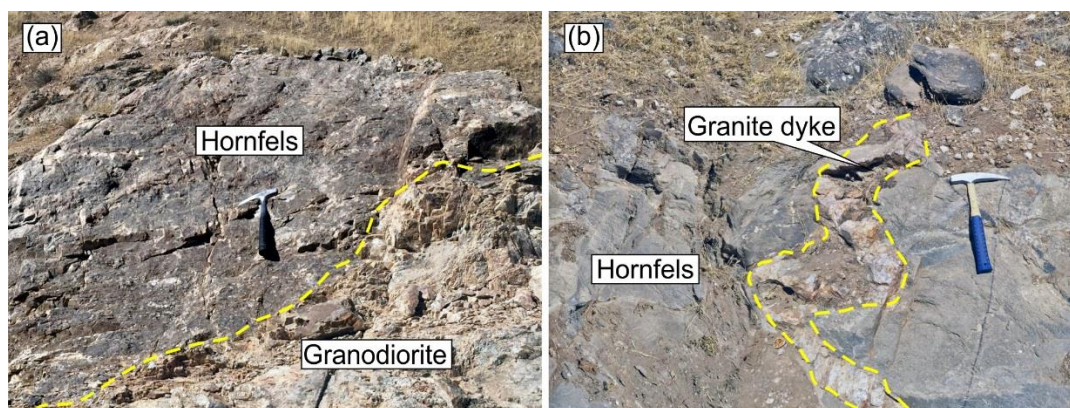
زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه از لحاظ مختصات جغرافیایی در طول جغرافیایی ۲۴' ۴۸° تا ۳۰' ۴۸° درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵" ۳۴° تا ۳۷" ۳۴° درجه شمالی قرار دارد. این منطقه بخشی از پهنه آذرین - دگرگونی سنندج - سیرجان شمالی می‌باشد (شکل a۱). پهنه سنندج - سیرجان با طول تقریبی ۱۵۰۰ کیلومتر در راستای شمال غرب - جنوب شرق قرار گرفته و متشکل از سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای است که توده‌های آذرین فراوانی با ترکیب‌های مختلف در آن‌ها نفوذ نموده‌اند (Stöcklin, 1973; Berberian and King, 1981; Alavi, 1994; Ghasemi and Talbot, 2006; Hassanzadeh and Wernicke, 2016; Azizi et al., 2018). این پهنه در دوران پالئوزوئیک بخشی از لبه شمالی گندوانا محسوب می‌شده که در طی پرمین در نتیجه گسترش اقیانوس نئوتتیس از آن جدا شده و به طرف شمال و قاره لورازیا حرکت نموده است (مانند Hassanzadeh and Wernicke, 2016). سنگ‌های رسوبی بخش شمالی پهنه سنندج - سیرجان شامل توالی از لایه‌های پلیتی، پسامیتی، کالک‌پلیتی، کربناتی و آذرآوری در طی تریاس پسین تا ژوراسیک پیشین دستخوش دگرگونی شده‌اند (مانند Stöcklin, 1973; Berberian and King, 1981, Ghasemi and Talbot, 2006; Mohajjel and Fergusson, 2014; Hassanzadeh and Wernicke, 2016; Sepahi et al., 2019). این دگرگونی سبب ایجاد توالی از اسلیت، فیلیت و شیست گشته که تحت عنوان فیلیت‌های همدان از آنها نام برده می‌شود. در منطقه همدان عمده رخداد این توالی به صورت شیست‌های آلومینوسیلیکات و گارنت‌دار می‌باشد که بیشترین ضخامت آن در حدود ۱۰ کیلومتر می‌رسد (Baharifar et al., 2004; Sepahi et al., 2009). میان لایه‌هایی از آمفیبولیت‌های کالک‌سیلیکات نیز در برخی از نقاط این توالی به خصوص در بخش جنوبی و شرقی به چشم می‌خورند (Miri et al., 2016; Monfaredi et al., 2020).



شکل ۱- (a) نقشه پهنه‌های ساختاری ایران (برگرفته از Stöcklin, 1973) و (b) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در جنوب شهرستان سرکان در استان همدان (برگرفته از Amidi and Majidi, 1977).

Fig. 1. (a) Map of Iran structural zone (after Stöcklin, 1973) and (b) Geological map of the study area (after Amidi and Majidi, 1977).



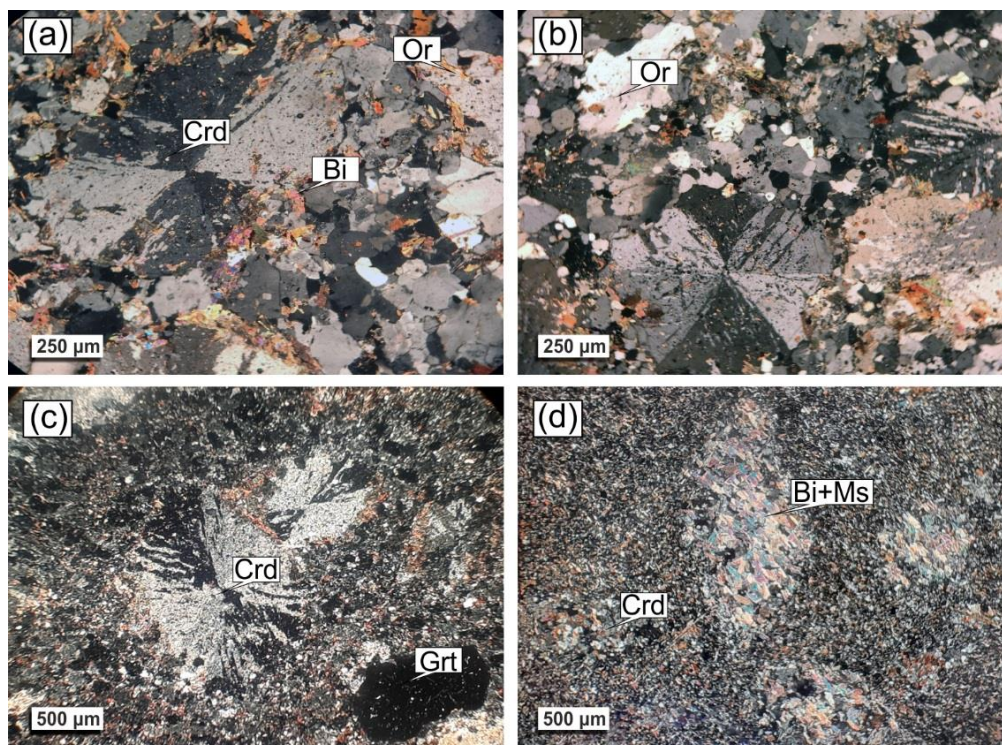
شکل ۲ - تصاویر بیرونزدگی‌های هورنفلس در جنوب سرکان؛ (a) تشکیل هورنفلس در مرز گرانودیوریت‌ها و (b) دایک‌های گرانیتی که به درون هورنفلس‌ها نفوذ نموده‌اند.

Fig. 2. Photographs of hornfels outcrops in south of the Serkan area; (a) Formation of the hornfels in contact of granodiorite and (b) granitic dykes intruded the hornfels.

زمین شناسی منطقه

دانه‌های نیمه‌شکل‌دار و با اندازه ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر دیده شده و میانبرهای کوچکی از کوارتز و بیوتیت دارد (شکل ۳ c و d). به طور کلی، گارنت فراوانی کمتری نسبت به کوردیریت در نمونه‌ها دارد، به ویژه در بخش‌های خیلی نزدیک به توده، مقدار گارنت کاهش چشم‌گیری نشان می‌دهد. بیوتیت به صورت دانه‌های ریز در زمینه سنگ حضور داشته و جهت‌یافتگی مشخصی ندارند (شکل ۳ a و b). آندالوزیت‌های کوچک و بی شکل نیز در زمینه سنگ به چشم می‌آید. خوردند که به احتمال فراوان در طی افزایش دما با سایر کانی‌ها جایگزین شده‌اند. در نمونه‌های دگرسانی شده، بیوتیت‌ها و مسکوویت‌های ثانویه جانشین کوردیریت‌ها و گارنت‌ها شده‌اند (شکل ۳ d). بر اساس بررسی تمامی نمونه‌های برداشت شده، مجموعه کوردیریت + گارنت + بیوتیت + ارتوکلاز را می‌توان به عنوان مجموعه اوج دگرگونی در هورنفلس‌های منطقه مورد مطالعه مد نظر قرار داد.

