



## پetroگرافی، مینرال شیمی و زمین فشار - دماسنجی شیست‌های آندالوزیت‌دار شمال ازنا (پهنه سنندج - سیرجان شمالی، ایران)

کریم عبدالمهی سیلابی<sup>1</sup>، سید محسن طباطبائی منش<sup>1\*</sup> و سمیه کریمی<sup>2</sup>

(1) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

(2) دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خوراسگان، باشگاه پژوهشگران جوان، اصفهان، ایران

دریافت: 1393/2/9، پذیرش: 1394/2/13

### چکیده

سنگهای دگرگونی شمال ازنا در زون سنندج - سیرجان قرار دارد و در نتیجه تأثیر حرارتی توده گرانیتهی مرزبان بر روی سنگهای پلیتی قدیمی تر به وجود آمده‌اند. این دگرگونه‌ها شامل انواع میکاشیست، آندالوزیت‌شیست و متابازیت با بافتهای لپیدوبلاستی و پورفایروبللاستی هستند. از نظر کانی‌شناسی، کانیهای مهم تشکیل‌دهنده نمونه‌های شیست شامل آندالوزیت، گارنت، فلدسپار، مسکویت، بیوتیت، کوارتز و کلریت است. ترکیب شیمیایی کانیهای موجود در شیست‌های آندالوزیت‌دار این منطقه بیانگر آن است که میکای سفید دارای ترکیب مسکویت، پلاژیوکلاز غنی از عضو انتهایی آلبیت، آندالوزیت با ترکیب شیمیایی 7/8% درصد کاتیونی آلومینا و 1/3% درصد کاتیونی آهن، جزو ذخایر غنی برای آلومینیوم است. گارنت موجود در این سنگها دارای ترکیب متوسط 68 درصد آلماندین، 25 درصد اسپسارتین و 4 درصد پیروپ است. رسم مقاطع میکروزوندی در گارنت‌ها نشان می‌دهد که گارنت‌های مورد بررسی، منطقه‌بندی خفیفی نشان می‌دهند. کلریت‌های موجود در این سنگها غنی از ریپیدولیت هستند و بیوتیت‌ها نیز عمدتاً از عضوهای انتهایی سیدروفیلیت-آنیت تشکیل شده‌اند. تغییرات مربوط به Al بیوتیت مربوط به جانشینی چرماک و تغییرات Ti بیوتیت تابعی از دماست.

سنگهای متاپلیتی ازنا بر اساس بررسیهای صورت گرفته در رخساره هورنبلند هورنفلس دگرگون شده و بر پایه بررسیهای ترموبارومتري در دمای حدود 592-692°C و فشار حدود 1/07 تا 4/12 کیلوپا تشکیل شده‌اند. پس از تشکیل این سنگها ماگماتیسم گرانیتهی دگرگونی مجاورتی این سنگها و تشکیل شیست‌های لکه‌ای عمدتاً آندالوزیت‌دار را موجب شده است.

واژه‌های کلیدی: پetroگرافی، مینرال شیمی، آندالوزیت، ازنا، پهنه سنندج - سیرجان، ایران

### مقدمه

ارومیه - دختر، پهنه سنندج - سیرجان و کمربند چین‌خورده زاگرس است (Ghasemi and Talbot, 2005). مرز زون سنندج - سیرجان با مجموعه ماگمایی ارومیه - دختر، به سمت شرق توسط مجموعه‌ای از فرورفتگیهای ساختاری که حاصل کمپرسیون است، شکل می‌گیرد. پهنه سنندج - سیرجان یک زوج نوار دگرگونی (عمدتاً در حد رخساره‌های شیست‌سبز، آمفیبولیت و اکلوزیت) است که در انتهای کرتاسه در اثر برخورد قاره‌ای بین قاره افریقا - عربی و خرده قاره ایران مرکزی بالا آمده است (Mohajjel and Fergusson, )

منطقه مورد بررسی در حدفاصل 10 کیلومتری شمال ازنا (استان لرستان) و محدوده عرض جغرافیایی 32° 33' تا 36° 33' شمالی و طول جغرافیایی 49° 25' تا 49° 30' شرقی واقع شده و از نظر ساختاری بخشی از پهنه سنندج - سیرجان است (Mohajjel et al., 2003). این پهنه در واقع بخشی از کمربند کوهزایی زاگرس است؛ که حاصل باز و بسته شدن اقیانوس نئوتتیس بوده و از شمال شرق به جنوب غرب شامل سه محدوده زمین‌ساختی موازی شامل مجموعه ماگمایی

دگرشکلی را به صورت چند مرحله‌ای پشت سر گذاشته است. این فازها شامل 1- دگرشکلی  $D_1$ ، هم‌زمان با دگرگونی دیناموترمال ( $M_1$ ) و حاصل آغاز فرورانش پوسته اقیانوس تتیس جوان به زیر صفحه ایران در ژوراسیک پایانی؛ 2- دگرشکلی  $D_2$ ، هم‌زمان با دگرگونی حرارتی ( $M_2$ ) و حاصل برخورد قاره‌ای در پالئوسن و 3- دگرشکلی  $D_3$ ، هم‌زمان با دگرگونی دیناموترمال ( $M_3$ ). این دگرشکلی که یک دگرشکلی پیش‌رونده است، مورفولوژی فعلی این زون را سبب شده است (Shabanian borujeni, 2008). در برخی قسمت‌ها رگه‌های آپلیت در شکستگیها تزریق شده است. این رگه‌ها در آخرین فاز فعالیت ماگمایی در مرحله پنوماتولیتیک ایجاد شده‌اند و با روند شمال غربی - جنوب شرقی در سنگهای اطراف خود نفوذ کرده‌اند. در منطقه مورد بررسی، دو دسته گسل عمده و بزرگ وجود دارند؛ که عبارتند از (Barzegari, 2011):

- 1) گسلهایی با روند شمال شرقی - جنوب شرقی با سازوکار راست‌گرد، و
  - 2) گسلهایی با سازوکار شمال غربی - جنوب شرقی، با سازوکار راندگی که عملکرد آن به موازات راندگی اصلی زاگرس است.
- بر اساس بررسیهای برزگری (Barzegari, 2011)، شکستگیها و درزه‌ها در سنگهای منطقه دارای روند شمال غربی - جنوب شرقی هستند و ساختارهایی که دارای این روند باشند، احتمالاً در ارتباط با برخورد صفحه عربی با خرده قاره ایران مرکزی در کرتاسه پایینی - پالئوسن و در جهت عمود بر عملکرد ماکزیمم فشار وارد در منطقه شکل گرفته‌اند؛ که احتمالاً در ارتباط با ساز و کار گسلهای راندگی هستند.

