

## Study of the formation conditions and gemology potential of cordierite, kyanite and andalusites in the alteration halo of Alvand Batholith, Hamedan, Iran

Adel Saki <sup>1\*</sup>, Alireza Zarasvandi <sup>1</sup>, Fatemeh Mazraeh <sup>1</sup>

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

**Keywords:** Sanandaj-Sirjan Zone, Hamedan, Cordierite, Kyanite, Chiastolite, Gemstone

### 1-Introduction

The study area is located in the metamorphic aureole of Alvand Complex Hamedan province. Structurally, the study area is placed in the Sanandaj-Sirjan metamorphic zone. The Zagros formed during the subduction of a Neo-Tethyan seaway and subsequent oblique collision of Afro-Arabia (Gondwana) with the Iranian microcontinent in the Late Cretaceous–early Tertiary (Alavi, 1994; Mohajjel and Fergusson, 2000). Crustal shortening associated with subduction and collision metamorphosed and deformed Late Palaeozoic and Mesozoic sedimentary rocks, including a sequence of pelitic, psammitic, mafic, calc-pelitic, and calc-silicate rocks near Hamadan. The tectonic evolution of the Sanandaj–Sirjan belt involved continental arc magmatism followed by collision. Mafic to intermediate plutonic bodies (olivine gabbro, gabbro, gabbro-norite, diorite, quartz diorite, and tonalite) are older than crustal derived granitic plutons in the region (Alvand Plutonic Complex), but all intrusions formed during Cretaceous-Tertiary subduction and collision (Baharifar et al., 2004). All metamorphic rocks in the area were regionally metamorphosed before the contact metamorphism up to greenschist to amphibolite facies underwent contact metamorphism due to the emplacement of the Alvand Complex. In the Hamadan metamorphic sequence, cordierite and K-feldspar, are only found near (<3 km from) the Alvand granite. The general trend of increasing metamorphic grade is towards the pluton, with a succession of isograds in metapelitic rocks: biotite-in, garnet-in, andalusite-in, staurolite-in, cordierite-in, K-feldspar-in and spinel-in. In some parts of the field area, the complete sequence occurs, but in other areas, some of the lower grade zones are missing.

### 2-Methodology

In the selected sample, major element compositions of biotite, garnet, spinel, plagioclase, cordierite, and ilmenite were determined by wavelength-dispersive spectrometry using a Cameca SX100 microprobe. The operational conditions were 15 kV, 10-20 nA specimen current. The analytical spot diameter was set between 3 and 5  $\mu\text{m}$ , keeping the same current conditions — natural and synthetic standards used for calibration.

### 3-Result and discussion

The cordierites in the mesosome of the migmatites have coarse crystals and are accompanied by spinel (lal), which has formed due to the increasing of metamorphism temperature and partial melting processes. The molar fraction ( $X_{\text{mg}}$ ) of cordierite increases with the increasing degree of metamorphism from the zone of K-feldspar-cordierite to spinel- cordierite (0.45 to .620). The approximate temperature for the cordierites in the mesosome of the migmatites is estimated to be 750 °C, and the pressure is ~ 4 kb. Kyanite is specifically hosted by quartz veins in the region, also is found in the adjacent of

\* Corresponding author: adel - saki@yahoo.com

DOI: 10.22055/aag.2019.28506.1938

Received 2019-02-06

Accepted 2019-04-27

metamorphosed rocks and in the vicinity of veins. The existence of kyanite veins indicates that it's not limited to high-pressure facies, but may be formed by hydrothermal pressures. Chialstolite with 20 cm long and 4 cm wide is the main outcrop of the Chialstolite schists around Zaman –bad. According to the results of geothermobarometry, the temperature and pressure of Chialstolie schists are 628 ° C, and pressure is about 4 kbar. According to gemology studies, cordierites are suitable for cabochon and fantasy cut, the high level resistant of this minerals while cutting is affected by high-grade metamorphism. Kyanites are suitable for cabochon, fantasy, and fast cut because they have a transparent nature. Finally, chialstolites have transcosal-to-opacic clarity and should behave cabochon. In this study, the gemstone map of the Hamedan region is provided.

#### 4-Conclusion

According to gemology studies, cordierites are suitable for cabochon and fantasy cut, the high level resistant of this minerals during cutting is affected by high grade metamorphism. Kyanites are suitable for cabochon, fantasy and fast cut because they have a clear nature. Finally, chialstolites have transcosal-to-opacic clarity, and should be have cabochon. In this study gemstone map of the Hamedan region is provided.

#### References

- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros Orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211–238.
- Baharifar, A., Moinevaziri, H., Bellon, H. Pique, A., 2004. The crystalline complexes of Hamadan (Sanandaj-Sirjan zone, western Iran): Metasedimentary Mesozoic sequences affected by Late Cretaceous tectono-metamorphic and plutonic events, II. 40K - 40Ar dating. *Comptes Rendus Geoscience* 336, 1443-1452.
- Berberian, M., King, G. C., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210–265.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sandandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Structural Geology* 22, 1125–1139.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Saki, A., Zarasvandi, A., Mazraeh, F., 2020. Study of the formation conditions and gemology potential of cordierite, kyanite and andalusites in the alteration halo of Alvand Batholith, Hamedan, Iran. *Adv. Appl. Geol.* 9(4), 440- 453.

DOI: 10.22055/AAG.2019.28506.1938

url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_15071.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_15071.html?lang=en)

## مطالعه شرایط تشکیل و پتانسیل گوهرشناسی کردیریت، کیانیت و آندالوزیت‌های موجود در هاله دگرگونی

### کمپلکس الوند، همدان، ایران

عادل ساکی\*

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

علیرضا زراسوندی

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

فاطمه مزرعه

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

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۷

\*adel - saki@yahoo.com

### چکیده

منطقه مورد مطالعه در هاله دگرگونی باتولیت الوند، استان همدان، واقع شده است. کردیریت‌های موجود در موزوم میگماتیت‌های منطقه بسیار درشت بلور می‌باشند و همراه با اسپینل (لعل) هستند که بالا رفتن دمای دگرگونی و پدیده ذوب بخشی سبب رشد آنها شده است. مقدار کسر مولی منیزیم (XMg) کردیریت با افزایش درجه دگرگونی از زون فلدسپار پتاسیم - کردیریت تا اسپینل - کردیریت افزایش می‌یابد (۰/۴۵ تا ۰/۶۲). دما و فشار تشکیل کردیریت‌ها ۷۵۰ درجه سانتیگراد و فشار آن معادل ۴ کیلو بار می‌باشد. کیانیت به طور مشخص خاص رگه‌های کوارتزی در منطقه است، اما در سنگ‌های دگرگونی مجاورتی و در رگه‌های مجاور نیز دیده می‌شود. وجود رگه‌های کیانیت دار، نشان می‌دهد که کیانیت محدود به رخساره فشار بالا نبوده بلکه در اثر فشارهای هیدروترمالی شکل گرفته است. کیاستولیت‌هایی با طول ۲۰ سانتی متر و عرض ۴ سانتی متر در منطقه بوجود آمده اند که گسترش اصلی شیبست‌های کیاستولیت دار در حوالی زمان آباد است، دما و فشار تشکیل این سنگ‌ها با استفاده از برنامه ترموکالک به ترتیب ۶۲۸ درجه سانتیگراد و فشار در حدود ۴ کیلو بار می‌باشد. بر اساس مطالعات گوهر شناسی انجام شده، کردیریت‌ها برای تراش‌های گنبدی و فانتزی مناسب هستند، سطح بالای شدت دگرگونی مجاورتی سبب شده این کانی‌ها در طی برش و تراش مقاوم باشند. همچنین کیانیت‌ها مناسب تراش ضلع دار، گنبدی، فانتزی هستند بخاطر اینکه ماهیت شفاف دارند و در آخر، کیاستولیت‌ها میزان شفافیت، نیمه شفاف تا اپک را دارند و بصورت کابوشن باید تراش داده شوند. در نهایت نقشه گوهر شناسی منطقه همدان برای بخش مورد مطالعه تهیه و برای اولین بار پیشنهاد شده است.

**کلمات کلیدی:** سنندج - سیرجان، همدان، کردیریت، کیانیت، کیاستولیت، گوهرسنگ

### ۱-مقدمه

میگماتیت‌ها می‌باشند. بلورهای کردیریت در هورنفلس‌ها، سنگ‌های آذرین فلسیک مانند گرانیت‌ها و انواع میگماتیت‌های منطقه حضور دارند. سه منشأ برای حضور کردیریت‌ها در سنگ‌های آذرین می‌توان در نظر گرفت:

۱- دگرگونی، ۲- ماگمایی و ۳- متاسوماتیک. هر سه پلی مورف سیلیکات‌های آلومینیوم، یعنی آندالوزیت، سیلیمانیت و کیانیت در منطقه همدان دیده می‌شوند. آندالوزیت به صورت گسترده در سنگ‌های دگرگونی دیناموترمال (زونهای آندالوزیت، فیبرولیت و سیلیمانیت) دیده می‌شود.

اولین ظهور آندالوزیت، پس از زون گارنت رخ می‌دهد. همراهی متافوتی از پلی مورفهای سیلیکات‌های آلومین در سنگ‌های رسی دگرگون شده وجود دارد، برای مثال آندالوزیت + سیلیمانیت (Okrusch and Evans; 1970; Cavosie, 2002 Leake and Skirrow, 1960; Rumble, 1973, و آندالوزیت + کیانیت (Kerrick, 1988; Evans and Berti, 1986; Grambling, 1981).