به‌طور کلی، هورنفلس‌های مورد مطالعه از کانی‌های کوردیریت، بیوتیت، گارنت، کوارتز، ارتوکلاز و پلاژیوکلاز \pm آندالوزیت ساخته شده‌اند (شکل ۳). مسکوویت نیز در نتیجه دگرگونی برگشتی در اطراف برخی از کوردیریت‌ها شکل گرفته است. بافت نمونه‌ها پورفیروگرانوبلاستیک با پورفیروبلاست‌های کوردیریت و گارنت می‌باشد. زمینه سنگ از دانه‌های هم بعد کوارتز به همراه بیوتیت‌های کوچک ساخته شده است (شکل ۳). کوردیریت به صورت دانه‌های نیمه شکل دار و تا حدی بیضی شکل و با اندازه ۲ تا ۵ میلی‌متر در این سنگ‌ها حضور دارند و معمولاً دارای دوقلوبی چرخشی هستند که نشانه شکل‌گیری آنها در شرایط دما بالا و در هاله دگرگونی مجاورتی است (Kitamura and Yamada, 1987). پولکهای ریز و بی‌شکل بیوتیت در حاشیه کوردیریت‌ها و نیز به صورت میانبار در آنها به چشم می‌آید. گارنت، دیگر پورفیروبلاست این سنگ‌هاست که به صورت



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های مورد مطالعه (نور XPL). (a و b) پورفیروبلاست‌های کوردیریت دارای دوقلوبی چرخشی که در زمینه‌ای متشکل از کوارتز و فلدسپار و بیوتیت با بافت گرانوبلاستیک قرار گرفته‌اند. (c) پورفیروبلاست‌های گارنت و کوردیریت و (d) جانشینی کوردیریت توسط مسکوویت و بیوتیت در دگرگونی پس‌رونده. علائم اختصاری: Bi: بیوتیت؛ Crd: کوردیریت؛ Grt: گارنت، Ms: مسکوویت، Or: ارتوکلاز؛ (Whitney and Evans, 2010).

Fig 1. Micro-photographs from the studied samples (XPL). (a and b) cordierite porphyroblast with cyclic twinnings laying in a matrix composed of granoblastic quartz, feldspat and biotite, (c) garnet and cordierite porphyroblasts, and (d) muscovite and biotite replacing cordierite during retrograde metamorphism. Mineral abbreviations: Bi: biotite, Crd: cordierite, Grt: garnet, Ms: muscovite, Or: orthoclase (Whitney and Evans, 2010).

شیمی سنگ کل

کانی‌های سیلیکات است. از آنجایی که نمونه‌های مورد مطالعه فاقد کانی کربناتی هستند، مقدار اکسید کلسیم حاصل از آنالیز را می‌توان در این مورد استفاده نمود. مقدار این شاخص برای نمونه‌های مورد مطالعه از ۷۳ تا ۷۷/۵ تغییر نموده و در محدوده تعیین شده برای شیل‌های تیپیک یعنی ۷۰ تا ۷۵ (Taylor and McLennan, 1985) قرار می‌گیرد. این مقادیر نشان دهنده هوازگی متوسط تا بالا در منشاء رسوبات سنگ‌مادر هورنفلس‌های مورد مطالعه می‌باشد (شکل c۴). نمودار $Al_2O_3-Na_2O$ + $CaO-K_2O$ (Nesbitt and Young, 1984) که شاخص CIA را نیز در خود دارد (شکل c۴) جهت تعیین منشاء رسوبات حاصل از هوازگی سنگ‌های آذرین به کار برده می‌شود. این نمودار نشان می‌دهد که شیل‌های سنگ‌مادر هورنفلس‌ها در نتیجه هوازگی سنگ‌های آذرین اسیدی شکل گرفته بوده‌اند. Roser و Korsch (۱۹۸۶) شاخص‌های F1 و F2 را جهت تعیین خاستگاه سنگ‌های رسوبی ارائه نموده‌اند که عبارتند از:

$$F3 = (30.638 \times TiO_2 / Al_2O_3) - (12.541 \times Fe_2O_3 / Al_2O_3) + (7.329 \times MgO / Al_2O_3) + (12.031 \times Na_2O / Al_2O_3) + (35.4 \times K_2O / Al_2O_3) - 6.382$$

$$F4 = (56.5 \times TiO_2 / Al_2O_3) - (10.879 \times Fe_2O_3 / Al_2O_3) + (30.875 \times MgO / Al_2O_3) - (5.404 \times Na_2O / Al_2O_3) + (11.11 \times K_2O / Al_2O_3) - 3.89$$

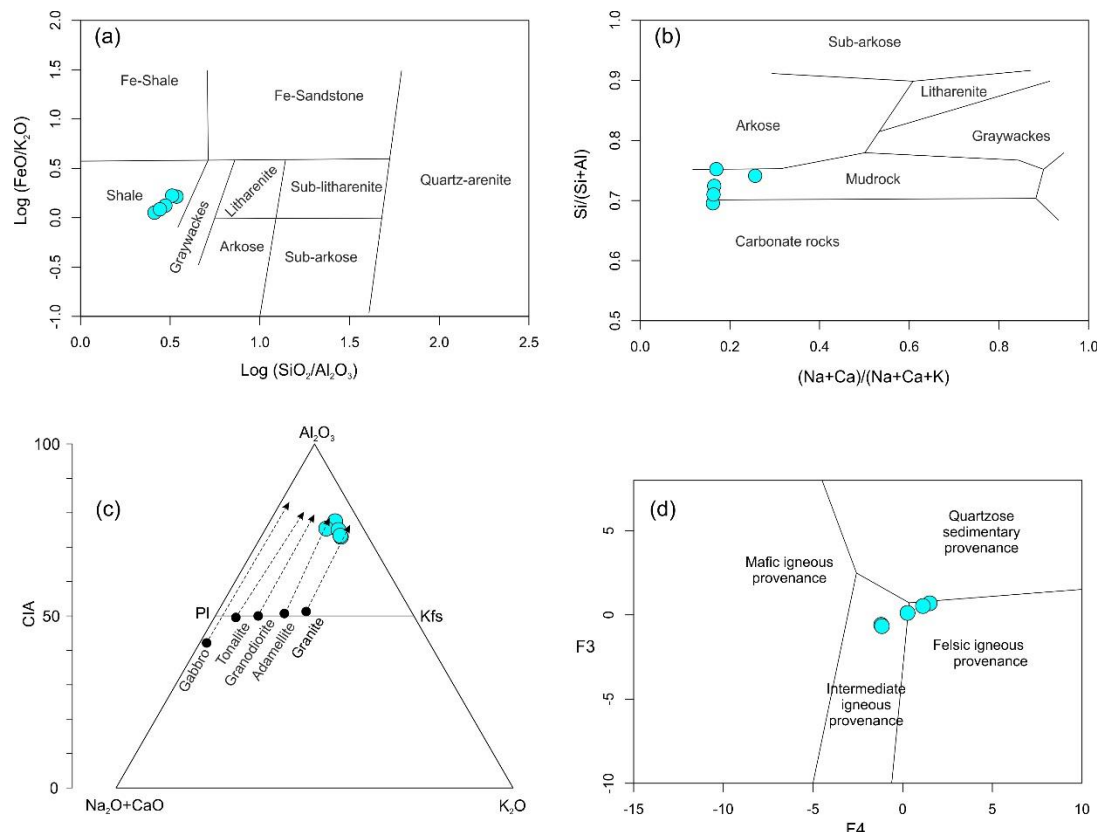
نمودار شکل d۴ با استفاده از این شاخص‌های رسم شده است و همانطور که مشاهده می‌شود در اینجا نمونه‌ها در بخش سنگ‌های آذرین اسیدی تا حد واسط قرار می‌گیرند.

نتایج آنالیزهای شیمیایی گارنت کوردیریت هورنفلس‌های جنوب منطقه سرکان در جدول ۱ ارائه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود تمامی نمونه‌ها غنی از SiO_2 (۵۸/۹ - ۶۵/۸ درصد وزنی)، Al_2O_3 (۱۹/۱ - ۲۲/۸ درصد وزنی)، FeO (۶/۱۴ - ۶/۵۴ درصد وزنی) و K_2O (۳/۷ تا ۵/۸ درصد وزنی) و فقیر از CaO (۰/۳۱ - ۰/۴۹ درصد وزنی) و Na_2O (۰/۵۵ - ۰/۹۶ درصد وزنی) هستند. ویژگی‌های شیمیایی این سنگ‌ها با سنگ‌های پلیتی سازگاری دارد. جهت روشن‌تر شدن نوع سنگ‌مادر این نمونه‌ها، از نمودارهای متمایز کننده استفاده شده است (شکل a۴ و b). نمودار Al_2O_3/SiO_2 در برابر FeO/K_2O (شکل a۴) نشان می‌دهد که این هورنفلس‌ها از دگرگونی یک سنگ‌مادر شیلی حاصل شده‌اند. نمودار نسبت $Ca+Na/Ca+Na+K$ در برابر $Si/Si+Al$ (شکل b۴) نیز این موضوع را اثبات می‌کند که در آن نمونه‌ها در بخش گلسنگ واقع می‌شوند. از مقادیر عناصر اصلی سنگ‌های دگرگونی به شرط آنکه دگرسانی و متاسوماتیسم آن‌ها را تحت تأثیر چندانی قرار نداده باشد می‌توان برای تعیین منشاء رسوبات سنگ‌مادر نیز استفاده نمود (مانند Meres, 2005; Chen et al., 2014; Cisterna et al., 2017). Young (۱۹۸۴) شاخص تغییرات شیمیایی (Chemical Index of Alteration, CIA) را برای بررسی مقدار تغییرات عناصر متحرک در نتیجه هوازگی سنگ‌ها ارائه نموده‌اند. این شاخص عبارت است از $100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$ که در آن مقادیر اکسیدها به صورت نسبت ملکولی لحاظ می‌شود. CaO^* نیز شامل کانی‌های کربنات سنگ نمی‌شود و مخصوص به کلسیم موجود در

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سنگ کل گارنت کوردیریت هورنفلس‌های جنوب منطقه سرکان. مقادیر بر حسب درصد وزنی هستند.