#### روش مطالعه

پس از بررسی و نمونه‌برداری صحرائی از تعدادی نمونه سنگ، به منظور بررسی پتروگرافی و میکروسکپی مقطع نازک تهیه شد. بعد از بررسیهای پتروگرافی، تعیین نوع کانیها و بافت سنگها، نمونه‌های مناسبی به منظور انجام آنالیزهای نقطه‌ای و آنالیز سنگ کل انتخاب شد. مجموعه‌ای از روشهای متداول پترولوژیکی مانند بررسی ویژگیهای بافتی و ساختی توسط میکروسکپ Olympus- BH2 انجام شد، آنالیز نقطه‌ای نمونه‌های موردنظر این پژوهش به وسیله دستگاه الکترون میکروپروب مدل Cameca SX 100 با قدرت 15KV و

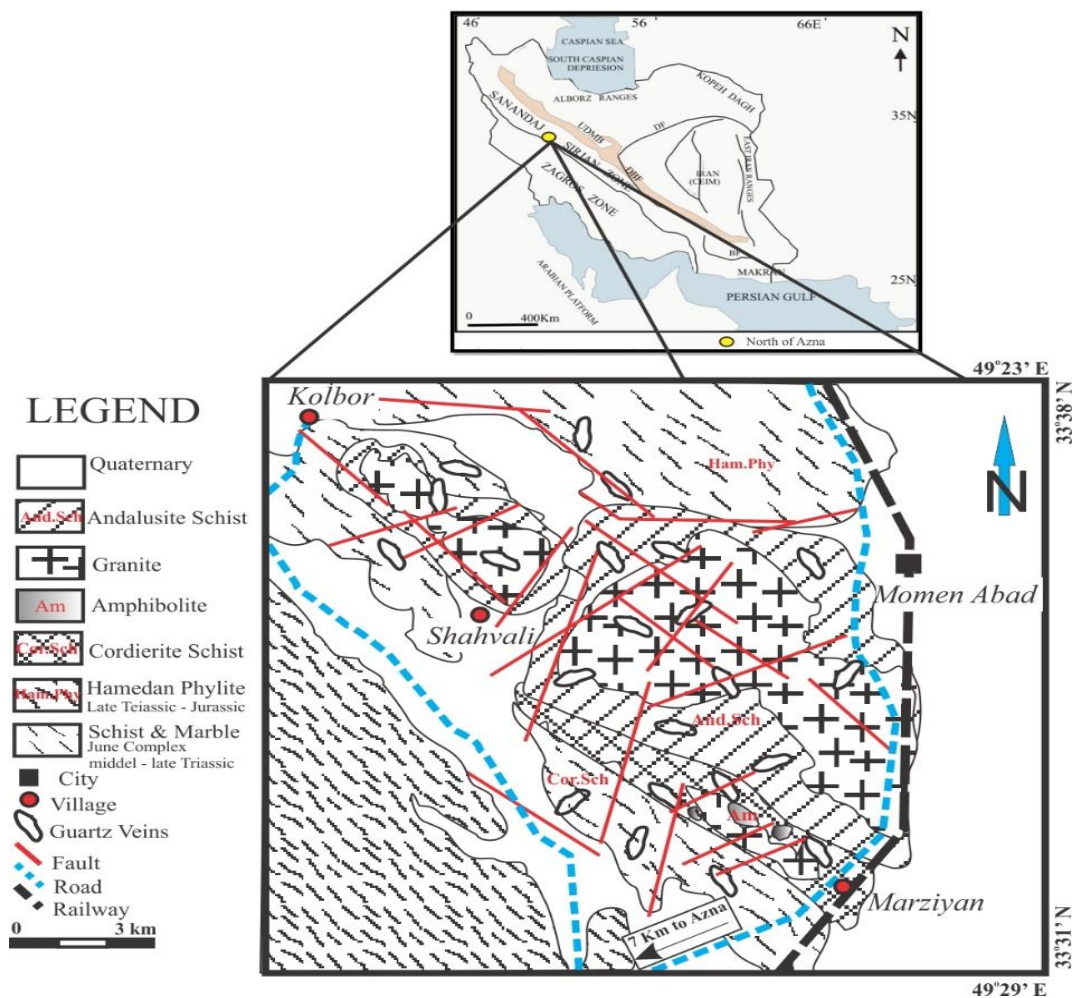
مهمترین حادثه دگرشکلی و دگرگونی که پهنه سنندج - سیرجان را تحت تأثیر قرار داده است؛ در ارتباط با حادثه تکتونیک باز و بسته شدن اقیانوس نئوتتیس است (Alavi, 1994; Mohajjel et al., 2003; Aghanabati, 2004; Ghasemi and Talbot, 2005). درحقیقت پهنه زمین‌ساختی کوه‌زاد زاگرس، حاصل فرورانش و برخورد صفحه عربی و خرده قاره ایران مرکزی در زمان کرتاسه پایانی تا ترشیری (فاز کوه‌زایی لارامید) (Mohajjel and Fergusson, 2000; Mohajjel et al., 2003) است. توده نفوذی ازنا مانند بسیاری از توده‌های گرانیتوئیدی زون سنندج - سیرجان، شکل عدسی کشیده با روند شمال باختری - جنوب خاوری دارد (شکل 1). پژوهشهای گوناگونی از جمله (Soheili, 1993; Mohajjel, 1997; Mohajjel, 1998; Mohajjel and Fergusson, 2000; Mokhtari, 2007; Shabanian borujeni, 2008) در محدوده منطقه مورد بررسی و مناطق اطراف آن صورت گرفته است؛ که عمدتاً بر روی توده‌های نفوذی و فعالیتهای زمین‌ساختی منطقه متمرکز شده‌اند. معمولاً در حاشیه این بررسیها به سنگهای دگرگونی نیز اشاره شده است. بررسیهای زمین‌دماسنجی و زمین‌فشارسنجی که غالباً بر پایه تجربه‌های آزمایشگاهی و محاسبات و مدل‌سازیهای ترمودینامیکی کانیها بنا شده‌اند، به درک بهتر شرایط دما و فشار حاکم بر سنگها در طی فرآیندهای زمین‌شناسی، کمک مؤثری کرده‌اند. از این‌رو در این پژوهش سعی شده است؛ تا با تکیه بر بررسیهای پتروگرافی و مینرال‌شیمی، شرایط ترمودینامیکی تشکیل متاپلیت‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

#### زمین‌شناسی منطقه

در اواخر دوران دوم، یعنی کرتاسه، در اثر نفوذ توده‌های گرانیتی ازنا (فاز لارامید) و دگرگونی مجاورتی، شیریه‌های باقی‌مانده از این توده‌ها (سیلیسی و فلدسپاتی) به موازات شیستوزیته در شیست‌های منطقه نفوذ کرده است و بعد در اثر تحولات ساختاری زون سنندج - سیرجان و فازهای زمین‌ساخت به دست آمده، سنگها دچار چین‌خوردگی و گسلش شده‌اند. از این‌رو، منطقه ازنا دارای مجموعه‌های متنوع سنگ‌شناسی با درجه متفاوتی از دگرگونی و دگرشکلی است (شکل 1)؛ که شامل انواع شیست‌ها، متابازیت و میلونیت گرانیت‌هاست. این منطقه، فازهای مختلف دگرگونی و

اختصاری مورد استفاده در متن برگرفته از (Whitney and Evans, 2010) است و عبارتند از: گارنت (Grt)، بیوتیت (Bt)، آلکالی فلدسپار (Afs)، مسکویت (Ms)، کلریت (Chl)، پلاژیوکلاز (Pl)، کوارتز (Qtz)، آندالوزیت (And)، تورمالین (Tur)، آلبیت (Ab)، آنورتیت (An) و ارتوکلاز (Or).