کیانیت‌های منطقه همدان بصورت پراکنده در سنگ‌های شیستی و هورنفلسی منطقه دیده می‌شود. کیانیت‌های تبلور یافته در منطقه همدان را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: ۱- کیانیت‌های موجود در متن سنگ، ۲-

ویژگی‌هایی که باعث می‌شود یک سنگ و یا به‌طور کلی یک ماده معدنی یا غیر معدنی در رده سنگ‌های گرانها جای گیرد عبارتند از: ۱- شریست زیبایی، درخشش و جلای دلپسند، ۲- استحکام، ۳- کمیاب بودن، ۴- رنگ، ۵- قابلیت حمل و نقل (Ghorbani, 2003). این موارد تأثیر فراوانی در بالا بردن گرانهای و ارزش سنگ دارد. علاوه بر آن کیفیت سیقل خوری در قیمت گوهرها تأثیر بسزایی دارد. محدوده‌ایی که گوهرهای مورد مطالعه در آن قرار دارد بخشی از نوار دگرگونی موسوم به زون سنندج - سیرجان است (شکل ۱) که بصورت نوار طویل شده‌ایی در امتداد و به موازات روراندگی زاگرس گسترش دارد (Alavi, 2004). افزایش فشار و گرما به دلیل نفوذ توده‌های آذرین (با سن ژوراسیک) در منطقه باعث رخداد یک دگرگونی دیناموترمال در منطقه شده است که سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای را ایجاد کرده‌اند.

انتشار گرمای ماگما سبب شده است که سنگ‌های دگرگونی مجاورتی در منطقه ظاهر شود که شامل انواع شیبست‌های لکه‌دار، هورنفلس‌ها و

کیانیت‌های رشد یافته در قالب پورفیروبولاست‌های آندالوزیت، ۳- کیانیت‌های موجود در رگه‌های کوارتز - آلومینوسیلیکاته. این مطالعات در راستای محاسبه اکتیویته سیالات در میگماتیت‌ها با استفاده از کردیریت که به ترتیب فشار و دمای به دست آمده برای میگماتیت‌های توپسراکان ۳/۴ کیلو بار و ۷۵۰ درجه سانتی گراد می‌باشند. بر طبق مطالعات (Holtz and Johannes, 1991) وجود زونینگ معکوس در نمونه‌های کردیریت ممکن است مربوط به منشأ ماگمایی کردیریت باشد (Pereira and Bea, 1994). در حالیکه بر مبنای مطالعات پیشین کردیریت‌های منطقه زونینگ نرمال نشان می‌دهند. مطالعات Sadeghian (۱۹۹۴) در ارتباط با کیانیت نشان می‌دهد نوع دگرگونی‌ها از نوع دما و فشار متوسط، تیپ باروین (کیانیت - سیلیمانیت) می‌باشد، در حالی که بر مبنای مطالعات Baharifar (۱۹۹۷) نوع دگرگونی ناحیه‌ای سنگ‌های منطقه همدان فشار پایین - دما بالا و مربوط به یک قوس ماگمایی می‌باشد. بر طبق مطالعات Sepahi et al., (2003; Baharifar, 97, 2004) این سنگ‌ها در نتیجه تأثیر حرارتی توده‌های بازیک و اسیدی بر روی سنگ‌های قدیمی‌تر به وجود آمده‌اند.

اگر چه مطالعات ذکر شده، این کانی‌ها را از نظر زمین‌شناسی و کانی‌شناسی مورد بررسی قرار داده است، اما به پتانسیل و کیفیت آنها به عنوان گوهر کمتر توجه شده است. لذا هدف از انجام این مطالعه بررسی شیمی این کانی‌ها، خواص کانی‌شناسی و گوهری نمونه‌های برداشت شده از منطقه، به منظور پی بردن به خصوصیات شیمیایی، کانی‌شناسی و پتانسیل گوهری کانی‌های منطقه می‌باشد.

## ۲- مطالعات زمین‌شناسی صحرایی

منطقه مورد مطالعه در هاله‌ی دگرگونی الوند، استان همدان واقع شده است. محدوده اکتشافی از نظر موقعیت زمین ساختی بخشی از زون دگرگونی سنندج - سیرجان می‌باشد (شکل ۱). زون سنندج - سیرجان که میزبان توده‌های گرانیتی زیادی از جمله باتولیت الوند می‌باشد دارای طولی حدود ۱۵۰۰ و عرض ۲۰۰ کیلومتر است که از شمال غرب تا جنوب شرق ادامه دارد. علوی زون سنندج - سیرجان را جزئی از کوهزاد زاگرس دانسته و آن را زون زاگرس فلس مانند نامیده است (Alavi, 2004) (شکل ۱). بخش اعظم کانی‌های قیمتی و نیمه قیمتی در سنگ‌های دگرگونی و آذرین سنندج - سیرجان تشکیل می‌شوند. بر طبق نظر محجل (Mohajjel, 2003)، منطقه مورد مطالعه احتمالاً در زیر پهنه با دگرشکلی پیچیده قرار دارد که شامل سنگ‌های آذرین و دگرگونی می‌باشد. فرورانش نفوتتیس و به دنبال آن برخورد بین قاره‌های آفریقا - عربی با میکروقاره ایران سبب افزایش گرما و فشار شده و در نتیجه رخداد دگرگونی دیناموترمال در منطقه شده و سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای را ایجاد کرده است. انتشار گرمای ماگما سبب شده است که سنگ‌های دگرگونی مجاورتی در منطقه ظاهر شود و سنگ‌های دگرگونی پیشین دچار تغییر و تحول شوند. سنگ‌های مجموعه دگرگونی همدان در دو مرحله مختلف تشکیل شده‌اند: سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای: سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای به سن پالئوزوئیک تا اوایل ژوراسیک قدیمی‌ترین تشکیلات زمین‌شناسی منطقه را تشکیل داده‌اند که اغلب شامل اسلیت، فیلیت و انواع شیست‌ها هستند. در مورد نوع دگرگونی ناحیه‌ای همدان، معتقد است نوع دگرگونی‌ها از نوع دما و فشار متوسط، تیپ باروین

(کیانیت - سیلیمانیت) می‌باشد. Baharifar (۱۹۹۷) نوع دگرگونی ناحیه‌ای سنگ‌های منطقه همدان را فشار پایین - دما بالا و مربوط به یک قوس ماگمایی می‌داند. سنگ‌های دگرگونی مجاورتی: سنگ‌های دگرگونی مجاورتی که شامل انواع شیست‌های لکه‌دار و هورنفلس‌ها می‌باشد در اطراف توده نفوذی الوند قرار دارند (شکل ۱).