Table 1. Whole-rock chemical composition of garnet cordierite hornfels from south of the Serkan area. Values are in wt%

	S-H-1	S-H-2	S-H-3	S-H-4	S-H-5
SiO ₂	65.83	64.42	58.91	62.25	59.37
TiO ₂	0.88	0.94	0.98	0.93	0.96
Al ₂ O ₃	19.15	19.86	22.78	20.92	21.41
FeO	6.14	6.22	6.54	6.33	6.50
MnO	0.08	0.11	0.17	0.12	0.15
MgO	1.35	1.38	1.97	1.66	1.83
CaO	0.32	0.49	0.31	0.31	0.32
Na ₂ O	0.55	0.96	0.96	0.75	0.87
K ₂ O	3.75	3.71	5.81	4.77	5.34
P ₂ O ₅	0.10	0.09	0.11	0.10	0.11



شکل ۴- (a) تعیین سنگ مادر هورنفلس‌های مورد مطالعه با استفاده از نسبت $\text{Log SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ در برابر $\text{Log FeO}/\text{K}_2\text{O}$ (Herron, 1988)، (b) تعیین سنگ مادر سنگ‌های دگرگونی با استفاده از نسبت عنصری $\text{Ca}+\text{Na}/\text{Ca}+\text{Na}+\text{K}$ در برابر $\text{Si}/\text{Si}+\text{Al}$ (Garrels and McKenzie, 1971)، (c) نمودار $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O} + \text{CaO-K}_2\text{O}$ به همراه شاخص CIA (Nesbitt and Young, 1984) بر حسب نسبت ملکولی هستند و (d) استفاده از شاخص‌های F1 و F2 (به متن مقاله مراجعه شود) در تعیین منشأ رسوبات (Roser and Korsch, 1986).

Fig 2. Identification of the studied hornfels protolith using $\text{Log SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs. $\text{Log FeO}/\text{K}_2\text{O}$ ratio diagram (Herron, 1988), (b) Identification of the studied hornfels protolith using $\text{Ca}+\text{Na}/\text{Ca}+\text{Na}+\text{K}$ vs. $\text{Si}/\text{Si}+\text{Al}$ diagram (Garrels and McKenzie, 1971), (c) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}+\text{CaO-K}_2\text{O}$ diagram and CIA index (Nesbitt and Young, 1984), and (d) using F1-F2 discriminating indices (see the text) to determination of sediments provenance (Roser and Korsch, 1986).

وزنی) و در نمودار تقسیم‌بندی بیوتیت‌ها در محدوده سیدروفیلیت قرار می‌گیرند (شکل ۵a).

گارنت

به منظور بررسی تغییرات شیمیایی گارنت در طی دگرگونی، آنالیزهای گارنت‌ها از مرکز به حاشیه بلورها صورت گرفتند که آنالیزهای نماینده در جدول ۳ ارائه شده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده، مشخص است که این گارنت‌ها چه در مرکز و چه در حاشیه غنی از آلماندین هستند (۰/۶ تا ۰/۸۳ = محتوای آلماندین) و در نمودار سه‌تایی رده‌بندی گارنت‌ها نیز در محدوده آلماندین قرار می‌گیرند (شکل ۵b) و پس از آن اسپسارتین (۰/۰۴ تا ۰/۳) و پیروپ (۰/۰۵ تا ۰/۱) بیشترین مقدار را دارند. البته شایان ذکر است که تغییرات اندکی از مرکز به حاشیه این گارنت‌ها دیده می‌شود که به طور کلی شامل افزایش آلماندین و پیروپ به سمت حاشیه و کاهش همزمان اسپسارتین است.

شیمی کانی‌ها

کردیریت

نتایج آنالیزهای شیمیایی کردیریت‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کردیریت‌ها دارای مقادیر FeO بالاتری (۱۲ تا ۱۲/۵۷ درصد وزنی) نسبت به MgO (۵/۴ تا ۵/۹ درصد وزنی) هستند و از این‌رو در گروه کردیریت‌های غنی از آهن قرار می‌گیرند.

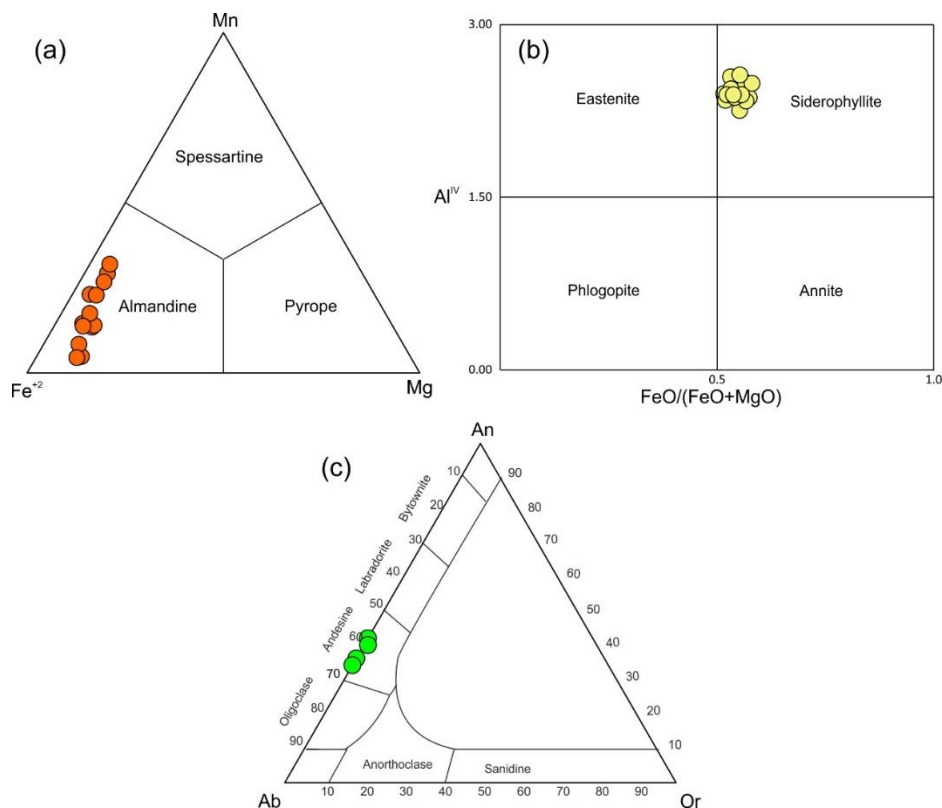
بیوتیت

نتایج به دست آمده از آنالیز بیوتیت‌های مورد مطالعه (جدول ۳) نشان می‌دهند که ترکیب این کانی در نمونه‌ها یکنواخت است. SiO_2 این بیوتیت‌ها از حدود ۳۶/۳ تا ۳۸ درصد وزنی تغییر نموده و در آن‌ها FeO (۱۷/۸ - ۲۰/۶ درصد وزنی) بر MgO (۷/۸ - ۹/۵ درصد وزنی) غلبه دارد. این بیوتیت‌ها از آلومینیوم هم غنی می‌باشند (۱۹/۲ - ۲۰/۸ درصد

پلاژیوکلاز

دیده نشد. محتوای آلبیت از ۰/۵۸ تا ۰/۶۴ و مقدار آنورتیت از ۰/۳۵ تا ۰/۴۳ تغییر می‌کند. بر اساس نمودار رده بندی فلدسپات‌ها، پلاژیوکلازهای مورد مطالعه در محدوده آندزین قرار می‌گیرند (شکل ۵C).

جدول ۲، ترکیب شیمیایی پلاژیوکلاز موجود در کردیریت هورنفلس‌های منطقه سرکان را نشان می‌دهد. این پلاژیوکلازها مقدار سدیم و کلسیم کمابیش برابر است و تغییرات مشخصی از مرکز به حاشیه



شکل ۵- (a) نمودار رده‌بندی بیوتیت‌های مورد مطالعه (Deer et al., 1992)، (b) نمودار رده‌بندی سه‌تایی Mn - Fe - Mg گارنت (Grew et al., 2013) و (c) نمودار رده‌بندی فلدسپات‌ها برای پلاژیوکلازهای مورد مطالعه (Deer et al., 1992).