شدت 50nA در انستیتوی مینرالوژی دانشگاه اشتوتگارت آلمان انجام شد و در نهایت محاسبه ژئوترموبارومتری با استفاده از بانک داده‌های Geo-Path (Perchuk, 1991) صورت گرفت. در این پژوهش توجه اصلی به مجموعه Grt، Bt، Chl، Ms، And معطوف شد؛ که به‌عنوان مجموعه کانیایی حساس به تغییرات شرایط دگرگونی هستند. علایم



شکل 1. نقشه زمین‌شناسی منطقه شمال ازنا

Fig. 1. Geological map of North of Azna region

متابلیتی ازنا، وجود بافتهای لپیدوبلاستی و پورفایروبلاستی را می‌توان نام برد. از نظر کانی‌شناسی، کانیهای تشکیل‌دهنده این سنگها شامل آندالوزیت، گارنت، فلدسپار، مسکویت، بیوتیت، کوارتز و کلریت هستند. این سنگها در نتیجه تأثیر حرارتی توده گرانیتی مرزیان بر روی سنگهای پلیتی قدیمی‌تر به وجود آمده‌اند (شکل 2).

### شواهد صحرایی

مجموعه سنگهای دگرگونی ناحیه‌ای منطقه ازنا عبارتند از: شیست‌های کوارتز و فلدسپاری و انواع میکاشیست‌ها، شیست‌های آندالوزیت‌دار و کوارتزیت. شیست‌ها دارای نسبت‌های متفاوتی از کوارتز، فلدسپار، آندالوزیت، مسکویت، بیوتیت و گارنت هستند. از ویژگیهای بافتی شیست‌های



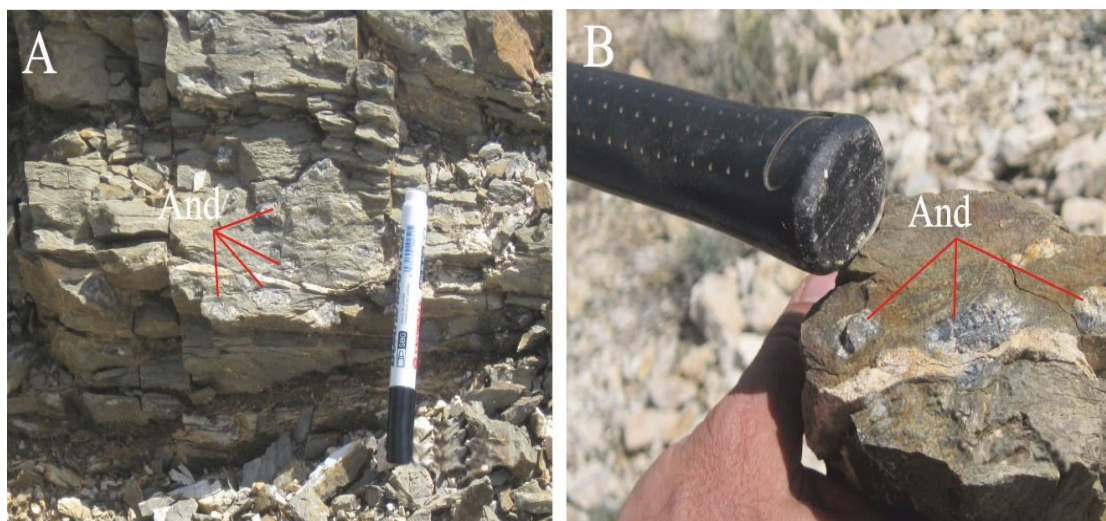
شکل 2. نفوذ توده گرانیتهی در سنگهای متاپلیتی منطقه شمال ازنا

Fig. 2. Intrusion of granitic rocks in the North of Azna metapelitic rocks

شیست‌ها جدا می‌شوند. از آن‌جا که میزان فراوانی آندالوزیت‌ها در شیست‌های لکه‌دار به 30 تا 60 درصد می‌رسد، می‌توان نام شیست‌های آندالوزیت‌دار را برای سنگ انتخاب کرد. در مقاطع میکروسکوپی آندالوزیت به مقدار کم تا زیاد به سریسیت تبدیل شده است. در این سنگها مقدار فلدسپار کم و گارنت به‌عنوان کانی فرعی به‌صورت پراکنده در زمینه قرار گرفته است. مسکویت با 18 درصد فراوانی در زمینه و به‌خصوص در اطراف آندالوزیت‌ها دیده می‌شود.

سنگهای متاپلیتی ازنا در دو دسته شیست‌های آندالوزیت‌دار و میکاشیست‌ها به شرح زیر قرار می‌گیرند:

**الف) شیست‌های آندالوزیت‌دار:** در نمونه دستی رنگ آنها خاکستری تا سبز خیلی تیره بوده و تورق آنها با نزدیک شدن به توده نفوذی کم می‌شود. درون این شیست‌ها می‌توان پورفیرهای درشت آندالوزیت را به‌راحتی دید (شکل A-3 و B). رنگ این آندالوزیت‌ها در نمونه دستی از قرمز روشن تا خاکستری و سبز روشن متغیر است و اندازه آنها در نمونه دستی به حدود 8 تا 10 سانتی‌متر می‌رسد؛ که به راحتی از