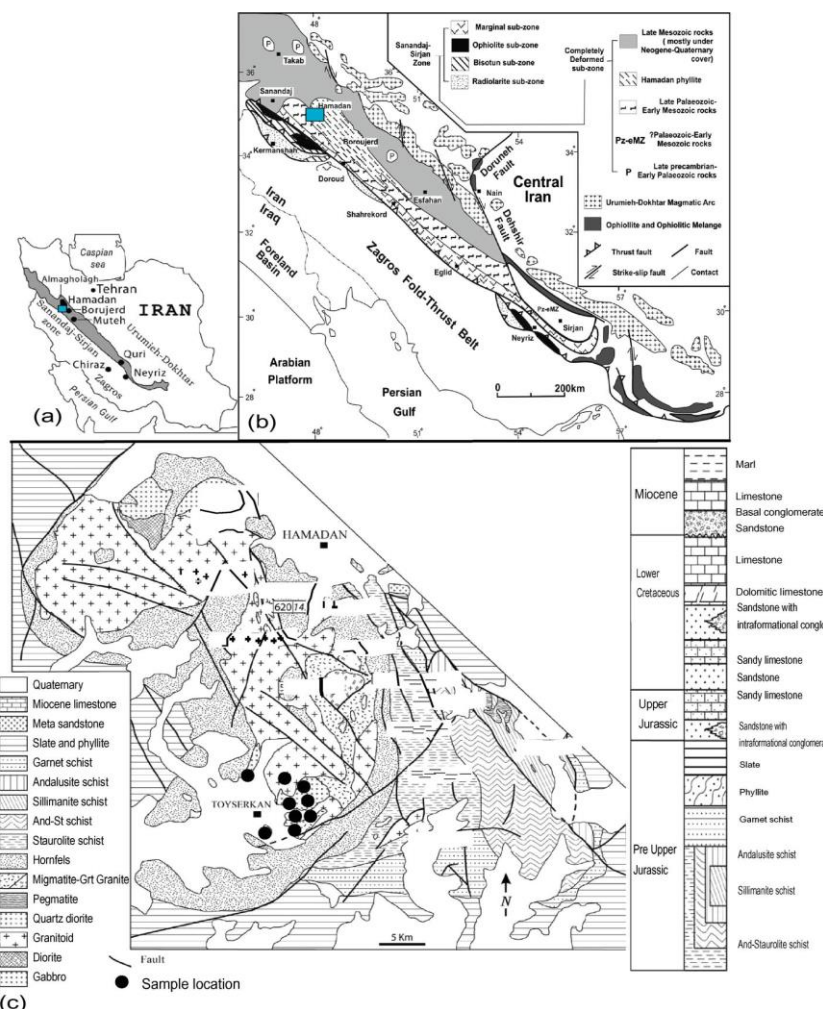
میگماتیت‌ها، بخش مهمی از دگرگونی درجه بالای هاله دگرگونی الوند همدان را تشکیل داده‌اند. میگماتیت‌های با منشأ رسی از مزوسوم (با مجموعه کانی‌های بیوتیت + سیلیمانیت + گارنت + کوردیریت + اسپینل + ارتوپروکسن) و لوکوسوم (با مجموعه کانی‌های گارنت + پلاژیوکلاز + فلدسپار پتاسیم و کوارتز) تشکیل شده‌اند. در این میگماتیت‌ها بافت واکنشی (سیمپلتیک) کانی‌های اسپینل - کوردیریت - پلاژیوکلاز جایگزین حاشیه آندالوزیت گردیده است (Saki, 2011). همه‌ی سنگ‌های دگرگونی در منطقه پیش از دگرگونی همبری ناشی از نفوذ باتولیت الوند تحت تأثیر دگرگونی ناحیه‌ای که تا رخساره شیست سبز و آمفیبولیت پیش رفته است، قرار گرفته‌اند (Baharifar et al., 2004; Baharifar, Saki, 2011; 1997). رگه‌های کوارتزی موجود در منطقه چشین که در هورنفلس‌ها شکل گرفته‌اند دارای کیانیت هستند، کیانیت به‌طور مشخص خاص رگه‌های کوارتزی در منطقه است، اما در سنگ‌های دگرگونی مجاورتی و در سنگ‌های مجاور توده نیز دیده می‌شود (شکل ۲). رگه‌های آلومینوسیلیکات‌دار مجاور توده‌های گرانیتی را بر اساس نوع کانی‌های آلومینوسیلیکات همراه در چهار رده طبقه‌بندی و توصیف کرده‌اند: ۱- رگه‌های کوارتز - کیانیت، ۲- رگه‌های کوارتز - آندالوزیت، ۳- رگه‌های کوارتز - سیلیمانیت، ۴- رگه‌های مرکب شامل: الف) کوارتز - آندالوزیت - سیلیمانیت، ب) کوارتز - آندالوزیت - کیانیت، ج) کوارتز - سیلیمانیت - کیانیت و د) کوارتز - آندالوزیت - سیلیمانیت - کیانیت. بلورهای کیانیت موجود در رگه‌های کوارتزی منطقه مورد مطالعه حالت کشیده و سابه‌درال، بافت سنگ پرفیروگرانوبلاستیک و به‌صورت عمود یا با زاویه زیاد نسبت به دیواره رگه‌ها تشکیل شده‌اند (شکل ۲).

## ۳- روش مطالعه

در ابتدای تحقیق از نقشه زمین‌شناسی منطقه استفاده شد. مطالعه صحرایی برای بررسی دقیق‌تر سنگ‌شناسی و ساختارهای عمده منطقه زمین‌شناسی همدان، ملایر و توپسراکان در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از نمونه‌برداری و عکسبرداری صحرایی، نمونه‌های موردنظر به کارگاه تراش گوهر مرکز رشد و فناوری دانشگاه شهید چمران منتقل شد. در راستای این مطالعه جهت بررسی مقاومت نمونه‌ها و کیفیت گوهری آنها، همچنین برای تعیین ارتباط بین کیفیت صیقل خوری با نوع تراش مناسب برای نمونه‌های مورد مطالعه، پس از غربالگری و جدایش نمونه‌های خیلی هوازده و خردشده، تعداد ۳۰ نمونه از گوهرهای کردیریت، کیانیت و کیاستولیت بصورت تخت، فانتزی، دامله، و هنری تراش داده شد به این صورت که ابتدا سنگ‌ها را با تیغه برش در اندازه مختلف با توجه به اندازه سنگ برش داده شد سپس با شابلون طرح‌های موردنظر را ترسیم و در مرحله بعد با سمباده ۶۰، ۱۲۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ شکل اولیه و نهایی را ایجاد گردید. در مرحله نهایی، با پدهای پالیش که سمباده‌هایی از شماره ۲۲۰ تا ۳۰۰۰ به

خصوصیات گوه‌شناسی یعنی رنگ، شفافیت، رنگ خاکه و نوع جلا نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی شیمی کانی‌های کربیدریت، کیانیت و کیاستولیت تعداد ۲۰ نمونه به موسسه علوم زمین و محیط زیست دانشگاه Potsdom آلمان ارسال و توسط روش دستگاهی مایکروپروپ الکترونی (EPMA) مدل دستگاه Cameca SX100 به صورت نقطه‌ای آنالیز و تعدادی از نتایج آن در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

روی آنها نصب شده بود، پالایش داده تا برق و درخشندگی نهایی ایجاد شود و بعد، ارتباط مذکور مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای انجام مطالعات کانی‌شناسی و بررسی سایر خصوصیات میکروسکوپی گوه‌های منطقه، تعداد ۲۰ مقطع نازک - صیقلی از نمونه‌های مورد نظر در کارگاه مقطع گیری دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز تهیه شد. پس از انجام مطالعات میکروسکوپی نوع بافت و تغییرات آن و همچنین سایر خصوصیات کانی‌شناسی نمونه‌های مورد مطالعه گردید. علاوه بر این موارد، سایر



شکل ۱- (a) موقعیت زون سنندج - سیرجان در ایران، (b) موقعیت زون سنندج- سیرجان به همراه منطقه مورد مطالعه و (c) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه به همراه ستون چینه نگاری منطقه با تغییراتی از (Baharifar (2004).

Fig. 1. (a) Location of the Sanandaj-Sirjan belt in Iran, (b) the Sanandaj-Sirjan zone in Iran and location of the study area, and (c) geological map of the area. Modified from Baharifar (2004), with sample locations and stratigraphic column.

هستند همچنین ایلیمنیت، پلاژیوکلاز، مسکوویت و گاه آندالوزیت نیز در این هورنفلس قابل مشاهده هستند، که در مناطق وسیعی از هاله الوند وجود دارند. بر طبق نظریه (Clark, 1995) کربیدریت‌ها به سه صورت در سنگ‌های آذرین فلسیک یافت می‌شود: (۱) با منشأ دگرگونی: الف) زینکوکریست‌های سنگ میزبان و ب) رستیت، (۲) ماگمایی، پریکتیک (در لوکوسم میگماتیت‌ها یا در اثر واکنش مذاب با گارنت)، کوتکتیک (اندازه‌های دانه معمولاً مشابه دانه‌های

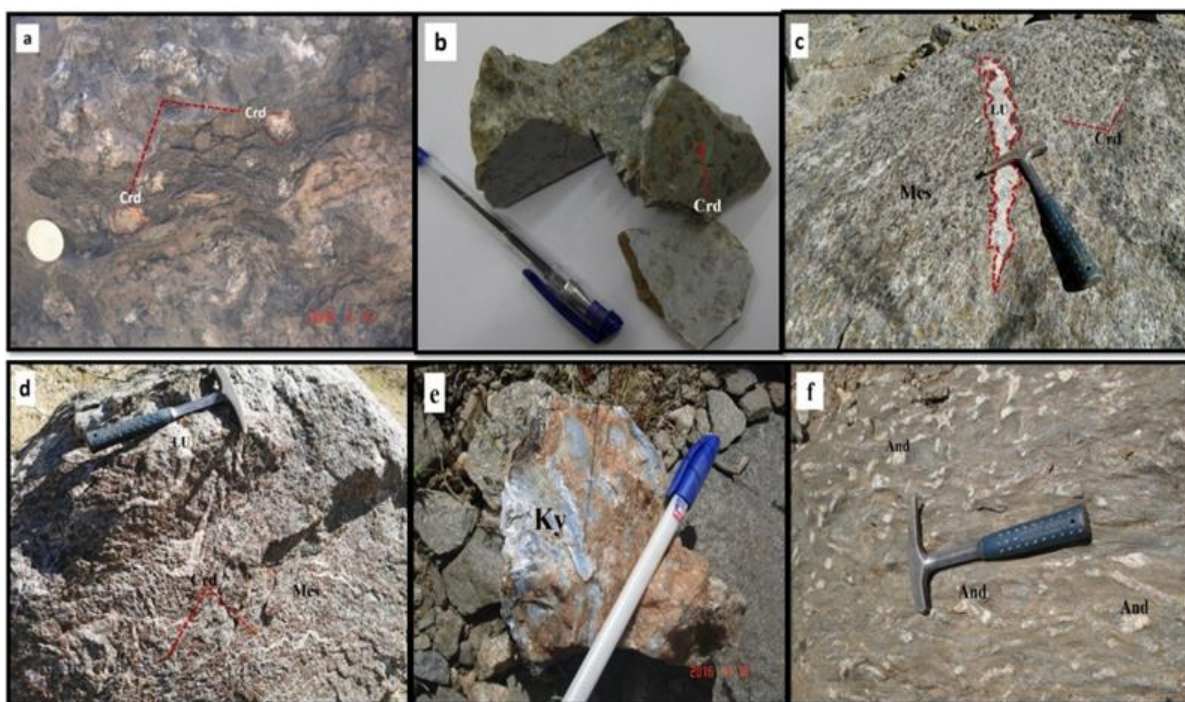
#### ۴- بحث و بررسی

##### ۴-۱- سنگ‌نگاری

**کربیدریت:** در سنگ‌های دگرگونی مجاورتی به فراوانی دیده می‌شود که از نظر پتروگرافی سنگ‌های مختلفی را اعم از هورنفلس شیست، شیست لکه‌دار و هورنفلس در بر می‌گیرد. بر اساس مطالعات میکروسکوپی مهمترین کانی‌هایی همراه با کربیدریت شامل پتاسیم فلدسپار، بیوتیت، کوارتز و اسپینل