Fig 3. (a) Classification diagram for the studied biotites (Deer et al., 1992), (b) Ternary Mn-Fe²⁺-Mg discriminating diagram for the garnets (Grew et al., 2013), and (c) feldspar classification diagram for the studied plagioclases (Deer et al., 1992).

جدول ۲- نتایج آنالیزهای شیمیایی کردیریت و پلاژیوکلاز در گارنت کردیریت هورنفلس‌های جنوب سرکان.

Table 2. Chemical compositions of cordierite and plagioclase in garnet cordierite hornfels from south of the Serkan area.

Min	Cordierites										Plagioclases				
	No.	cd-1	cd-2	cd-3	cd-4	cd-5	cd-6	cd-7	cd-8	cd-9	cd-10	Pl-1	Pl-2	Pl-3	Pl-4
SiO ₂	46.31	45.85	45.9	46.28	45.8	46.89	46.09	46.74	45.97	46.79	SiO ₂	60.00	58.35	60.32	59.08
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	31.02	32.43	32.61	31.81	31.33	31.42	32.14	31.73	32.6	31.52	Al ₂ O ₃	26.12	26.62	25.74	26.64
FeO	12.44	12.05	12.25	12.3	12.18	12.57	12.01	12.27	12.56	12.11	FeO	0.01	0.02	0.01	0.01
MnO	0.35	0.36	0.35	0.33	0.37	0.38	0.38	0.35	0.37	0.39	MnO	0.00	0.00	0.00	0.00

MgO	5.76	5.7	5.67	5.41	5.53	5.89	5.85	5.55	5.59	5.51	MgO	0.00	0.00	0.00	0.00
-----	------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	-----	------	------	------	------

ادامه جدول ۲

CaO	0.02	0.02	0	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	0.00	0.01	CaO	7.63	8.98	7.14	8.67
Na ₂ O	0.13	0.13	0.09	0.15	0.12	0.07	0.06	0.11	0.1	0.08	Na ₂ O	7.40	6.86	7.57	6.90
K ₂ O	0.02	0.03	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	K ₂ O	0.05	0.05	0.05	0.08
Totals	96.25	96.81	97.11	96.42	95.53	97.4	96.72	96.88	97.44	96.44	Totals	101.20	100.87	100.82	101.36
Si	4.97	4.88	4.88	4.96	4.95	4.97	4.91	4.98	4.87	5.01	Si	2.66	2.61	2.68	2.62
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Al	1.38	1.41	1.36	1.41
Al	3.93	4.07	4.09	4.02	3.99	3.93	4.04	3.99	4.08	3.98	Ca	0.37	0.44	0.35	0.42
Fe ⁺³	0.16	0.19	0.18	0.10	0.13	0.14	0.15	0.08	0.20	0.03	Na	0.63	0.59	0.65	0.59
Fe ⁺²	0.96	0.88	0.91	1.00	0.97	0.98	0.92	1.02	0.92	1.06	K	0.00	0.00	0.00	0.01
Mn	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	Sum	5.04	5.06	5.04	5.04
Mg	0.92	0.91	0.90	0.86	0.89	0.93	0.93	0.88	0.88	0.88					
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	XAb	0.64	0.58	0.66	0.59
Na	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	XAn	0.37	0.43	0.35	0.41
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	XOr	0.00	0.00	0.00	0.01
Sum	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11					

جدول ۳- نتایج آنالیز شیمیایی بیوتیت های مورد مطالعه در کردیریت گارنت هورنفلس های جنوب سرکان.

Table 3. Chemical compositions of biotite in garnet cordierite hornfelses from south of the Serkan area. Fe# = Fe/(Fe+Mg).

	Bi-1	Bi-2	Bi-3	Bi-4	Bi-5	Bi-6	Bi-7	Bi-8	Bi-9	Bi-10	Bi-11	Bi-12	Bi-13	Bi-14	Bi-15	Bi-16
SiO ₂	37.63	36.63	36.28	37.30	37.91	36.60	37.31	37.80	36.40	36.48	37.81	37.37	37.97	37.75	37.32	37.54
TiO ₂	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.33	1.37	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Al ₂ O ₃	20.15	19.76	20.45	20.00	19.29	19.55	19.17	19.37	19.80	20.81	19.76	19.61	20.25	19.15	19.41	19.39
FeO	17.88	18.30	18.29	17.79	18.35	19.84	19.44	19.71	20.63	19.42	18.42	18.68	18.98	19.83	19.66	19.03
MnO	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.00	0.01	0.03	0.00	0.02	0.01
MgO	9.17	7.78	8.95	9.15	8.39	8.71	9.48	8.59	8.59	8.86	9.36	8.67	9.54	9.40	8.85	9.12
CaO	0.27	0.43	0.89	0.21	0.27	0.06	0.07	0.13	0.19	0.35	0.03	0.03	0.11	0.20	0.02	0.41
Na ₂ O	0.05	0.08	0.13	0.09	0.09	0.41	0.38	0.20	0.08	0.24	0.22	0.59	0.05	0.27	0.35	0.10
K ₂ O	8.69	8.43	7.82	8.78	8.69	9.19	9.25	8.59	7.26	7.51	8.62	9.34	8.29	8.65	9.10	9.72
Total	95.27	92.84	94.23	94.74	94.44	95.83	96.57	95.86	94.33	95.08	95.30	95.38	96.30	96.33	95.81	96.40
Si	5.61	5.63	5.48	5.60	5.72	5.52	5.57	5.65	5.53	5.47	5.65	5.63	5.61	5.63	5.61	5.61
Al ^{iv}	2.39	2.37	2.52	2.40	2.28	2.48	2.43	2.35	2.47	2.53	2.35	2.37	2.39	2.37	2.39	2.39
Al ^{vi}	1.15	1.21	1.13	1.14	1.15	1.00	0.94	1.07	1.07	1.15	1.13	1.11	1.13	0.99	1.05	1.02
Ti	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ادامه جدول ۳

Fe	2.23	2.35	2.31	2.23	2.31	2.50	2.43	2.47	2.62	2.44	2.30	2.35	2.34	2.47	2.47	2.38
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	2.04	1.78	2.02	2.05	1.89	1.96	2.11	1.91	1.95	1.98	2.08	1.95	2.10	2.09	1.98	2.03
Fe#	0.52	0.57	0.53	0.52	0.55	0.56	0.53	0.56	0.57	0.55	0.52	0.55	0.53	0.54	0.55	0.54

جدول ۴- نتایج آنالیز شیمیایی گارنت‌های مورد مطالعه. C: مرکز، R: حاشیه، M: میانه.

Table 4. Chemical compositions of the studied garnets. C: core, R: rim, M: middle.

	C	M	M	R	C	M	R	C	M	R	C	M	M	R
	1-a	1-b	1-c	1-d	2-a	2b.	2-c	1-a	1-b	1-c	2-a	2-b	2-c	2-d
SiO ₂	38.18	39.43	38.76	38.5	36.77	38.12	38.27	37.41	37.23	38.99	37.28	36.87	39.13	37.66
Al ₂ O ₃	20.71	17.99	19.5	21.81	20.91	21.5	21.53	21.5	20.84	20.23	21.22	21.65	22.66	21.15
FeO	26.89	29.98	31.89	33.89	28.12	28.71	33.14	26.02	27.29	30.76	31.2	33.32	35.38	36.45
MnO	11.98	9.41	5.81	1.93	11.3	9.38	2.25	13.03	10.75	5.59	7.15	5.73	3.56	1.9
MgO	1.36	1.04	1.57	2.59	1.24	1.42	2.45	1.18	1.42	2.29	1.68	1.75	2.16	2.5
CaO	1.59	1.62	1.59	1.01	1.53	1.58	1.81	1.59	1.55	1.77	1.71	1.56	2.21	1.01
Na ₂ O	0.00	0.02	0.00	0.01	0.1	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.08	0.05	0.06	0.05
Total	100.71	99.49	99.12	99.74	99.97	100.74	99.48	100.76	99.12	99.67	100.32	100.93	105.16	100.72
Si	3.06	3.21	3.15	3.04	3	3.03	3.04	3	3.03	3.12	3	2.96	2.99	3.02
Al ^{iv}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00
Al ^{vi}	1.96	1.73	1.87	2.05	2.01	2.03	2.03	2.04	2.01	1.91	2.02	2.02	2.04	2
Fe ³⁺	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	1.83	1.99	2.18	2.36	1.93	1.98	2.3	1.79	1.9	2.1	2.13	2.26	2.31	2.46
Mn	0.81	0.65	0.4	0.13	0.78	0.63	0.15	0.88	0.74	0.38	0.49	0.39	0.23	0.13
Mg	0.16	0.13	0.19	0.3	0.15	0.17	0.29	0.14	0.17	0.27	0.2	0.21	0.25	0.3
Ca	0.14	0.14	0.14	0.09	0.13	0.13	0.15	0.14	0.14	0.15	0.15	0.13	0.18	0.09
Sum	7.97	7.9	7.92	7.97	8	7.98	7.97	7.99	7.98	7.94	7.99	8.02	8	7.99
Almandine	62.1	65.6	74	81.94	64.42	67.99	79.42	60.69	64.46	71.92	71.82	75.23	77.84	82.72
Grossular	4.65	2.49	4.94	2.97	4.47	4.61	5.32	4.62	4.58	5.3	4.97	4.53	6.1	2.91
Pyrope	5.54	4.74	6.79	10.6	5.04	5.76	10.02	4.77	5.84	9.54	6.79	7.08	8.3	10.03
Spessartine	27.71	24.35	14.27	4.49	26.08	21.64	5.23	29.92	25.12	13.24	16.42	13.16	7.77	4.33

استفاده شده است (جدول ۴). با توجه به حضور کردیریت در سنگ‌ها، در محاسبات از مجموعه فشارهای ۲ تا ۴ کیلوبار، با تغییرات ۰/۲ کیلوبار برای هر زوج بیوتیت - گارنت استفاده شده است. نتایج این محاسبات، گستره دمای ۵۳۰ تا ۵۹۱ درجه سانتیگراد (میانگین ۵۵۱ درجه سانتیگراد) را برای نمونه‌ها ارائه می‌دهند.