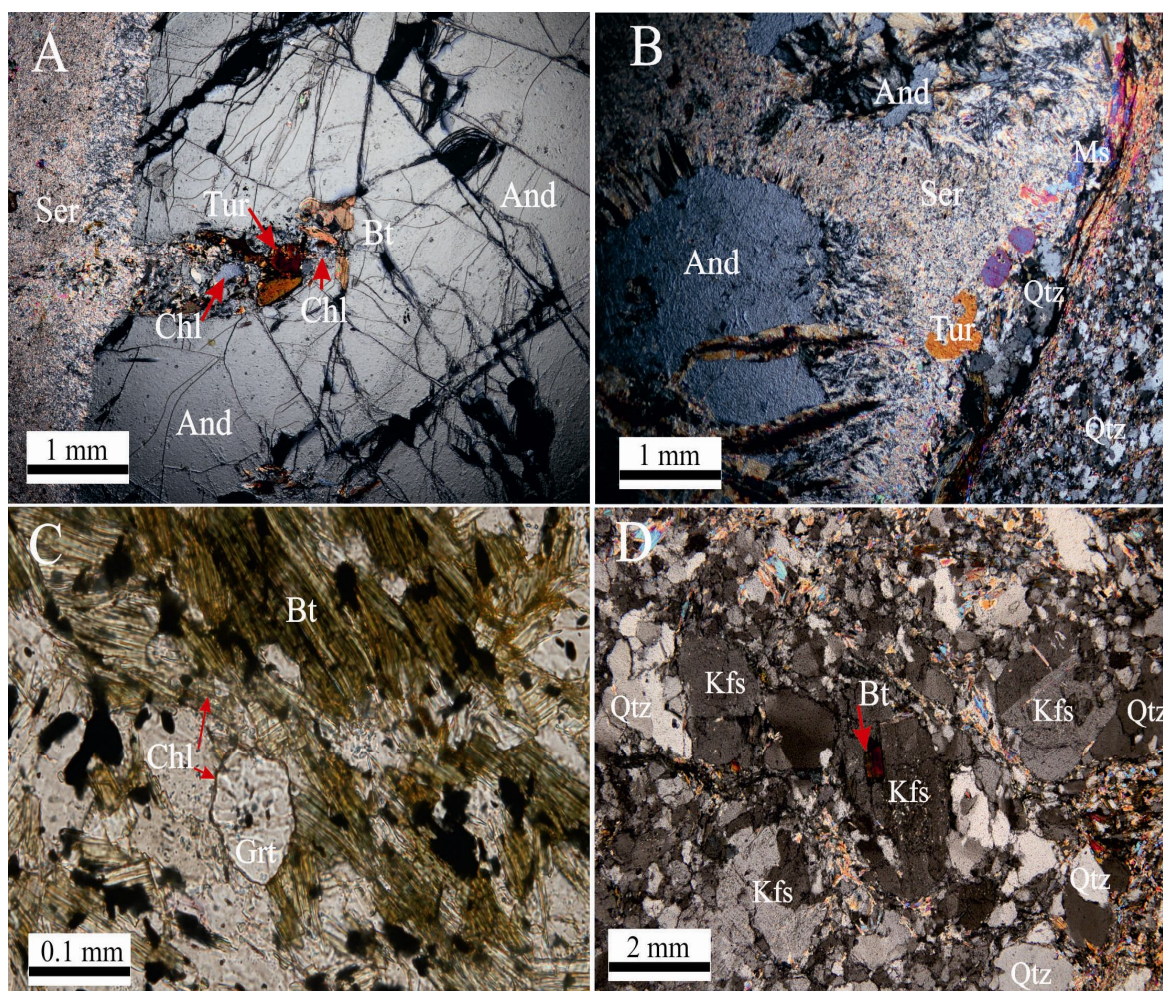


شکل 3. A و B: بلورهای درشت آندالوزیت در نمونه‌های صحرایی منطقه شمال ازنا

Fig. 3. A and B: Large crystals of andalusite in North of Azna field samples

ثانویه به شکل سریسیت بوده که به حاشیه پورفیرهای آندالوزیت‌های محدود می‌شوند. در نمونه‌های مورد بررسی گارنت‌ها با اندازه نسبتاً کوچک در زمینه قرار گرفته‌اند و بدون هرگونه ادخال هستند (شکل C-4). این گارنت‌ها نیز مانند آندالوزیت‌ها تحت تأثیر دگرگونی قهقرایی قرار گرفته و به کلریت دگرسان شده‌اند. مقدار فلدسپار این سنگها فراوان نیست و زیر فشار خرد شده‌اند و تحت تأثیر نفوذ محلولها در مجاورت این شکستگیها مسکویت ریزدانه رشد کرده است (شکل D-4).

در اثر واکنش آندالوزیت با سیال‌های سرشار از پتاسیم، بلورهای آندالوزیت به‌طور ناقص به سریسیت تبدیل می‌شوند. تجزیه آندالوزیت به سریسیت و کلریت (شکل A-4 و B)، بیوتیت و گارنت به کلریت (شکل C-4)، بیانگر رخداد دگرگونی قهقرایی در این سنگهاست. حضور کانیه‌های Al دار (به‌خصوص And) بر منشأ پلیتی این سنگ دلالت دارد. در این سنگها، مسکویت‌ها به دو شکل دیده می‌شوند (شکل 4-B)، مسکویت‌های ریز اولیه که در زمینه پراکنده‌اند و در اطراف آندالوزیت‌ها دیده می‌شود. نوع دوم، مسکویت‌های



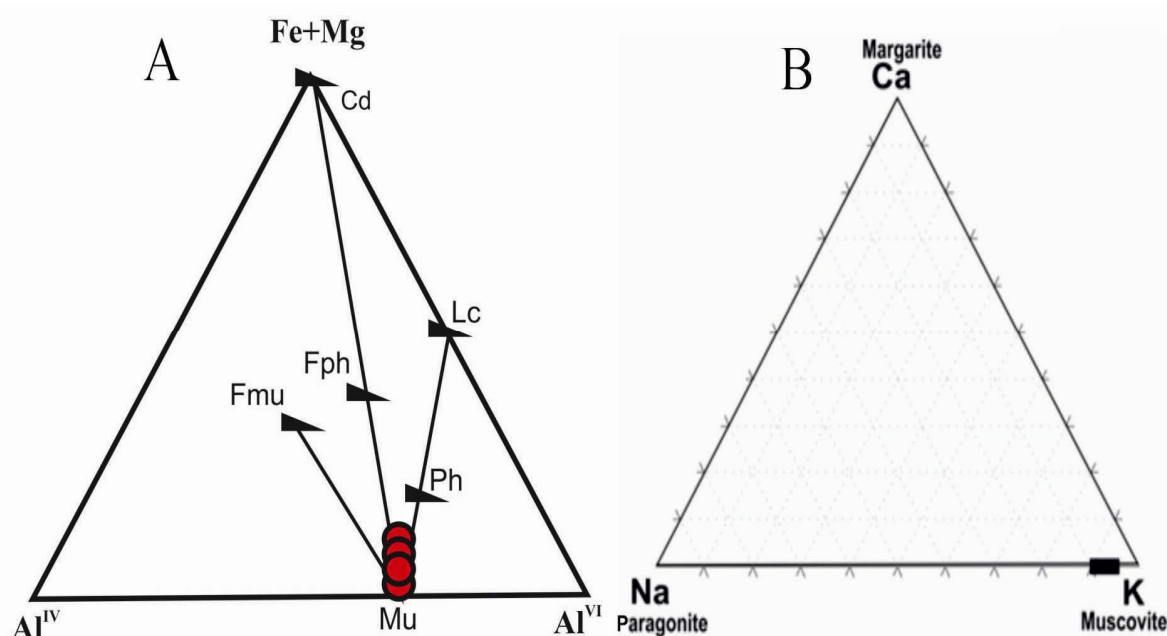
شکل 4. تصاویر میکروسکوپی شیست‌های آندالوزیت دار منطقه شمال ازنا (همگی در نور XPL، علایم اختصاری تصویرها: Bt: بیوتیت، Tur: تورمالین، And: آندالوزیت، Chl: کلریت، Ser: سریسیت، Qtz: کوارتز، Ms: مسکویت، Grt: گارنت و Kfs: فلدسپات پتاسیک)، A و B: تجزیه آندالوزیت به سریسیت و حضور مسکویت در اطراف آن، C: گارنت با حاشیه کلریتی و بیوتیت در حال تجزیه به کلریت و D: آلکالی فلدسپارهای خرد شده تحت تأثیر فشار