(Saki, 2011). در میگماتیت‌هایی که حالت توده‌ای دارند (دیاتکسیت‌ها) و امکان تفکیک لوکوسوم و مزوسوم وجود ندارد، رشد کردیریت در زمینه‌ای از کوارتز و فلدسپار، تغییر شکل حالت جامد را ایجاد می‌کند. در میگماتیت‌ها کردیریت در ملانوسوم و به مقدار بیشتر از آن در مزوسوم حضور دارد (شکل ۲ c و d). کردیریت‌های مذکور درشت بوده و با چشم قابل رؤیت هستند. بلورهای کردیریت در طیف گسترده‌ای از سنگ‌های همدان از گرانیت تا هورنفلس و میگماتیت‌ها دیده می‌شوند. بلورهای کردیریت موجود در هورنفلس‌های میگماتیتهای همدان بصورت پورفیروبلاست ظاهر می‌شوند و دارای ماکل پروانه‌ای شکل هستند (شکل ۳ b). براساس مشاهدات پتروگرافی حاوی ادخال‌های فراوانی از کوارتز، بیوتیت و اسپینل (رنگ سبز) هستند (شکل ۳ a و c).

اطراف خود است) و پگماتیتهای (۳) متاسوماتیک، به صورت هم رشدی با کوارتز، جایگزینی به جای فلدسپار یا بیوتیت دارای رابطه مکانیکی با ناپیوستگی‌های سنگ میزبان (به عنوان مثال گسله‌ها). بلورهای کردیریت موجود در هورنفلس‌های منطقه مورد مطالعه قطری حدود ۳۰ تا ۱ میلی‌متر را نشان می‌دهند. در میگماتیت‌ها کردیریت به همراه اسپینل و سیلیمانیت بسیار درشت شده است بطوریکه اندازه آن ۳ سانتی‌متر هم می‌رسد که کردیریت‌های مورد مطالعه این تحقیق از مزوسوم میگماتیت‌ها برداشت شده‌اند. رنگ این سنگ‌ها خاکستری تا سیاه است و دچار ذوب بخشی شده‌اند. زون‌های دگرگونی میگماتیت‌ها در چند موقعیت مختلف نزدیک باتولیت الوند در سنگ‌های رسی توسعه یافته است. میگماتیت‌های تویسرکان همدان از بخش‌های مزوسوم، لوکوسوم، ملانوسوم تشکیل شده‌اند (Saki et al, 2012; )



شکل ۲- تصاویر صحرایی از سنگ‌های مورد مطالعه (a)، (b) بلورهای درشت کردیریت در مزوسوم که گاهی به اندازه ۳ سانتی‌متر هم می‌رسد، (c-d) لوکوسوم و مزوسوم بصورت لایه‌های روشن و تیره در تصویر مشاهده می‌شوند، (e) کیانیت تشکیل شده در رگه‌های کوارتز-کیانیت در منطقه و (f) رخنمون هورنفلس آندالوزیت. اندازه آندالوزیت‌ها از ۱ تا بیش از ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. علائم اختصاری از Keretz (۱۹۸۳).

Fig. 2. Field photographs of studied rocks. (a-b) Cordierite minerals with 3 cm length in mesosome, and (c-d) leucosomes and mesosome appear to be white and black, (e) kyanite minerals formed in Ky-Qtz veins in the area and (f) exposure of andalusite hornfels, and minerals formed as 1 to 10 cm. abbreviation after Keretz (1983).

هستند (شکل ۳ f). بلورهای کیانیت موجود در منطقه مورد مطالعه با قطری حدود ۱/۵ سانتی‌متر دیده شده‌اند.

#### ۳-۴- کیاستولیت

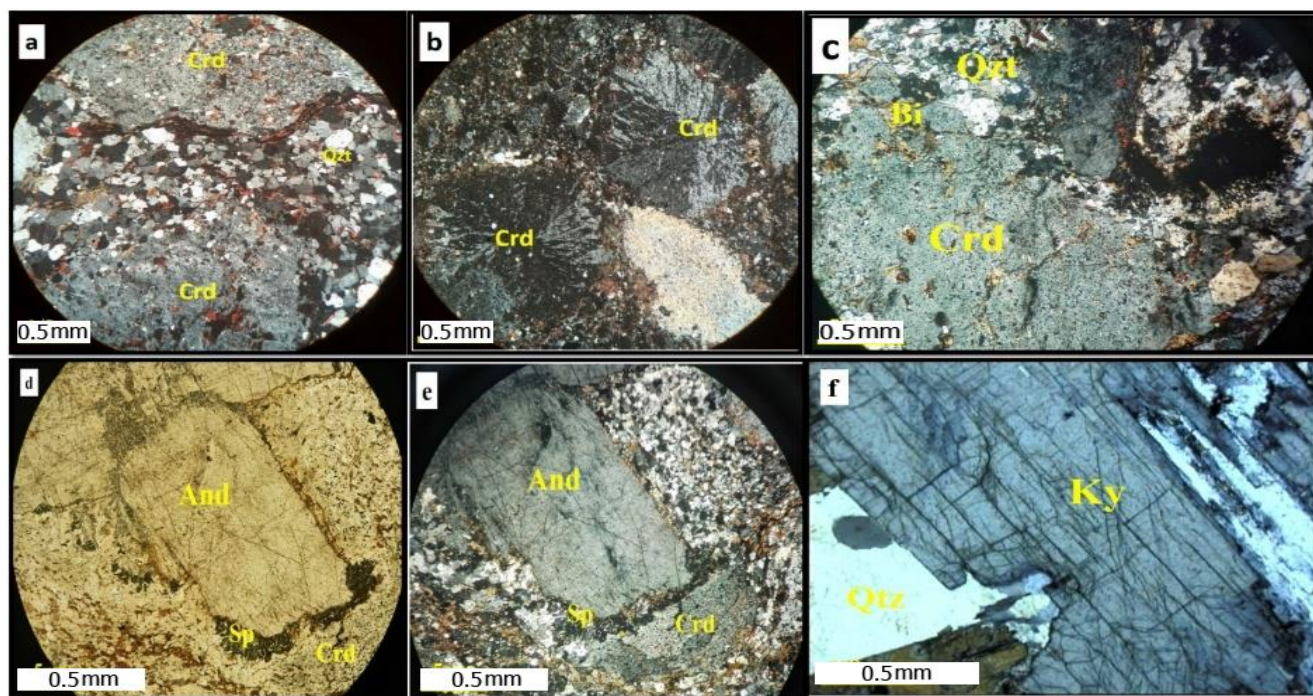
آندالوزیت کانی است که به همراه کیانیت و سیلیمانیت پلی مورف‌های  $Al_2SiO_5$  را شامل می‌شوند (Donoghue, 2006) این کانی اغلب در سنگ‌های دگرگون شده در اطراف توده‌های آذرین درونی (دگرگونی همبری) دیده می‌شود. این کانی همچنین در محیط‌های دگرگونی ناحیه‌ای در داخل

#### ۲-۴- کیانیت

رگه‌های کیانیت‌دار در داخل استرولیت شیبست‌ها، کردیریت هورنفلس‌ها و گرانیت‌ها قرار دارند و یا در هورنفلس‌های آندالوزیت‌دار که پلی مورف پایدار در سنگ‌های دربرگیرنده آندالوزیت و سیلیمانیت است. معمولاً سنگ‌های میزبان رگه‌ها تا زون سیلیمانیت دگرگون شده‌اند (Sepahi et al., 2004; Sepahi, 1999). بر اساس مشاهدات پتروگرافی، این کیانیت‌ها همزیست با کانی‌های کوارتز، مسکوویت، گارنت، سیلیمانیت، بیوتیت و استارولیت

نوری وجود ناخالصی‌های کربنی در کانی کیاستولیت است. به کیاستولیت کانی صلیب مانند نیز می‌گویند (به علت وجود دو قلوهای درهم رشد کرده به شکل صلیب) که به آسانی از سایر کانی‌ها قابل تفکیک است. بررسی میکروسکوپی نشان می‌دهد که بافت کیاستولیت شیست‌ها عمدتاً لپیدوپورفیروبلاستیک، پورفیروبلاستیک و یا پورفیروگرانوبلاستیک است. بلورهای کیاستولیت شکل دار هستند و برخی از آن‌ها پوئی کیلوبلاستیک بوده، دارای ادخال‌های فراوان از گرافیت و به میزان کمتر بیوتیت و مسکوویت می‌باشند. این ادخال‌ها یا به صورت منظم آرایش یافته و یا در جهات بلورشناسی خاصی متمرکز شده‌اند و یا پراکنده بوده و نظم خاصی را نشان نمی‌دهند. براساس مطالعات صحرایی شیب این شیست‌های کیاستولیت دار در منطقه به طرف شمال است (شکل f۲). بلورهای کیاستولیت درشت بوده، و دارای طول ۲۰ سانتی‌متر و عرض ۴ سانتی‌متر می‌باشد.