دماسنجی زوج کردیریت - گارنت نیز بر مبنای تبادل کاتیون‌های آهن و منیزیم بین زوج کانی‌های گارنت و کردیریت هم پاراژنز ارائه شده است. عدم حضور بافت‌های واکنشی در حاشیه گارنت و کریست‌های نمونه‌های

برآورد دما و فشار دگرگونی

با توجه به کانی‌های آنالیز شده در تعادل در این نمونه‌ها، در اینجا از روش‌های دماسنجی گارنت - کردیریت و گارنت - بیوتیت و روش فشارسنجی گارنت - بیوتیت - پلاژیوکلاز- کوارتز استفاده شده است. در دماسنجی زوج گارنت - بیوتیت که بر اساس تبادل کاتیون‌های آهن و منیزیم بین دو کانی گارنت و بیوتیت بنا شده است، روابط بسیاری تا کنون ارائه شده که در اینجا از روش Holdaway (۲۰۰۰) برای محاسبات

دگرگون شده‌اند. این مقادیر در محدوده خطای تقریبی روش گارنت - بیوتیت قرار می‌گیرد.

فشارسنجی به روش گارنت - بیوتیت - پلاژیوکلاز - کوارتز (Wu et al., 2004) از محاسبات پیچیده‌تری جهت تخمین دمای مجموعه در تعادل گارنت - بیوتیت - پلاژیوکلاز استفاده می‌کند. نتایج این محاسبات نیز در جدول ۴ ارائه شده‌اند. فشارهای به دست آمده از ۲ تا ۳/۶ کیلوبار تغییر می‌کنند و میانگین آن برابر با ۲/۹ کیلوبار می‌باشد.

مورد مطالعه، امکان استفاده از این روش را مهیا می‌سازد. در اینجا از رابطه ارائه شده توسط (Holdaway and Lee, 1977) برای محاسبه استفاده شده است. نتایج حاصل از این محاسبات برای زوج کانی‌های گارنت - کوردیریت در جدول ۴ ارائه شده‌اند. لازم به توضیح است که با فرض متعادل بودن کوردیریت با ترکیب حاشیه گارنت‌ها، در این محاسبات از آنالیز این نقاط استفاده شده است. محاسبات نشان می‌دهند که هورنفلس‌های مورد مطالعه در دمای ۵۷۰ تا ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد

جدول ۵- نتایج محاسبات دما و فشارسنجی نمونه‌های مورد مطالعه. فشار برحسب کیلو بار و دما برحسب درجه سانتی‌گراد است. علامت - نشان می‌دهد که از این کانی در محاسبه استفاده نشده است.

Table 5. The results of thermobarometry calculations for the studied samples. The pressures and temperatures are in kbar and °C, respectively. The sign - show that this minerals was not used in the calculations.

	Gr-Bi	Gr-Cd	Gt-Bi-Pl-Qz
Gt-Bi-1	563.91	585.57	2.06
Gt-Bi-2	590.95	570.63	3.63
Gt-Bi-3	580.01	563.27	-
Gt-Bi-4	547.42	584.68	2.21
Gt-Bi-5	579.87	560.24	3.44
Gt-Bi-6	584.75	594.86	-
Gt-Bi-7	578.67	-	-
Gt-Bi-8	568.43	-	3.02
Gt-Bi-9	592.98	-	-
Gt-Bi-10	580.41	-	-
Gt-Bi-11	574.97	-	2.89
Gt-Bi-12	560.41	-	3.57
Gt-Bi-13	566.01	610.84	-
Gt-Bi-14	573.44	595.62	-
Gt-Bi-15	591.93	604.60	2.54
Gt-Bi-16	554.27	600.30	2.76

بحث

نمودار سودوسکشن

این نمودار بر اساس حضور اکسیدهای Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , K_2O , FeO , MgO و MnO به همراه آب عنوان سیال (MnNCKFMASH) ترسیم شده است. محاسبات مربوطه با استفاده از نرم افزار Perple_x (Connolly, 2005) نسخه 6.9.0 ارائه شده در 2020.6.21 (<http://www.perplex.ethz.ch>) و پایگاه داده‌های تعبیه شده در آن انجام صورت پذیرفت. همچنین از مقادیر میانگین آنالیزهای نمونه‌ها (جدول ۱) برای محاسبه استفاده شد. در این نمودار، محدوده‌های پرنگ‌تر از متغیرهای کمتری برخوردارند و احتمال پیش بینی آنها قوی‌تر است. پایداری دمایی

کانی‌های موجود در یک سنگ دگرگونی در نتیجه رخداد مجموعه‌ای از واکنش‌ها شکل می‌گیرند. مجموعه کانی‌شناسی نمونه‌های مورد مطالعه شامل کوردیریت + گارنت + بیوتیت + پلاژیوکلاز پتاسیم‌فلدسپار نشان می‌دهد که دگرگونی آن‌ها می‌بایستی در حدود شرایط رخساره هورنبلند - هورنفلس بالایی رخ داده باشد. نتایج دما و فشارسنجی نیز این موضوع را تا حد زیادی تأیید می‌کند. در اینجا، به‌منظور دریافت درک بهتر از روند دگرگونی گارنت کوردیریت هورنفلس‌های جنوب سرکان، از نمودارهای تعادل فازی استفاده می‌شود (شکل ۶).

شدن آن در طی چنین واکنش هایی می باشد. گواه دیگر بر این واکنش، حضور میانبرهای کوچک بیوتیت در حاشیه و بخش های میانی پورفیروبلاست های کردیریت می باشد (شکل ۳). این نتیجه گیری با نمودار سودوسکشن همخوانی دارد که در آن دریک فشار ثابت (به طور مثال ۲ کیلو بار)، کانی های بیوتیت و مسکوویت و آندالوزیت با کردیریت جایگزین می شوند (شکل ۵).

حال باید رخداد مجموعه گارنت + کردیریت مورد بررسی قرار گیرد. بنابر مطالعات صورت گرفته بر روی پایداری کردیریت های آهن و منیزیم در متاپلیت های درجه بالا، گارنت آلماندین تنها زمانی می تواند با کردیریت رخداد داشته باشد که یا (۱) سنگ در شرایط پایداری مسکوویت بوده و مقدار K_2O آن کم باشد و یا (۲) محتوای منگنز و کلسیم گارنت به حدی باشد که سبب پایداری آن گردد (Osberg, 1977; Holdaway and Lee, 1971). همچنین Bucher و Grapes (۲۰۱۱) اظهار داشته اند که بالا رفتن محتوای منیزیم کردیریت، پایداری فشاری آن را افزایش می دهد. حضور منیزیم در کردیریت های مورد مطالعه و منگنز در گارنت ها مورد مطالعه، اسباب پایداری آنها در دما و فشارهای یکسان به همراه هم را فراهم می کند.

موضوع دیگری که می بایست در مورد تشکیل مجموعه های گارنت + کردیریت مدنظر قرار گیرد این است که کاهش فشار در طی دگرگونی نیز می تواند سبب جایگزینی گارنت با کردیریت شود (García-Casco et al., 1999). نفوذ توده های آذرین در توالی سنگ های رسوبی یا دگرگونی سبب برآمدگی منطقه و بالا آمدن سنگ های بخش های بالایی (سقف) و تا حدی اطراف توده می شوند (Scudder, 2018). این موضوع نه تنها موجب افزایش دما در سنگ های میزبان شده، بلکه آن ها را به سطوح بالاتر پوسته نیز منتقل می نماید که سبب کاهش فشار همراه با افزایش دما می گردد. این پدیده به خصوص در مورد نفوذی های کم عمق تر بیشتر رخ می دهد چراکه در آن ها فشار کمتری بر روی سنگ های بالایی قرار داشته و راحت تر جابجا می شوند (Acocella, 2000; Yoshinobu et al., 2003). رخداد بالا آمدگی و پلوتونیسیم در بخش شمالی پهنه سندنج - سیرجان در دوره ژوراسیک گزارش شده است (Mohajjel and Fergusson, 2014). علاوه بر آن، نتایج بررسی های تکتونیکی از طریق تصاویر ماهواره ای نیز رخداد بالا آمدگی در نتیجه نفوذ توده های آذرین کم عمق در بخش های غربی و جنوب غربی منطقه همدان (نزدیک به منطقه مورد مطالعه) را اثبات نموده اند (Chegini et al., 2015). اگرچه در حال حاضر، داده کافی جهت اثبات قطعی این موضوع وجود ندارد اما می تواند موضوع مطالعات آینده باشد.