**Fig. 4.** Microscopic images of North of Azna andalusite-bearing schists (XPL, mineral abbreviations: Bt: biotite, Tur: tourmaline, And: andalusite, Chl: chlorite, Ser: sericite, Qtz: quartz, Ms: muscovite, Grt: garnet, Kfs: Alkali feldspar), A and B: andalusite destruction to sericite and presence of muscovite around of andalusite, C: garnet with chlorite rim and conversion biotite to chlorite, and D: crushed alkali feldspar affected by stress

### شیمی کانی میکای سفید

میکای سفید گروه مهمی از کانیهای موجود در سنگهای پلیتی محسوب می‌شوند؛ که در سنگهای مورد بررسی به دو شکل مسکویت دانه درشت در زمینه سنگ و مسکویت ریزدانه یا سیریسیت در اطراف آندالوزیت‌ها مشاهده می‌شوند. از نظر ترکیبی طبق نمودار فین‌استرا (Feenstra, 1996) (شکل 5 A و B) میکای سفید موجود از نوع مسکویت با میزان ناچیزی از فنژیت است. نتایج آنالیز نقطه‌ای مسکویت‌های مورد بررسی در جدول 1 آورده شده است.

ب) میکاشیست‌ها: این سنگها برحسب فراوانی انواع کانیهای میکایی و سایر کانیهای سیلیکاتی مهم موجود در آنها به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. از شیست‌هایی که در این منطقه شناسایی شده‌اند، می‌توان به کلریت شیست، کلریت سیریسیت شیست، سیریسیت شیست، سیریسیت بیوتیت شیست، بیوتیت مسکویت شیست، کوردیریت مسکویت شیست و مسکویت شیست، اشاره کرد. بافت اصلی این میکاشیست‌ها لپیدوبلاستی و لپیدوپورفیروبلاستی است و کانیهای آنها دارای جهت‌یافتگی ترجیحی ضعیف تا متوسطی هستند.



شکل 5. موقعیت ترکیبی مسکویت‌های موجود در متاپلیت‌های شمال ازنا A: بر روی نمودار مثلثی Ca-K-Na (Feenstra, 1996) و B: بر روی نمودار مثلثی Fe+Mg-Al<sup>IV</sup>-Al<sup>VI</sup> (Feenstra, 1996).

(Lc= leucophyllite, Ph= phengite, Cd= cladonite, Mu= muscovite, Fmu= ferrimuscovite and Fph= ferriphengite)

**Fig. 5.** Muscovite combination plots of North of Azna metapelites: A: On the Ca-K-Na triangular diagram (Feenstra, 1996) and B: On the Fe+Mg-Al<sup>IV</sup>-Al<sup>VI</sup> triangular diagram (Feenstra, 1996).

(Lc= leucophyllite, Ph= phengite, Cd= cladonite, Mu= muscovite, Fmu= ferrimuscovite and Fph= ferriphengite)

### آندالوزیت

وجود  $Al_2O_3$  به مقدار حداقل 54% و بیشینه اکسید آهن 1/5%، اکسید تیتانیم 2% و اکسیدهای قلیایی مانند سدیم و پتاسیم 2% در مواد اولیه برای تهیه مواد نسوز مولایتی استفاده می‌شود (Ling-chu and Yi, 2010; Shao-Zhu et al., 2013). نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی 4 مورد آندالوزیت در جدول 2 ارائه شده است.

چندریختیهای گروه آندالوزیت (شامل آندالوزیت، سیلیمانیت و کیانیت) دارای ترکیب شیمیایی یکسان ( $Al_2SiO_5$ ) و ویژگیهای فیزیکی متفاوت هستند. پایداری گرمایی آندالوزیت با مقدار آلومینیوم و ناخالصیهای Fe, Mn و Ti ارتباط مستقیم دارد (Zhang et al, 2004). از آندالوزیت به شرط

جدول 1. نتایج آنالیز نقطه‌ای کانی مسکوویت (بر اساس 22 اکسیژن) در منطقه شمال ازنا

**Table 1.** Electron microprobe analyses results of muscovite (based on 22 oxygene) from the North of Azna region

| Sample                         | A5-1   |        |        |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mineral                        | Ms     | Ms     | Ms     | Ms     | Ms     | Ms     |
| Analysis                       | 103    | 104    | 105    | 107    | 108    | 131    |
| SiO <sub>2</sub>               | 45.35  | 44.66  | 43.31  | 44.19  | 45.42  | 47.74  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.72   | 0.83   | 0.81   | 0.68   | 0.28   | 0.71   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 34.61  | 34.65  | 32.9   | 34.38  | 34.04  | 32.59  |
| FeO                            | 1.02   | 0.86   | 0.91   | 1      | 1.58   | 1.97   |
| MnO                            | 0.04   | 0.02   | 0      | 0.04   | 0.02   | 0.02   |
| MgO                            | 0.56   | 0.46   | 0.54   | 0.05   | 0.8    | 1.37   |
| CaO                            | 0.02   | 0.01   | 0.02   | 0.01   | 0.03   | 0.03   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.58   | 0.57   | 0.41   | 0.58   | 0.5    | 0.41   |
| K <sub>2</sub> O               | 9.8    | 9.62   | 8.83   | 9.81   | 9.61   | 10.26  |
| H <sub>2</sub> O               | 4.4    | 4.36   | 4.19   | 4.31   | 4.38   | 4.49   |
| Total                          | 97.1   | 96.04  | 91.92  | 95.05  | 96.66  | 99.59  |
| Si                             | 6.176  | 6.142  | 6.202  | 6.154  | 6.221  | 6.371  |
| Al <sup>IV</sup>               | 1.824  | 1.858  | 1.798  | 1.846  | 1.779  | 1.629  |
| Sum_T                          | 8      | 8      | 8      | 8      | 8      | 8      |
| Al <sup>VI</sup>               | 3.727  | 3.754  | 3.75   | 3.793  | 3.711  | 3.493  |
| Ti                             | 0.074  | 0.086  | 0.087  | 0.071  | 0.029  | 0.071  |
| Fe <sup>2+</sup>               | 0.116  | 0.099  | 0.109  | 0.116  | 0.181  | 0.22   |
| Mn                             | 0.005  | 0.002  | 0      | 0.005  | 0.002  | 0.002  |
| Mg                             | 0.114  | 0.094  | 0.115  | 0.01   | 0.163  | 0.273  |
| Ca                             | 0.003  | 0.001  | 0.003  | 0.001  | 0.004  | 0.004  |
| Na                             | 0.153  | 0.152  | 0.114  | 0.157  | 0.133  | 0.106  |
| K                              | 1.703  | 1.688  | 1.613  | 1.743  | 1.679  | 1.747  |
| Total                          | 13.895 | 13.876 | 13.791 | 13.896 | 13.902 | 13.916 |