میکاشیست و گنیس یافت می‌شود. آندالوزیت به صورت گسترده در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای (در زون آندالوزیت، فیبرولیت و سیلیمانیت) دیده می‌شود. اولین ظهور آندالوزیت، پس از زون گارنت رخ می‌دهد. در زون فیبرولیت، پس از ظهور فیبرولیت، آندالوزیت هنوز پایدار بوده یا حاشیه آن به مسکوویت تبدیل شده و در زون سیلیمانیت، بخش زیادی از آندالوزیت به سیلیمانیت یا مسکوویت‌های ثانویه تبدیل می‌گردد. در مزوسوم میگماتیت‌ها، آندالوزیت به صورت ناپایدار گاه قابل مشاهده است. و در این صورت، حاشیه‌ای از اسپینل و آنورتیت در اطراف آن دیده شود (شکل d۳ و e). آندالوزیت‌های مورد مطالعه در اثر تجمع گرافیت در امتداد یال‌ها و محورمیانی دارای طرح صلیبی شکل هستند و از نوع کیاستولیت می‌باشند. کیاستولیت به شکل منشورهای باریک یافت می‌شود و چنانچه زیر میکروسکوپ قطعه نازکی از آن مورد مطالعه قرار گیرد در آن صلیب تیره‌رنگی مشاهده خواهد شد. علت این پدیده



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی. (a) درشت بلورهای کردیریت تشکیل شده در مزوسوم میگماتیت‌ها، (b-c) کردیریت‌های شکل دار به همراه ماگل در مزوسوم، (d-e) کانی شکل دار آندالوزیت که از حاشیه به اسپینل و کردیریت تبدیل شده است، (f) کانیته‌های تشکیل شده در رگه‌های کوارتز - کیانیت.

Fig. 3. Microscopic photographs (a) microscopic, plane-polarized light view of a large Crd mineral in the mesosome, (b-c) euhedral shape of the Crd with twinning in the mesosome, (d- e) euhedral shape of the And that replaced by Crd and Sp in the rim, and (f) kyanite minerals formed in Ky - Qtz veins.

#### ۴-۴- مطالعات شیمی کانی‌ها

- کردیریت و کردیریت - مسکوویت به طور کامل پنیته شده است. مقدار کسر مولی منیزیم (Xmg) کردیریت با افزایش درجه دگرگونی از زون فلدسپار پتاسیم - کردیریت تا اسپینل - کردیریت افزایش می‌یابد (۰/۴۵ تا ۰/۶۲).

جهت دستیابی به شیمی کانی‌ها نمونه‌های کردیریت، آندالوزیت و سیلیمانیت تحت آنالیز مایکروپروپ توسط دستگاه Cameca SX100 در دانشگاه Potsdam آلمان قرار گرفته‌اند (جدول ۱ و ۲). ترکیب شیمیایی کردیریت در جدول ۱ آورده شده است. مجموع میانگین اکسیدهای کردیریت بیشتر از ۹۸/۵ درصد است. کردیریت در زون‌های دگرگونی فلدسپار پتاسیم

جدول ۱ - نتایج آنالیز شیمیایی کانی کوردیریت. تعداد کاتیون‌های کوردیریت بر اساس ۱۸ اتم اکسیژن محاسبه شده است.

Table 1. Representative mineral analyses of Crd. The numbers of cations are calculated on the basis of 8 oxygen atoms.

Mineral	Crd	Crd	Crd	Crd	Crd	Crd
Sample	Tu1	Tu1	Tu1	Tu1	Tu1	Tu1
SiO <sub>2</sub>	48.07	47.98	48.42	48.42	48.09	48.21
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.01	0.06	0.01	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.53	32.35	32.92	32.60	32.92	32.95
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.75	0.68	1.17	0.61	1.26	1.28
FeO	8.64	9.74	9.00	9.19	9.35	9.37
MnO	0.55	0.70	0.45	0.55	0.60	0.62
MgO	7.14	6.52	7.11	7.06	6.58	6.70
CaO	0.01	0.02	0.04	0.01	0.06	0.06
Na <sub>2</sub> O	0.18	0.19	0.18	0.19	0.16	0.17
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.16	0.16
Totals	98.70	98.11	99.17	98.65	98.48	98.88
Cations per 18 oxygen atoms						
Si	4.968	5.004	4.978	5.006	4.997	5.003
Ti	0.000	0.000	0.001	0.005	0.001	0.004
Al	3.963	3.977	3.989	3.972	3.955	3.958
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.005
Fe (3 <sup>+</sup> )	0.136	0.053	0.091	0.047	0.098	0.099
Fe (2 <sup>+</sup> )	0.747	0.850	0.773	0.794	0.812	0.813
Mn	0.048	0.062	0.039	0.048	0.053	0.054
Mg	1.100	1.014	1.090	1.088	1.019	1.020
Zn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.007
Ca	0.001	0.002	0.004	0.001	0.032	0.033
Na	0.36	0.038	0.036	0.038	0.021	0.021
K	0.000	0.000	0.000	0.001	0.00	0.00
Total	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00



ترکیب شیمیایی آندالوزیت در جدول ۲ آورده شده است. مقدار  $\text{SiO}_2$  در رگه‌ها و شیست‌های آندالوزیت دار متغییر است (۳۷/۰۹ تا ۶۳/۹۳)، همچنین در رگه‌های آندالوزیت‌دار سفید و های آندالوزیت دار گوشتی رنگ تقریباً یکسان است. میانگین درصد مولی آهن در رگه‌ها و شیست آندالوزیت دار ۰/۱۱ است. مقدار  $\text{SiO}_2$  در رگه‌های آندالوزیت‌دار از سمت هسته به حاشیه به ترتیب ۳۷/۳۶ تا ۳۶/۵۴ است و مقدار  $\text{Al}_2\text{O}_3$  از ۶۲/۰۲ تا ۶۳/۴۸ متغییر است. میانگین درصد مولی آهن در رگه‌های آندالوزیت دار از هسته به سمت حاشیه به ترتیب ۰/۵۰ تا ۰/۱۴ است.

ترکیب شیمیایی کیانیت در جدول ۲ آورده شده است. مقدار  $\text{SiO}_2$  در رگه‌ها و شیست‌های سیلیمانیت و کیانیت دار تقریباً یکسان است. میانگین درصد  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در رگه‌های کیانیت و سیلیمانیت دار برابر با ۹۵/۶۲ درصد وزنی است. فراوانی مقدار  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  از ۰/۱۲ تا ۰/۲۵ در رگه‌های سیلیمانیت و کیانیت‌دار متغییر است. مقدار درصد مولی آهن در رگه‌ها و شیست‌های سیلیمانیت و کیانیت‌دار به ترتیب ۰/۱۲ تا ۰/۱۷ است که تغییر سیستماتیکی نشان نمی‌دهد.

جدول ۲- نتایج آنالیز شیمیایی سیلیکات‌های آلومینیوم، اقتباس از Sepahi و همکاران (۲۰۰۴).

Table 2. Representative mineral analyses of alminosilicate (Sepahi et al., 2004).

Sampel	And	And – White	And – Pink	And Vien Margin		Ky – Sil	Ky
	Schist	Vien	Vien	And	And	Schist	Vien
	And	And	And	Core	rim	Ky	Ky
$\text{SiO}_2$	36.93	37.09	37.23	36.54	37.36	37.06	37.22
$\text{TiO}_2$	---	---	0.01	0.04	0.01	---	---
$\text{Al}_2\text{O}_3$	63.11	63.18	63.31	62.06	63.48	63.02	62.88
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.15	0.13	0.22	0.73	0.20	0.18	0.25
$\text{MnO}$	---	---	---	0.01	---	---	0.06
$\text{MgO}$	0.03	0.02	0.03	0.17	0.02	---	0.02
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.07	---	---	0.08	---	0.03	0.08
Total	100.28	100.43	100.79	99.63	101.08	100.30	100.51
Mol% Fe	0.10	0.09	0.15	0.50	0.14	0.12	0.17

ماهیت نیمه شفاف عدم توانایی برای عبور نور می باشد. همچنین این نوع کردیریت‌ها از کیفیت صیقل خوری بسیار بالایی برخوردارند.