محدوده های کردیریت دار از حدود دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد آغاز شده و تا حد ذوب بخشی (در اینجا نشان داده نشده است) ادامه می یابند. پایداری فشاری این مجموعه ها نیز از ۵۰۰ بار تا ۳۵۰۰ بار می باشد.

هیچ محدوده ای در این نمودار، به طور همزمان محتوی گارنت و کردیریت نیست و از سوی دیگر میانگین فشار به دست آمده از محاسبات فشارسنجی گارنت - بیوتیت - پلاژیوکلاز (نماد ستاره در شکل ۵) نه در محدوده پایداری گارنت قرار می گیرد و نه کردیریت. این موضوع نشان می دهد که مجموعه کانی کردیریت + گارنت + بیوتیت + پلاژیوکلاز + پتاسیم فلدسپار در هورنفلس های مورد مطالعه در شرایط فشاری انتقالی بین تشکیل گارنت و کردیریت شکل گرفته است. در متاپلیت ها، گارنت می تواند با مصرف مسکوویت، کلریت و کوارتز در شرایط ابتدای رخساره هورنفلد - هورنفلس شکل بگیرد (واکنش ۱).

واکنش ۱: مسکوویت + کلریت + کوارتز = گارنت + بیوتیت + آب
گارنت شکل گرفته در این شرایط دارای ترکیب غنی از اسپسارتین می باشد. در نمونه های مورد مطالعه این واکنش تا مصرف کامل مسکوویت و کلریت پیش رفته است چرا که در این دو کانی در مجموعه پیش رونده دیده نمی شوند (شکل ۳). شاهد بافتی دیگر رخداد این واکنش را می توان در میانبرهای کوچک بیوتیت در گارنت ها (شکل ۳) یافت. تشکیل گارنت از طریق این واکنش در آنالیزهای گارنت های مورد مطالعه قابل مشاهده است که در آن ها مقدار اسپسارتین بالاتر از حاشیه می باشد (جدول ۳). این روند، با افزایش آلماندین و پیروپ از مرکز به حاشیه گارنت ها ادامه می یابد که با تشکیل در طی دگرگونی پیش رونده است سازگاری دارد (Tracy et al., 1976).

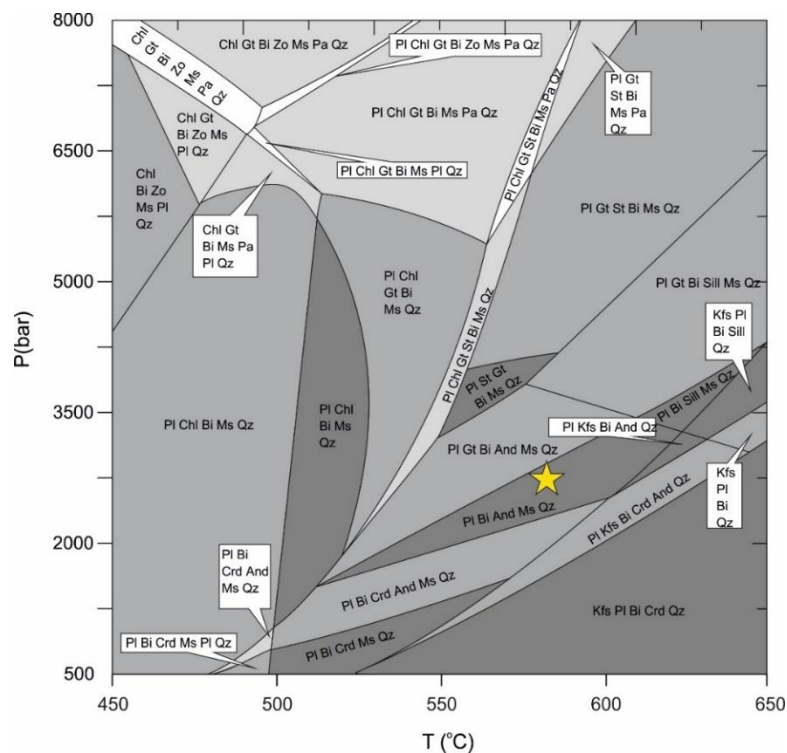
کردیریت هم می تواند در این سنگ ها در نتیجه جانشینی کانی هایی مانند آندالوزیت و بیوتیت در طی افزایش دما رد یک فشار ثابت تشکیل شود:

واکنش ۲: کلریت + آندالوزیت + کوارتز = کردیریت + آب

واکنش ۳: بیوتیت + آندالوزیت + کوارتز = کردیریت + پتاسیم فلدسپار + آب

واکنش ۴: بیوتیت + مسکوویت + کوارتز = کردیریت + پتاسیم فلدسپار + آب

حضور هورنفلس های آندالوزیت دار در فاصله بیشتر نسبت به مرز هورنفلس - توده آذرین در این منطقه (شکل ۱)، رخداد این واکنش ها را تأیید می نماید. در واقع با نزدیک تر شدن به توده، در یک فشار ثابت مجموعه کانی آندالوزیت + بیوتیت + مسکوویت به کردیریت + بیوتیت + پتاسیم فلدسپار تبدیل شده است. نبود آندالوزیت یا حضور به ندرت آن در مجموعه کانی شناسی هورنفلس های مورد مطالعه، موید مصرف



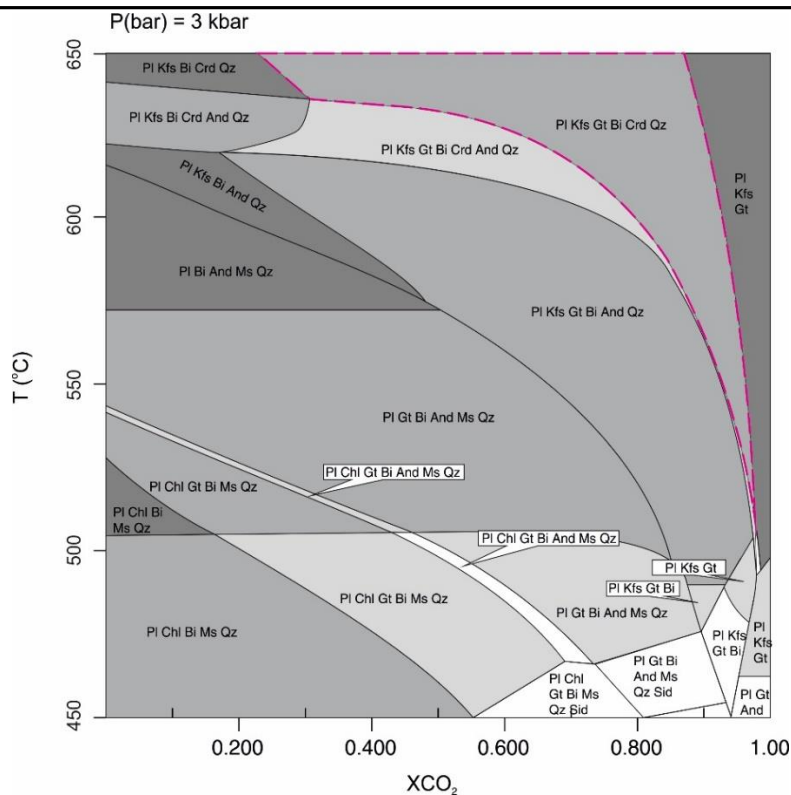
شکل ۵ - نمودار سودوسکشن محاسبه شده در سیستم MnNCKFMASH برای گارنت کردیریت هورنفلس‌های جنوب سرکان با فرض سیال به عنوان آب خالص. نماد ستاره، مقدار میانگین دما - فشار به دست آمده از روش‌های دما و فشارسنجی را نشان می‌دهد.

Fig 4. Equilibrium phase diagram in a MnNCKFMASH system for the garnet hornfels from south of the Serkan area. The fluid was considered as pure H₂O. The star symbol shows average P-T estimations of the thermobarometry methods.