جدول 2. نتایج آنالیز نقطه‌ای کانی آندالوزیت (بر اساس 20 اکسیژن) در منطقه شمال ازنا

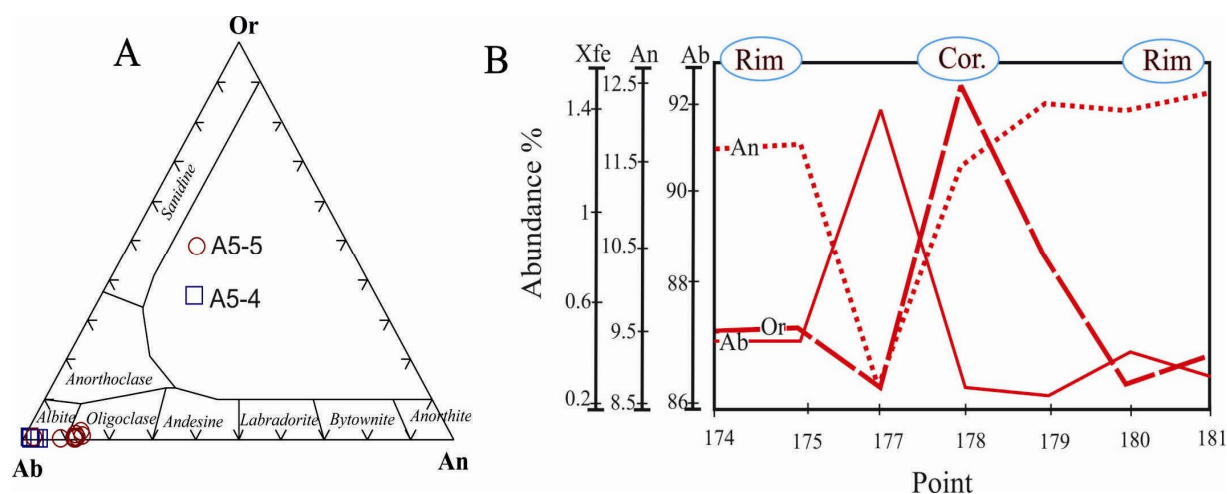
**Table 2.** Electron microprobe analyses results of andalusite (based on 20 oxygene) from the North of Azna region.

| Sample                         | A5-2   |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Mineral                        | And    | And    | And    | And    |
| Analysis                       | 125    | 126    | 127    | 128    |
| SiO <sub>2</sub>               | 26.593 | 26.119 | 26.145 | 36.744 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.489  | 0.525  | 0.479  | 0.025  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 54.291 | 55.05  | 54.115 | 62.264 |
| FeO                            | 13.157 | 13.387 | 12.955 | 0.184  |
| MnO                            | 0.516  | 0.608  | 0.529  | 0      |
| MgO                            | 1.142  | 1.26   | 1.245  | 0.023  |
| CaO                            | 0      | 0      | 0      | 0      |
| Na <sub>2</sub> O              | 0      | 0.0013 | 0      | 0      |
| K <sub>2</sub> O               | 0.025  | 0      | 0.005  | 0.002  |
| H <sub>2</sub> O               | 3.787  | 3.05   | 4.527  | 0.758  |
| Total                          | 100    | 100    | 100    | 100    |
| Si                             | 3.253  | 3.177  | 3.256  | 3.998  |
| Al                             | 7.821  | 7.926  | 7.844  | 7.988  |
| Ti                             | 0.045  | 0.048  | 0.044  | 0.002  |
| Fe <sup>2+</sup>               | 1.346  | 1.357  | 1.338  | 0.017  |
| Mn                             | 0.053  | 0.062  | 0.055  | 0      |
| Mg                             | 0.259  | 0.228  | 0.228  | 0.004  |
| Total                          | 12.781 | 12.801 | 12.767 | 12.001 |

## پلاژیوکلاز

برای تعیین ترکیب این کانی، تعداد کاتیون‌ها بر اساس 8 اتم اکسیژن محاسبه شد و 13 مورد از آنالیز نقطه‌ای بیانگر پلاژیوکلازهای مورد بررسی، در جدول 3 آورده شده است. اختلاف قابل توجهی بین ترکیب پلاژیوکلازها در نمونه‌های مختلف وجود ندارد. طبق با نمودار مثلثی Ab-Or-An که توسط دیبر (Deer et al., 2001) ارائه شده است ترکیب دو

نمونه از پلاژیوکلازها در این نمودار (شکل 6-A)، نشان‌دهنده ترکیب آل بیت و الیگوکلاز است. همچنین، با ترسیم نمودار میکروزوندی برای نمونه‌ها، مقدار آنورتیت به طرف مرکز کاهش و مقدار آل بیت افزایش می‌یابد. ارتوکلاز با مقدار بسیار جزئی، در مرکز افزایش و در حاشیه‌های بلور کاهش نشان می‌دهد (شکل 6-B).



شکل 6. نمودارهای ترکیب پلاژیوکلازهای منطقه شمال ازنا A: قرارگیری پلاژیوکلازهای مورد بررسی در محدوده آل بیت و الیگوکلاز در نمودار (Deer et al., 2001)، و B: نمودار منطقه‌بندی ترکیبی PI از حاشیه به حاشیه بلور (Rim- حاشیه و Cor- مرکز)

**Fig. 6.** North of Azna plagioclase compositional diagrams: A: plotted study plagioclases in the albite-oligoclase field on Deer et al., 2001 diagram and B: PI compositional zoning diagram from rim to rim

## گارت

بر اساس بررسیهای صورت گرفته بر روی 10 نمونه آنالیز نقطه‌ای این کانی (جدول 4)،  $X_{Mg}^{Grt}$  بین 0/049 و 0/081 متغیر است و اعضای انتهایی آن به ترتیب فراوانی عبارتند از: 65 تا 71% آلماندین، 20 تا 31% اسپارتین، 1/04 تا 1/58% گروسولار و 3/9 تا 8/12% پیروپ.

مقدار کاتیون‌های Ca و Mn بیشترین تأثیر را بر ریخت‌شناسی بلورهای گارت دارد. این در حالی است که مقدار Mg تأثیر کمی بر پیکربندی بلوری این کانی می‌گذارد. با توجه به میزان دما و فشار محیط Ca، Mg، Mn، برای جای‌گزینی در ساختار گارت به صورت انتخابی عمل می‌کنند؛ به‌صورتی که در درجه‌های پایین دما و فشار Mn و Ca وارد ساختار گارت می‌شوند و گارت‌های گراسولار و اسپسارتین را تشکیل می‌دهند. در حالی که به موازات پیشرفت دگرگونی

مقدار آلماندین آن در گارت افزایش می‌یابد (Hossein Mirzaei et al., 2010).