**کیانیت:** این کانی به نام دیستن نیز خوانده می‌شود دارای خطوط رنگی نامنظم بوده و درخششی شیشه‌ای دارد. به علت دارا بودن سختی متغییر در جهات مختلف و سطوح تورق کامل، برش و تراش آن مشکل است. جهت تعیین خصوصیات گوهرشناسی ابتدا تعدادی از کیانیت‌های منطقه به صورت فست، دامله و فانتزی تراش و صیقل داده شد، سپس به بررسی و تعیین خصوصیات گوهرشناسی از جمله رنگ، شفافیت، رنگ خاکه و نوع جلا پرداخته شد. کیانیت‌ها دارای جلای شیشه‌ای، شفاف - نیمه شفاف، رنگ خاکه سفید، سختی حداکثر ۴ تا ۴/۵، و به رنگ آبی هستند. این کیانیت‌ها که قبل از تراش به رنگ آبی مات و هوازده هستند، بعد از تراش و صیقل به رنگ آبی روشن و حاوی ادخال‌هایی از کوارتز، بیوتیت، گارنت، مسکوویت و به شکل بسیار زیبا درمی‌آیند (شکل a۴ و b). براساس مطالعات گوهرشناسی انجام‌شده، این کانی‌ها برای تراش فست (چندوجهی)، دامله، فانتزی مناسب

#### ۴-۵- خصوصیات گوهرشناسی

**کردیریت:** جهت تعیین خصوصیات گوهرشناسی ابتدا تعدادی از کردیریت‌های منطقه به صورت دامله، فانتزی و هنری تراش و صیقل داده شد (شکل a۴)، سپس به بررسی و تعیین خصوصیات گوهرشناسی از جمله رنگ، شفافیت، رنگ خاکه و نوع جلا پرداخته شد. کردیریت‌ها دارای جلای چرب، نیمه شفاف (مانند یشم)، رنگ خاکه سفید، سختی حداکثر ۷ تا ۷/۵ و شکننده هستند. این کردیریت‌ها که قبل از تراش به رنگ خاکستری و بی-شکل هستند (شکل b۴) بعد از تراش و صیقل به رنگ قهوه‌ای تیره تا سبز و به شکل بسیار زیبا در می‌آیند. سطح بالای شدت دگرگونی مجاورتی سبب شده این کانی‌ها در طی برش و تراش مقاوم باشند. همچنین توجه به مراحل تراش انجام‌شده نشان می‌دهد تراش‌های دامله و فانتزی برای این سنگ‌ها مناسب هستند علاوه بر این، بر اساس مطالعات گوهرشناسی انجام شده، این کانی‌ها برای تراش فست (چندوجهی) مناسب نیستند. این موضوع به خاطر

همچنین این نوع کیانیت‌ها از کیفیت صیقل خوری بسیار بالایی برخوردارند.

هستند، به خاطر اینکه ماهیت شفاف دارند و توانایی برای عبور نور را دارند.



شکل ۴- (a) نمونه‌های کردپریت گوهری قبل از تراش و صیقل که به رنگ خاکستری می‌باشند و (b) نمونه‌های گوهری کردپریت که بعد از تراش و صیقل به رنگ قهوه‌ای تیره تا سبز. Fig.4. (a) Grey colour Ctd gem sample before cabochon and fantasy cut, and (b) Ctd gem sample after cabochon and fantasy cut with brown to green colour.



شکل ۵- (a) نمونه‌های کیانیت گوهری قبل از تراش و صیقل، (b) نمونه‌های گوهری کیانیت که بعد از تراش و صیقل به رنگ آبی. Fig. 5. (a) Grey colour Ky gem sample before cabochon and fantasy cut, and (b) Ky gem sample after cabochon and fantasy cut with brown to green colour.

تراش و صیقل به رنگ قهوه‌ای درمی‌آیند (شکل ۵۶). کیاستولیت‌ها دارای جلای چرب، رنگ خاکه سفید، شفافیت ترنسلسونت تا اپک، سختی ۵ تا ۵/۵ است. تعداد زیادی از این کانی‌ها سرسیتی شده‌اند (شکل ۵۶). چنین نمونه‌هایی دارای کیفیت صیقل خوری پایین‌تری هستند نسبت به نمونه‌های فاقد شکستگی و هوازدگی هستند. بهتر است برای جلوگیری از شکسته شدن کانی هنگام تراش از آب فراوان استفاده کرد. برای آشکار شدن طرح صلیبی باید برش عمود بر محور C بلورشناسی باشد. با توجه به اینکه میزان شفافیت این کانی‌ها ترنسلسونت تا اپک می‌باشد باید به صورت کابوشن (گنبدی) تراش داده شوند و برای تراش فست (چندوجهی) مناسبی نمی‌باشند. همچنین لازم به ذکر است که نمونه‌های دارای تراش تخت فاقد کیفیت صیقل خوری لازم به‌عنوان گوهر هستند (شکل ۵۷).

**کیاستولیت:** نام این کانی از نام محل استخراج آن یعنی آندالوسیا در کشور اسپانیا مشتق شده و به علت دارا بودن پدیده قوی چند رنگی در جواهرشناسی بسیار مورد توجه است. آندالوزیت دارای درخشش شیشه‌ای است و بلورهایی در اندازه‌های درشت و کیفیت مرغوب که بتوان در جواهرسازی استفاده نمود به ندرت دیده می‌شود. کیاستولیت از انواع آندالوزیت بوده و اکثراً غیر شفاف و مات به رنگ سفید، قرمز یا متمایل به زرد یافت می‌شود. آندالوزیت‌های مورد مطالعه در اثر تجمع گرافیت در امتداد یال‌ها و محور میانی دارای طرح صلیبی شکل هستند و از نوع کیاستولیت هستند. جهت تعیین خصوصیات گوهرشناسی ابتدا تعدادی از آندالوزیت‌های منطقه به صورت تخت و کابوشن (گنبدی) تراش و صیقل داده شد. این کیاستولیت‌ها که قبل از تراش به رنگ قرمز گوشتی هستند (شکل ۵۵) بعد از



شکل ۶- (a-b) نمونه‌های آندالوزیت، (c) نمونه‌های کیاستولیت قبل از تراش و صیقل که به رنگ قرمز گوشتی می‌باشد، (d) نمونه کیاستولیت که بعد از تراش و صیقل به رنگ قهوه‌ای درآمده‌اند.

Fig. 6. (a-b) Andalusite sample, (c) andalusite gem sample before cabochon and fantasy cut, and (d) andalusite gem sample after cabochon and fantasy cut with Browne colour.

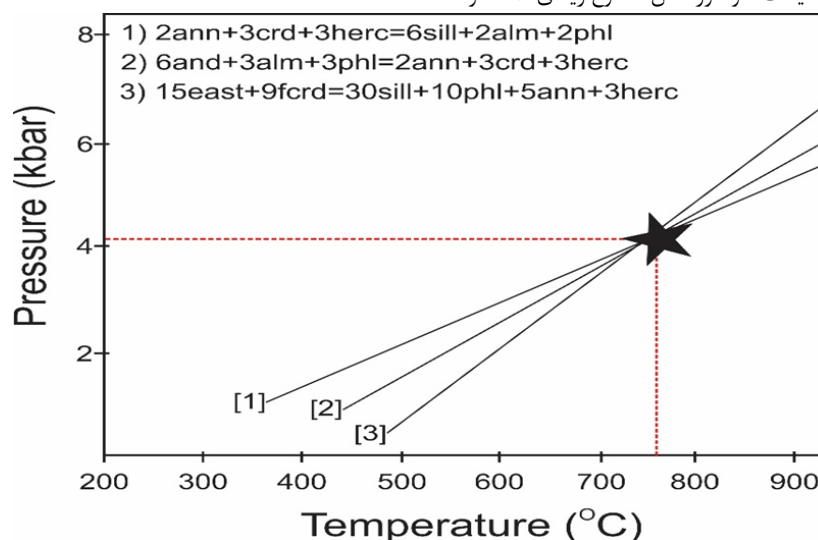
از تأثیر دگرگونی مجاورتی بر سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای حاصل شده‌اند. این سنگ‌ها در نتیجه تأثیر حرارتی توده‌های بازیک و اسیدی بر روی سنگ‌های قدیمی‌تر به وجود آمده‌اند. ارزیابی دما و فشار این سنگ‌ها توسط (Saki, 2013) محاسبه شده است که به خلاصه‌ای از مهمترین روش بکار برده شده پرداخته می‌شود. تخمین دمای اوج دگرگونی با استفاده از منحنی‌های تعادلی چندگانه که توسط برنامه ترموکالک نسخه ۳/۲ (Holland and Powell, 1998) بدست آمده است (شکل ۷). براین اساس دما و فشاری که با استفاده از اکتیویته‌های متعادل در مزوسوم میگماتیت‌ها (جدول ۳) محاسبه شده است نشان می‌دهد بطوریکه دما و فشار این سنگ‌ها به ترتیب ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴/۲ کیلوبار می‌باشد.

#### ۴-۶- دما - فشار سنجی کانی‌های دارای پتانسیل گوهری در

##### منطقه همدان

#### ۴-۶-۱- کردیریت

واکنش‌های عمده‌ای که می‌توان برای تشکیل کردیریت در نظر گرفت شامل موارد زیر می‌باشند: کلریت + مسکوویت (سرسیت) ↔ کردیریت + بیوتیت + کوارتز + آب (Yardiey, 1991) کوارتز + گارنت + سیلیمانیت (آندالوزیت) ↔ کردیریت (Hyndman, 1985) کردیریت‌های هورنفلس-های میگماتیتهی بسیار درشت‌دانه می‌باشند که بالا رفتن سطح دمای دگرگونی و پدیده ذوب بخشی باعث رشد آنها شده است. این کردیریت‌ها با بیوتیت زیاد همراه هستند و اغلب همراه با سیلیمانیت ± بیوتیت ± گارنت و اسپینل دیده می‌شوند. هورنفلس شیبست‌ها و هورنفلس‌ها تنوع زیادی داشته و



شکل ۷- تخمین دما - فشار میگماتیت‌ها با استفاده از منحنی‌های تعادلی چندگانه (برنامه ترموکالک نسخه ۳/۲). بر گرفته از Saki (۲۰۱۳).