این گذشته، حضور میان لایه‌های ماری و آهکی در توالی دگرگونی منطقه همدان (Miri et al., 2016) نیز می‌توانسته به عنوان منبعی برای تأمین CO₂ سیال دگرگونی عمل نماید. تغییرات مقادیر کانی‌ها در طی تغییرات شرایط دگرگونی اعم از دما، فشار و سیالات توسط نرم افزار *Perple_x* قابل بررسی می‌باشد. با استفاده از این ویژگی می‌توان پیشبینی نمود که درصد حجمی کانی‌ها در طی دگرگونی چه تغییراتی خواهند داشت. به منظور بررسی تأثیر ترکیب سیال بر حضور کانی‌های گارنت و کردیریت، درصد حجمی آنها برای نمودار فازی شکل ۷ محاسبه و ترسیم شد (شکل ۸). همانطور که در شکل مشخص است، در دماهای بالاتر از ۶۲۰ درجه سانتیگراد، مقدار کردیریت در سنگ افزایش می‌یابد. همچنین افزایش کربن دی‌اکسید نیز سبب این افزایش می‌شود. در عوض گارنت در دماهای پائین‌تر و در حضور آب خالص نیز رخداد دارد اما حضور آن به همراه کردیریت در دمای حدود ۶۲۰ درجه سانتیگراد و ترکیب سیال آب - کربندی‌اکسید مسیر می‌گردد. در این دمای ثابت، مقدار گارنت نیز با افزایش مقدار کربن دی‌اکسید زیاد می‌شود.

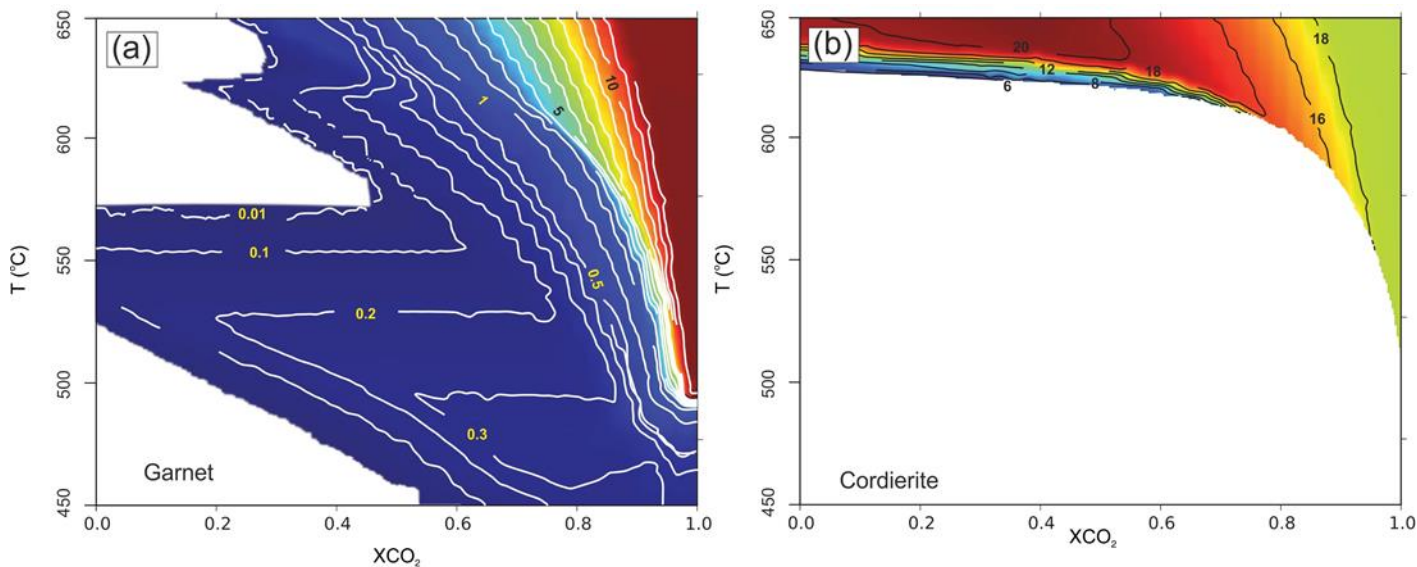
بررسی تأثیر ترکیب سیال دگرگونی

Holdaway و Lee (۱۹۷۷) از طریق بررسی‌های تجربی دریافتند که مجموعه آلماندین + کردیریت + پتاسیم‌فلدسپار در حضور آب خالص پایدار نبوده و دچار ذوب بخشی می‌شود. در واقع، محتوای کربن دی‌اکسید (CO₂) سیال نیز می‌تواند در پایداری کردیریت مؤثر باشد (مانند Harley et al., 2002). جهت بررسی این موضوع در مورد هورنفلس‌های مورد مطالعه، یک نمودار سودوسکشن بر اساس تغییرات مقدار CO₂ با دما در فشار ثابت ۳ کیلوپا محاسبه و ترسیم شد (شکل ۷). همانطور که مشاهده می‌شود، مجموعه‌های گارنت و کردیریت‌دار در این نمودار حضور دارند و زمانی پایدار می‌شوند که مقدار CO₂ در سیال به حدود ۰/۱۸ برسد، البته در دماهای بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد. بر این اساس، حضور مقادیری از کربنات کلسیم در محیط دگرگونی و یا سنگ‌مادر می‌تواند سبب ایجاد CO₂ در سیال شود. آنالیزهای شیمیایی هورنفلس‌های مورد مطالعه حاوی مقادیر اندکی CaO هستند و این سبب شده است که در نمودار تعیین سنگ‌مادر در مرز سنگ‌های کربناتی و گلسنگ قرار بگیرند (شکل ۴b). از



شکل ۷- نمودار سودوسکشن دما - کربن دی اکسید محاسبه شده برای هورنفلس‌های مورد مطالعه. خط چین محدوده پایداری مجموعه کوردیریت + گارنت + بیوتیت + پلاژیوکلاز + پتاسیم‌فلدسپار را نشان می‌دهد.

Fig 5. Equilibrium T-XCO₂ phase diagram calculate for the studied hornfelses. The dash-line shows stability field of the cordierite + garnet + biotite + plagioclase + K-feldspar assemblage.



شکل ۶- تخمین تغییرات درصد حجمی کانی‌های گارنت و کوردیریت در نمودار سودوسکشن دما - کربن دی اکسید محاسبه شده برای هورنفلس‌های مورد مطالعه. اعداد نشان دهنده مقادیر درصد حجمی هستند.

Fig 6. Estimation of vol% variations for garnet and cordierite on the T-XCO₂ diagram calculated for the studied hornfelses. The numbers are vol%

نتیجه گیری

حاصل هوازدگی سنگ‌های آذرین فلسیک بوده است. نمودارهای تعادل فازی محاسبه شده برای این هورنفلس‌ها نشان می‌دهد که تشکیل مجموعه‌های پایدار گارنت + کوردیریت در نتیجه مقادیر مناسب منگنز و کلسیم در ترکیب گارنت و منیزیم در کوردیریت بوده است. همچنین حضور کربن‌دی‌اکسید به عنوان بخشی از فاز سیال نقش مهمی در تشکیل و پایداری این مجموعه پیش از رخداد ذوب بخشی در منطقه داشته است.

مطالعات سنگ‌نگاری و آنالیز شیمیایی هورنفلس‌های جنوب سرکان نشان می‌دهند که این سنگ‌ها محتوی مجموعه کانی‌شناسی کوردیریت + گارنت + بیوتیت + پلاژیوکلاز و پتاسیم‌فلدسپار هستند که در دما ۵۵۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد و فشارهای کمتر از ۳ کیلو بار از یک سنگ‌مادر متاپلیتی با مقدار ناخالصی کربنات کلسیم تشکیل شده‌اند که احتمالاً