در دماهای پایین گارت در همسایگی کلریت دارای منیزیم بیشتری است. این مسأله، از آن جهت اهمیت دارد؛ که طی دگرگونی پیش‌رونده  $X_{Mg}^{Chl}$  (0/45-0/41) همیشه از  $X_{Mg}^{Grt}$  (0/09 – 0/04) هم‌زیست آن بیشتر است و بنابراین، این پدیده نشانه محدود شدن پایداری کلریت آهن‌دار و افزایش منیزیم گارت و کلریت هم‌زیست است (Bucher and Frey, 1994).

شکل 7-A پروفیل تغییرات  $X_{Ca}$ ،  $X_{Fe}$ ،  $X_{Mn}$ ،  $X_{Mg}$  را از حاشیه به حاشیه گارت نشان می‌دهد، که بیانگر منطقه‌بندی ترکیبی خفیف است. شکل 7-B موقعیت نقاط آنالیز شده را در تصویر BSI کانی گارت نشان می‌دهد.



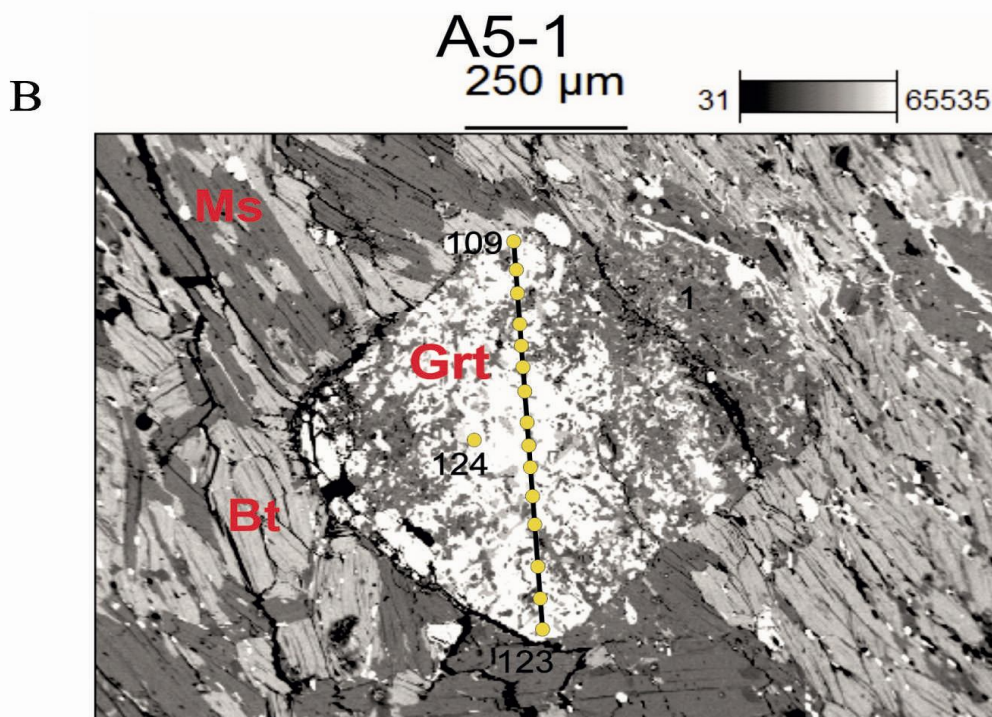
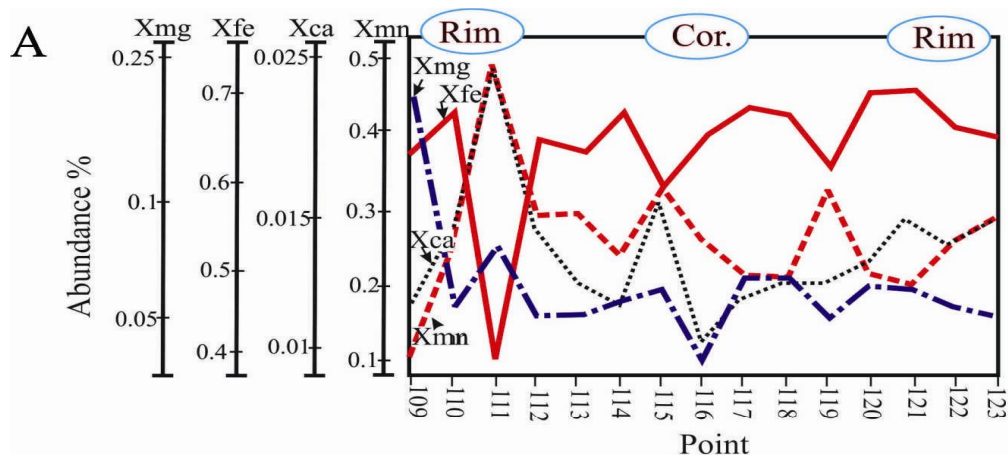
منطقه‌بندی گارنت‌ها به تغییر ترکیب زمینه و سیال وابسته است و در یک سیستم بسته مستقیماً به دسترس بودن واکنش‌گرها و میزان کامل بودن واکنش مربوط می‌شود. گارنتی که در شرایط دگرگونی درجه بالا رشد کرده باشد، یا بعد در شرایط دگرگونی درجه بالا قرار گیرد، ناحیه‌بندی نشده است و نیم‌رخی هموار دارد (Barker, 1991). گارنت‌های دگرگونی، در دماهای پایین، دارای منطقه‌بندی عادی هستند و در مرکز از Mn غنی شده‌اند. اما زمانی که دگرگونی در دمایی بالاتر از 700 درجه سانتی‌گراد باشد؛ زونینگ رشدی گارنت‌ها در نتیجه سرعت بالای توزیع عناصر تا حدودی و یا

به‌طور کامل همگن خواهد شد (Carlson and Schwareze, 1997). با توجه به دمای به‌دست آمده از ترمومتری گارنت - بیوتیت که حدود 700 درجه سانتی‌گراد است، می‌توان عنوان کرد، دلیل منطقه‌بندی نشدن شدید گارنت مورد بررسی، بالا بودن سرعت توزیع عناصر در این دماست؛ که مانع از شکل‌گیری منطقه‌بندی شده است. پژوهش‌های (Perchuk et al., 2008) نشان می‌دهد، توزیع همگن این عناصر و از حالت منطقه‌ای خارج شدن آنها در کانیهای فرمونیزین مثل گارنت، نشانه درجه بالای دگرگونی و توزیع هموزن عناصر در این کانی است.