Fig. 7. Representative results of multiple equilibria calculation for migmatite by THERMOCALC (3.2) program (Saki, 2013).

جدول ۳- مقدار اکتیویته بکار برده شده در برنامه ترموکالک برای محاسبه واکنش‌های متعادل در موزوسوم میگماتیت‌ها تمامی علائم اختصاری می‌باشند (Kertz, 1983).

Table 3. Activity values used for migmatite mesosom calculating equilibrium reactions by THERMOCALC (Kertz, 1983).

Mineral assemblage	Activity
Grt, Bt, Crd, Spl, Pl, Ilm, Opx Sil, Otz, H <sub>2</sub> O	py=0.032, alm=0.35, phl=0.030, ann=0.073, east=0.030, Crd=0.36, fCrd=0.18, An=0.90, Ab=0.24, Spl=0.14 here=0.85, mt=0.03768, Ilm=0.62, En=1, Sil=1, Qtz=1, H <sub>2</sub> O=1

#### ۴-۶-۲- کیانیت

رگه‌های مختلف کوارتزی در سنگ‌های دگرگونی منطقه همدان دیده می‌شود که توسط محققین قبلی توصیف شده‌اند (Torkian, 1995; Sepahi, 1999; Baharifar, 1997). یکی از مهمترین انواع رگه‌ها، رگه‌های محتوی پلی مورف‌های سیلیکات آلومین هستند که محتوی یک، دو یا حتی سه پلی مورف می‌باشند. هرچند بدلیل درشت بودن اندازه بلورها، بررسی میکروسکوپی مشکل است، اما می‌توان برخی روابط پاراژنتیکی را براساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی به شرح زیر، استخراج کرد: در رگه‌هایی که محتوی دو یا سه پلی مورف هستند، آندالوزیت اولین پلی مورف تشکیل شده است که بعداً به کیانیت‌های اتومورف تبدیل می‌گردد. در نهایت، سیلیمانیت بعنوان آخرین پلی مورف ظاهر می‌شود. بعبارت دیگر، پلی مورف‌ها با یکدیگر در تعادل نبوده و به هم تبدیل می‌شوند. در زون حاشیه‌ای رگه‌ها، روابط پیچیده‌تر است و توالی تبدیل پلی مورف‌ها به یکدیگر، با توالی‌های دگرگونی دیناموترمال یا مجاورتی آمیخته شده و توالی‌های مختلفی دیده می‌شود که بستگی به زمان تزریق رگه در مقایسه با زمان تحولات دگرگونی دارد. سیالات نقش مهمی در کنترل دمای انجام واکنش‌های دگرگونی دارد. مهمترین عملکرد سیالات در دگرگونی منطقه، سرعت بخشیدن به واکنش‌های دگرگونی برگشتی است که مستلزم وجود آب است. سیالات در انتقال حرارت نیز نقش مهمی را ایفا می‌کنند، بالا بودن درجه دگرگونی در نواحی تمرکز رگه‌ها، به‌نوعی این مسئله را تأیید می‌کند. تزریق رگه‌ها به داخل سنگ میزبان بیانگر این است که رگه‌ها جوانتر از سنگ‌های دربرگیرنده هستند، با توجه به مطالب ذکر شده، رگه‌ها نمی‌توانند از تفریق دگرگونی سنگ‌های دربرگیرنده حاصل شوند، زیرا در این صورت باید از نظر نوع پلی مورف، شبیه سنگ‌های دربرگیرنده باشند. ضخامت و گسترش زیاد رگه‌ها نیز به‌نوعی مسئله تفریق آن‌ها را نفی می‌کند، زیرا تفریق دگرگونی نمی‌تواند رگه‌های با ضخامت و گسترش زیاد را فراهم کند (Hyndman, 1985). مطالعات پیشین نشان داده که این رگه‌ها نمی‌توانند محصول تبلور از ماگما باشند، زیرا ماگمایی با ترکیب مناسب که بتواند فقط سیلیکات آلومین و کوارتز تشکیل دهد، اولاً به‌راحتی تشکیل نشده و ثانیاً نمی‌تواند به راحتی حرکت کرده و در افق‌های بالاتر جایگزین شود. به نظر می‌رسد که در منطقه همدان، حضور سیالات آبکی دارای ترکیب شیمیایی مناسب، عامل تشکیل رگه‌ها بوده است. برای اینکه یک رگه تشکیل شود، بر اساس مدل‌های تکتونیکی باید فشار سیال در رگه‌ها کمتر از سنگ دربرگیرنده باشد. فشار پایین سیال یکی از دلایلی است که باعث می‌شود در رگه‌ها سیلیکات آلومین به‌جای مسکویت

پایدار می‌شود. وجود رگه‌های کیانیت‌دار، نشان می‌دهد که سیالیت آلومینیوم تنها محدود به رخساره آمفیبولیت بالایی نبوده بلکه در درجات پایین‌تر هم اتفاق می‌افتد (Kerrick, 1988). بنابراین رگه‌های دارای سیلیکات آلومین در منطقه همدان از سیالات آبداری حاصل شده‌اند که در اثر آبدزایی طی واکنش‌های دگرگونی در اعماق حاصل شده و به افق‌های بالاتر تزریق شده‌اند.

#### ۴-۶-۳- آندالوزیت

با اینکه حضور آندالوزیت در گستره دگرگونی همدان بسیار زیاد است، اما محدوده‌ی آندالوزیت شیب‌ها (بدون سیلیمانیت و استارولیت) کم وسعت بوده، و اکثر آندالوزیت‌ها در آندالوزیت - سیلیمانیت - شیب‌ها یا آندالوزیت - استارولیت شیب‌ها دیده می‌شوند. در داخل آندالوزیت شیب‌ها گاهی رگه‌های سیلیس تزریق گردیده که یا از کوارتز تنها تشکیل شده و یا دارای بلورهای درشت آندالوزیت نیز هستند، به عبارت دیگر، اولین ظهور رگه‌های کوارتزی دارای سیلیکات آلومین در آندالوزیت شیب‌های شرق زمان‌آباد است. آندالوزیت‌ها، معمولاً قبل از سیلیمانیت بوجود آمده‌اند و در بسیاری موارد، دارای بافت پوئی کیلوبلاستیک با ادخال‌های فراوان گرافیت و ادخال‌های کمتری از کوارتز و بیوتیت هستند (نوع کیاستولیت). طبق مطالعات پیشین، دما و فشار تشکیل این سنگ‌ها به ترتیب ۶۲۸ درجه سانتی‌گراد و فشار حدود ۴ کیلوبار می‌باشد. بلورهای سیلیمانیت منشوری، گاه تمام حجم آندالوزیت را اشغال می‌کنند (حوالی زمان آباد). گسترش اصلی این سنگ‌ها در حوالی زمان آباد است و به‌طور کلی با گسترش توده‌ها یا رگه‌های پگماتیتهی در ارتباط است. آندالوزیت‌ها به‌صورت پورفیروبلاست داخل آندالوزیت گارنت شیب‌های منطقه زمان آباد واقع شده‌اند و فابریک چشمی را ایجاداند. افزون بر آن در سطح تعدادی از نمونه‌ها سرسیتی دیده می‌شود که دلیل بر تأثیر دگرگونی همبری و تبدیل آندالوزیت‌ها به سرسیت است در حالی که تعدادی نمونه که حجم کمی در منطقه هستند تقریباً فاقد سرسیت می‌باشند.

#### ۴-۷- تهیه نقشه گوهرشناسی منطقه همدان

با توجه به مطالعات گوهرشناسی صورت گرفته در منطقه همدان در نهایت، تمامی گوهرهای شناسایی شده در این مطالعه بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه آورده شده و برای اولین بار نقشه گوهرسنگ‌های بخشی از منطقه همدان تهیه شد که در شکل ۸ آورده شده است.