منابع

- Acocella, V., 2000. Space accommodation by roof lifting during pluton emplacement at Amiata (Italy). *Terra Nova* 12, 149-55
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229(3-4), 211-38.
- Amidi, M., Majidi, B., 1977. Geology map of Hamedan (1: 250,000). Geological Survey of Iran, Tehran.
- Azizi, H., Nouri, F., Stern, R.J., Azizi, M., Lucci, F., Asahara, Y., Zarinkoub, M.H., Chung, S.L., 2018. New evidence for Jurassic continental rifting in the northern Sanandaj Sirjan Zone, western Iran: The Ghalaylan seamount, southwest Ghorveh: *International Geology Review* 62, 1335 – 1657.
- Baharifar, A., Moinevaziri, H., Bellon, H., Piqué, A., 2004. The crystalline complexes of Hamadan (Sanandaj–Sirjan zone, western Iran): metasedimentary Mesozoic sequences affected by late cretaceous tectono-metamorphic and plutonic events. *CR Geoscience* 336, 1443–1452.
- Berberian, M., King G., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: Reply. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18(11), 1764.
- Bucher, K., Grapes, R., 2011. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*, Springer, p.428.
- Chegini, A., Sorbi, A., Arian, M., 2015. Active Tectonics of Hamedan Area, West Iran. *International Journal of Geography and Geology* 4(6), 109-28.
- Chen, M., Sun, M., Cai, K., Buslov, M., Zhao, G., Rubanova, E.S., 2014. Geochemical study of the Cambrian-Ordovician meta-sedimentary rocks from the northern altai-mongolian terrane, northwestern Central Asian Orogenic Belt: Implications on the provenance and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences* 96, 69-83.
- Cisterna, C.E., Altenberger, U., Mon, R., Günter, C., Gutiérrez, A., 2017. The metamorphic basement of the southern Sierra de Aconquija, Eastern Sierras Pampeanas: Provenance and tectonic setting of a Neoproterozoic back-arc basin. *Journal of South American Earth Sciences* 82, 292-310.
- 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.
- Deer, W.A., Howie R.A., Zussman J., 1992. *An Introduction to the Rock Forming Minerals*, Longman, London, p. 528.
- Fergusson, C., Nutman, A.P., Mohajjel, M., Bennet, V.C. 2016. The Sanandaj–Sirjan Zone in the Neo-Tethyan suture, western Iran: Zircon U–Pb evidence of late Palaeozoic rifting of northern Gondwana and mid-Jurassic orogenesis. *Gondwana Research* 40, 43-57.
- García-Casco, A., Torres-Roldán, R.L., 1999. Natural metastable reactions involving garnet, staurolite and cordierite: implications for petrogenetic grids and the extensional collapse of the Betic-Rif Belt. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 136, 131-53.
- Garrels, R.M., McKenzie, F.T., 1971. *Evolution of sedimentary rocks*. Norton, New York, p. 397.
- Ghasemi, A., Talbot, C.J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 26, 683-93.
- Grew, E.S., Locock, A.J., Mills, S.J., Galuskina, I.O., Galuskin, E.V., Hålenius, U., 2013. Nomenclature of the garnet supergroup. *American Mineralogist* 98, 785-811.
- Harley, S.L., Thompson, P., Hensen, B. J., Buick, I. S., 2001. Cordierite as a sensor of fluid conditions in high-grade metamorphism and crustal anatexis. *Journal of Metamorphic Geology* 20, 71-86.
- Hassanzadeh, J., Wernicke, B., 2016. The Neotethyan Sanadaj–Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin–arc transitions. *Tectonics* 35, 586–621.

- Herron, M.M., 1988. Chemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Petrology* 58, 820-829.
- Holdaway, M., Lee, S.M., 1977. Fe-Mg cordierite stability in high-grade pelitic rocks based on experimental, theoretical, and natural observations. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 63, 175-98.
- Holdaway, M.J., 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer. *American Mineralogist* 85, 881-892.
- Kitamura, M., Yamada, H., 1987. Origin of sector trilling in cordierite in Daimonji hornfels, Kyoto, Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 97, 1-6.
- Mahmoudi, S., Corfu, F., Masoudi, F., Mehrabi, B., Mohajjel, M., 2011. U-Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 41, 238-249.
- Mahmoudi, Sh., Baharifar, A., 2018. Phase equilibria and P-T-t path of metapelitic rocks in SE-Hamedan, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Mineralogy and Petrology* 113, 135-154.
- Meres, S., 2005. Major, trace element and REE geochemistry of metamorphosed sedimentary rocks from the Malé Karpaty Mts. (Western Carpathians, Slovak Republic), Implications for sedimentary and metamorphic processes. *Slovakia Geology Magazine* 11, 107 - 122.
- Miri, M., Sepahi, A., Aliani, F., Maanijou, M., 2016. Chemical zoning of Ca-amphiboles in amphibolites, from the Hamedan area, West Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 9(13), 619.
- Mohajjel, M., Fergusson, C., 2014. Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. *International Geology Reviews* 56, 263-287.
- Mohajjel, M., Fergusson, C., Sahandi, M., 2003. Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21, 397-412.
- Monfaredi, B., Hauenberger, C., Neubauer, F., Schulz, B., Genser, J., Shakerdakani, F., Halama, R., 2020. Deciphering the Jurassic-Cretaceous evolution of the Hamadan metamorphic complex during Neotethys subduction, western Iran. *International Journal of Earth Sciences* 109, 2135-2168.
- Nesbitt, H., Young, G., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48, 1523-1534.
- Osberg, P.H., 1971. An equilibrium model for Buchan-type metamorphic rocks south-central Maine. *American Mineralogist* 56, 569-576.
- Roser, B.P., Korsch, R.J., 1986. Determination of Tectonic Setting of Sandstone-Mudstone Suites Using, Content and, Ratio. *Journal of Geology* 94, 635-650.
- Saki, A., 2017. The difference between metamorphic series in the metapelitic rocks of south and north of Alvand Batholith, Hamadan. *Iranian Journal of Geology* 11, 83-97.
- Saki, A., Miri, M., Oberhansli, R., 2020. High temperature - low pressure metamorphism during subduction of Neo-Tethys beneath the Iranian plate: Evidence for mafic migmatite formation in the Alvand complex (western Iran). *Mineralogy and Petrology* 114, 539-557.
- Saki, A., Moazzen, M., and Baharifar, A., 2012. Migmatite microstructures and partial melting of Hamadan metapelitic rocks, Alvand contact aureole, western Iran. *International Geology Reviews* 54, 1229-1240.
- Scudder, C., 2018. Structure and Emplacement of the Eocene Golden Horn Batholith, North Cascades, Washington. M.Sc thesis, San José State University, San Jose, California.
- Sepahi, A.A., Borzoei, K., Salami, S., 2013. Mineral chemistry and thermobarometry of plutonic, metamorphic and anatectic rocks from the Tueyserkan area (Hamedan, Iran). *Geological Quarterly* 57, 515-526.
- Sepahi, A.A., Jafari, S.R., and Mani-Kashani, S., 2009. Low pressure migmatites from the Sanandaj-Sirjan Metamorphic Belt in the Hamedan region, Iran. *Geologica Carpathica* 602, 107-119.
- Sepahi, A.A., Jafari, S.R., Osanai, Y., Shahbazi, H., Moazzen, M., 2019. Age, petrologic significance and provenance analysis of the Hamedan low pressure migmatites, Sanandaj-Sirjan zone, west Iran. *International Geology Review* 61, 1446-61.
- Sepahi, A.A., Salami, S., Lentz, D., McFarlane, C., Maanijou, M., 2018. Petrography, Geochemistry and U-pb Geochronology Of Pegmatites and Aplites Associated with The Alvand Intrusive Complex in The Hamedan Region, Sanandaj-sirjan Zone, Zagros Orogen (Iran). *International Journal of Earth Sciences* 107, 1059-1096.
- Sepahi, A.A., Shahbazi, H., Siebel, W., Ranin, A., 2014. Geochronology of plutonic rocks from the Sanandaj-Sirjan zone, Iran and new zircon and titanite U-Th-Pb age for granitoids from the Marivan pluton, *Geochronometria* 413, 207-215.

- Sepahi, A.A., Vahidpour, H., Lentz, D.R., McFarlane, C.M., Maanijou, M., Salami, S., Miri, M., Mansouri, M., Mohammadi, R., 2020. Rare sapphire-bearing syenitoid pegmatites and associated granitoids of the Hamedan region, Sanandaj–Sirjan zone, Iran: analysis of petrology, lithogeochemistry and zircon geochronology / trace element geochemistry. *Geological Magazine* 157, 1499-1525.
- Sepahi, A.A., Whitney, D.L., Baharifar, A.A., 2004. Petrogenesis of andalusite–kyanite–sillimanite veins and host rocks, Sanandaj–Sirjan metamorphic belt. Hamadan, Iran. *Journal of Metamorphic Geology* 22, 119-134.
- Shahbazi, H., Siebel, W., Pourmoafee, M., Ghorbani, M., Sepahi, A., Shang, C., 2010. Geochemistry and U–Pb zircon geochronology of the Alvand plutonic complex in Sanandaj–Sirjan Zone (Iran): New evidence for Jurassic magmatism. *Journal of Asian Earth Sciences* 39(6), 668-83.
- Stöcklin, J., Nabavi, M.H., 1973. Tectonic Map of Iran: Geological Survey of Iran, scale 1:2 500 000.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford University, Oxford, p. 312.
- Tracy R.J., Robinson, P., Thompson, A.B., 1976. Garnet composition and zoning in the determination of temperature and pressure of metamorphism, central Massachusetts. *American Mineralogist* 61, 762-75.
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95, 185–187.
- Wu, C., Zhang, J., Ren L., 2004. Empirical Garnet–Biotite–Plagioclase–Quartz (GBPQ) Geobarometry in Medium- to High-Grade Metapelites. *Journal of Petrology* 45, 1907–1921.
- 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 Neo-Tethys beneath the Iran microplate. *Gondwana Research* 62, 246-268.
- Yoshinobu, A.S., Fowler, T.K., Paterson, S.R., Llambias, E., Tickyj, H., Sato, A.M., 2003. A view from the roof: magmatic stoping in the shallow crust, Chita pluton, Argentina. *Journal of Structural Geology* 25, 37-48.



©2022 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.