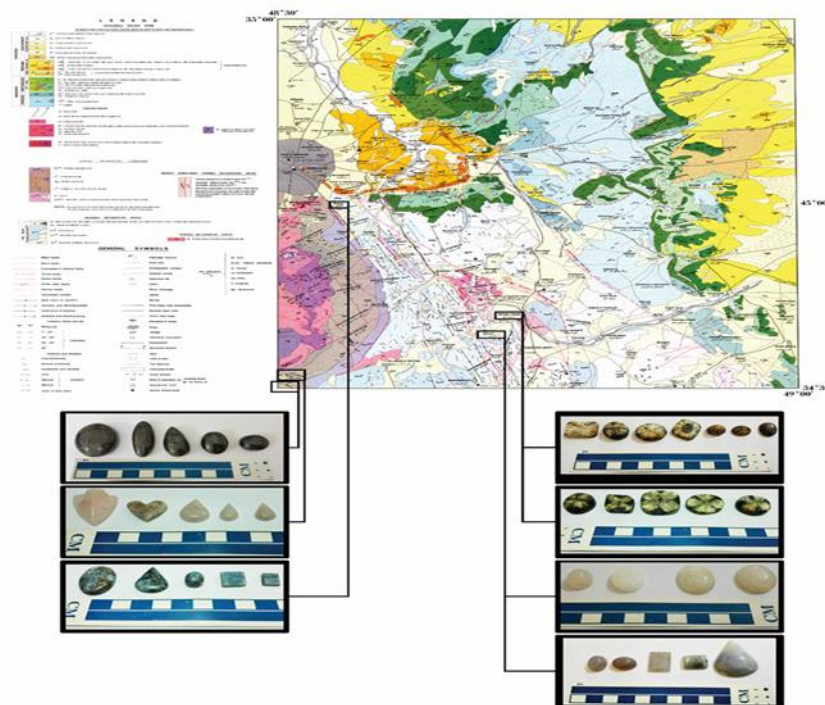
## ۵- نتیجه گیری

بر اساس پژوهش‌های انجام شده کلدیریت‌های میگماتیتهی موجود در منطقه بسیار درشت دانه می‌باشند که بالا رفتن سطح دمای دگرگونی و پدیده ذوب بخشی باعث رشد آنها شده است. این کلدیریت‌ها به فیبرولیت تبدیل نشده و اغلب نزدیک به توده‌های آذرین دیده می‌شوند. کلدیریت در زون‌های دگرگونی فلدسپار پتاسیم - کلدیریت، در مقاطع نازک بصورت همسانگرد دیده می‌شود. کلدیریت در زون کلدیریت - مسکویت بطور کامل پختی شده است. مقدار کسر مولی منیزیم (xMg) کلدیریت با افزایش درجه دگرگونی از زون فلدسپار پتاسیم - کلدیریت تا اسپینل - کلدیریت افزایش می‌یابد (۰/۴۵ تا ۰/۶۲). بلورهای کلدیریت موجود در هورنفلس‌های میگماتیتهی منطقه مورد مطالعه قطری حدود ۳۰ تا ۱ میلی‌متر را نشان می‌دهند. در میگماتیته‌ها کلدیریت به همراه اسپینل و سیلیمانیت بسیار درشت شده است بطوریکه اندازه طول آن تا ۳ سانتی‌متر و عرض ۱/۵ هم می‌رسد.

بلورهای کلدیریت موجود در هورنفلس‌ها به صورت پورفایروبلاست ظاهر می‌شوند و دارای ماکل پروانه‌ای شکل هستند. براساس مطالعات پتروگرافی حاوی ادخال‌های فراوانی از کوارتز، بیوتیت و اسپینل (رنگ سبز) هستند. رگه‌های کوارتزی موجود در منطقه چشین که در هورنفلس‌ها شکل گرفته‌اند دارای کیانیت هستند، کیانیت به طور مشخص خاص رگه‌های کوارتزی در منطقه است، اما در سنگ‌های دگرگونی مجاورتی و در سنگ‌های مجاور توده نیز دیده می‌شود. بلورهای کیانیت موجود در رگه‌های کوارتزی منطقه مورد مطالعه حالت کشیده و سابدرال، بافت سنگ پرفیروگرانوبلاستیک و به صورت عمود یا با زاویه زیاد نسبت به دیواره رگه‌ها تشکیل شده‌اند. آندالوزیت به

صورت گسترده در سنگ‌های دگرگونی دیناموترمال (در زون آندالوزیت، فیبرولیت و سیلیمانیت) دیده می‌شود در مزوسوم میگماتیته‌ها، آندالوزیت به صورت ناپایدار قابل مشاهده است، در این صورت، حاشیه‌ای از اسپینل و آنورتیت در اطراف آن دیده می‌شود. براساس مطالعات گوهرشناسی انجام شده، (۱) کلدیریت‌ها برای تراش فست (چندوجهی) مناسب نیستند، به خاطر اینکه ماهیت نیمه شفاف دارند و توانایی برای عبور نور ندارند. همچنین مراحل تراش انجام شده، نشان می‌دهند که تراش‌های دامله، فانتزی و هنری برای این سنگ‌ها مناسب هستند، (۲) کیانیت‌ها برای تراش فست (چندوجهی)، دامله، فانتزی مناسب هستند، به خاطر اینکه ماهیت شفاف دارند و توانایی برای عبور نور را دارند. همچنین این نوع کیانیت‌ها از کیفیت صیقل خوری بسیار بالایی برخوردارند و (۳) با توجه به اینکه میزان شفافیت کیاستولیت (آندالوزیت دارای طرح صلیبی) ترنسولست تا اپک می‌باشد باید به صورت کابوشن (گنبدی) تراش داده شوند و برای تراش فست (چند وجهی) مناسب نمی‌باشند. با توجه به مطالب آورده شده در این مقاله، بر اساس دما و فشار تشکیل، بر اساس سختی و خصوصیات ماکروسکوپی، فرآوری و تراش، همچنین بر اساس تقسیم‌بندی‌های کانی‌شناسی و ساختار منطقه‌ای، منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل بالایی برای تشکیل گوهرهای کلدیریت، کیانیت و کیاستولیت می‌باشد.

با توجه به حجم نمونه‌های گوهری در منطقه پیشنهاد می‌شود که به جهت اشتغال‌زایی جوانان کارگاه‌های متعدد گوهرتراشی در منطقه احداث شود. علاوه بر این برای دستیابی به کیفیت بهتر و ارزش اقتصادی بیشتر نمونه‌های تراش داده شده، مطالعه مقاطع نازک و بررسی خصوصیات گوهرشناسی کانی‌ها قبل از تراش پیشنهاد می‌شود.



شکل ۸- نقشه گوهرشناسی منطقه همدان.

Fig. 8. Gemological map of Hamadan area.

## تقدیر و تشکر

نویسندگان از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز بدلیل در اختیار قرار دادن منابع مالی (پژوهانه) با شماره SCU.EG97 کمال سپاسگزاری را دارند.

## منابع

- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros Fold - Thrust Belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of science* 300, 1-20.
- Baharifar, A.A., 1997. New perspective on petrogenesis of the regional metamorphic rocks of Hamadan area. M.Sc. Thesis, Tarbiat Moallem University of Tehran, Iran.
- Baharifar, A.A., 2004. Petrogenesis of the metamorphic rocks of Hamadan area. Ph.D Thesis, Tarbiat Moallem University of Tehran, Iran.
- Cavosie, A., Sharp, Z. D., Selverstone, J., 2002. Co-existing aluminum silicates in quartz veins: a quantitative approach for determining andalusite-sillimanite equilibrium in natural samples using oxygen isotopes. *American Mineralogist* 84, 417-423.
- Clark, D. B., 1995. Cordierite in felsic igneous rocks - A synthesis. *Mineralogical Magazine* 59, 311-325.
- Ghorbani, M., 2003. Gem minerals and rocks in Iran. *Arian Zamin*, p. 396.
- Grambling, J. A., 1981. Kyanite, andalusite, sillimanite, and related mineral assemblages in the Truchas Peaks region, New Mexico. *American Mineralogist* 66, 702-722.
- Holland, T.J.B., Powell, R., 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology* 16, 309-344.
- Holtz, F., Johannes, W., 1991. Genesis of peraluminous granites. I. Experimental investigation of melt composition at 3 and 5 kilobar and various H<sub>2</sub>O activities. *Journal of petrology* 32, 935-985.
- Hyndman, D.W., 1985. *Petrology of Igneous and Metamorphic Rocks*. 2nd edn, Mc Graw Hill, New York, p.786.
- Kerrick, D.M., 1988. Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>-bearing segregations in the Lepontine Alps, Switzerland: Aluminum mobility in metapelites, *Geology* 16, 636-640.
- Kretz, R., 1983. Symbols for rock forming minerals: *American Mineralogy* 68, 277-279.
- Leake, B. E., Skirrow, G., 1960. The pelitic hornfelses of the Cashel-Lough Wheelaun intrusion, County Galway, Eire. *Journal of Geology* 68, 23-40.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., Sahandi, M.R., 2003. Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Science* 21, 397-214.
- Okrusch, M., Evans, B. W., 1970. Minor element in coexisting andalusite and sillimanite, *Lithos* 3, 261-862.
- Pereira, M.D., Bea, F., 1994. Cordierite - producing reactions in the Pena Negra complex, Alvilva Batholith. Central Spain, the key role of cordierite in low - pressure unatexis. *Canadian Mineralogy* 32, 763-780.
- Rumble, D., 1973. Andalusite, kyanite, and sillimanite from the Mount Moosilauke region, New Hampshire, *Geological Society of America Bulletin* 84, 242-342.
- Sadeghian, M., 1994. Study of igneous and metamorphic petrology of Cheshmeh Ghasaban area. M.Sc. Thesis, University of Tehran, Iran.
- Saki, A., 2011. Formation of spinel - cordierite - plagioclase symplectites replacing andalusite in metapelitic of the Alvand aureole, Iran. *Geological Magazine* 145(3), 423-434.
- Saki, A., Moazzen, M. Baharifar, A., 2012. Migmatites microstructures and partial melting of the Hamadan pelites within the Alvand aureole, West Iran. *International Geology Review* 54(11), 1229-1240.
- Sepahi, A. A., Whitney, D.L., Baharifar, A.A., 2004. Petrogenesis of And - Ky - Sil veins and host rocks, Sanandaj - Sirjan metamorphic belt, Hamadan, Iran. *Journal of metamorphic Geology* 22(2), 119-134.
- Sepahi, A.A., 1999. Petrology of the Alvand Plutonic Complex with special reference to granitoids. Ph.D Thesis, Tarbiat Moallem University of Tehran, Iran.
- Torkian, A., 1995. Study of petrography and petrological of Alvand pegmatite, Hamadan. M.Sc. Thesis, University of Tehran, Iran.