### جدول 3. نتایج آنالیز نقطه‌ای کانی پلاژیوکلاز در منطقه شمال ازنا بر اساس 8 اکسیژن

**Table 3.** Electron microprobe analyses results of plagioclase from the North of Azna region based on 8 oxygen

| Sample                         | A5-1  |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Mineral                        | Pl    | Pl    | Pl    | Pl    | Pl    | Pl    | Pl    | Pl    |
| Analysis                       | 174   | 175   | 176   | 177   | 178   | 179   | 180   | 181   |
| SiO <sub>2</sub>               | 63.97 | 65.33 | 54.97 | 65.85 | 64.61 | 64.89 | 64.70 | 64.73 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.00  | 0.02  | 0.04  | 0.01  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 21.78 | 20.30 | 28.98 | 20.39 | 21.34 | 21.56 | 21.38 | 21.26 |
| FeO                            | 0.00  | 0.00  | 0.30  | 0.00  | 0.00  | 0.01  | 0.00  | 0.00  |
| MnO                            | 0.00  | 0.00  | 0.37  | 0.00  | 0.02  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| MgO                            | 0.00  | 0.17  | 0.00  | 0.03  | 0.04  | 0.02  | 0.01  | 0.02  |
| CaO                            | 2.51  | 2.51  | 0.35  | 1.86  | 2.48  | 2.65  | 2.57  | 2.66  |
| Na <sub>2</sub> O              | 10.48 | 10.48 | 4.31  | 10.87 | 10.50 | 10.44 | 10.33 | 10.44 |
| K <sub>2</sub> O               | 0.09  | 0.09  | 6.66  | 0.05  | 0.28  | 0.15  | 0.05  | 0.07  |
| BaO                            | 0.00  | 0.00  | 0.04  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| Total                          | 98.84 | 98.90 | 96.01 | 99.06 | 99.26 | 99.71 | 99.05 | 99.17 |
| Si                             | 2.85  | 2.91  | 2.58  | 2.92  | 2.87  | 2.87  | 2.88  | 2.88  |
| Al                             | 1.14  | 1.06  | 1.60  | 1.07  | 1.12  | 1.12  | 1.12  | 1.11  |
| Ca                             | 0.12  | 0.12  | 0.02  | 0.09  | 0.12  | 0.13  | 0.12  | 0.13  |
| Na                             | 0.91  | 0.90  | 0.39  | 0.93  | 0.90  | 0.89  | 0.89  | 0.90  |
| K                              | 0.01  | 0.01  | 0.40  | 0.00  | 0.02  | 0.01  | 0.00  | 0.00  |
| Total                          | 5.03  | 5.01  | 5.01  | 5.01  | 5.03  | 5.02  | 5.01  | 5.02  |
| X <sub>Ca</sub>                | 0.12  | 0.12  | 0.02  | 0.09  | 0.11  | 0.12  | 0.12  | 0.12  |
| An                             | 11.64 | 11.64 | 2.18  | 8.62  | 11.35 | 12.19 | 12.07 | 12.28 |
| Ab                             | 87.84 | 87.84 | 48.53 | 91.09 | 87.14 | 86.98 | 87.64 | 87.32 |
| Or                             | 0.52  | 0.52  | 49.29 | 0.29  | 1.51  | 0.83  | 0.29  | 0.4   |



شکل 7. بررسی زونینگ ترکیبی گارنت‌های منطقه شمال ازنا (علایم اختصاری شکلها: Bt: بیوتیت، Ms: مسکویت و Grt: گارنت)، A: پروفیل تغییرات  $X_{Ca}$  و  $X_{Fe}$ ،  $X_{Mn}$ ،  $X_{Mg}$  گارنت از حاشیه به حاشیه (Rim: حاشیه و Cor: مرکز) و B: تصویر BSI گارنت و موقعیت نقاط آنالیز شده بر روی آن

**Fig. 7.** Investigation of compositional zoning of North of Azna garnets: (Mineral abbreviations: Bt: biotite, Ms: muscovite and Grt: garnet), A:  $X_{Fe}$ ,  $X_{Mn}$ ,  $X_{Mg}$  and  $X_{Ca}$  garnet profiles from rim to rim and B: BSI image of garnet and location of analysis points on it

1. ترکیب شیمیایی سنگ میزبان؛

2. مؤلفه‌های سیال، نظیر فوگاسیته اکسیژن، اکتیویته یون‌های  $Mg^{2+}$ ، غلظت سولفور، PH یا غلظت یونی (Ciesielczuk, 2002).

کلریت

این کانی عمدتاً از تجزیه کانیهای فرومنیزین مانند گارنت و بیوتیت در دگرگونی قهقرایی ایجاد می‌شود. عاملهایی که در ترکیب شیمیایی کلریت نقش تعیین‌کننده دارند، بدین شرح هستند:

به‌دست آمده از آنالیز نقطه‌ای کلریت (شکل 8)، کلریت‌های موجود در متاپلیت‌های شمال ازنا که در طی دگرگونی برگشتی تشکیل شده‌اند، دارای ترکیب ریپیدولیت هستند.

فرمول ساختاری کلریت‌ها بر مبنای 14 اکسیژن محاسبه شده است. نتایج محاسبه فرمول ساختاری برای 13 مورد آنالیز نقطه‌ای کلریت در جدول 5 آورده شده است. براساس نتایج

جدول 4. نتایج آنالیز نقطه‌ای گارنت‌های موجود در شیست‌های آندالوزیت‌دار منطقه شمال ازنا براساس 24 اکسیژن

**Table 4.** Electron microprobe analyses results of garnet from the North of Azna andalusite-bearing schists based on 24 oxygene

| Sample                         | A5-1   |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mineral                        | Grt    | Grt    | Grt    | Grt    | Grt    | Grt    | Grt    | Grt    |
| Analysis                       | 109    | 110    | 111    | 112    | 113    | 114    | 115    | 116    |
| SiO <sub>2</sub>               | 42.722 | 35.249 | 35.324 | 35.264 | 35.463 | 35.311 | 38.715 | 29.24  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.063  | 0.007  | 0.015  | 0.017  | 0.003  | 0.032  | 0.122  | 0.042  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.853 | 20.394 | 20.351 | 20.54  | 20.368 | 20.396 | 25.39  | 20.536 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.032  | 0.018  | 0.026  | 0.009  | 0      | 0.023  | 0.025  | 0.023  |
| FeO                            | 21.7   | 29.562 | 29.566 | 28.368 | 27.347 | 29.141 | 17.209 | 23.585 |
| MnO                            | 3.592  | 10.061 | 10.075 | 11.742 | 11.846 | 9.985  | 8.714  | 8.683  |
| MgO                            | 4.369  | 1.315  | 1.25   | 1.099  | 1.154  | 1.433  | 1.091  | 1.588  |
| CaO                            | 0.283  | 0.5    | 0.462  | 0.495  | 0.395  | 0.365  | 0.346  | 0.263  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.03   | 0.026  | 0.02   | 0.013  | 0.02   | 0.016  | 0.132  | 0      |
| K <sub>2</sub> O               | 0.411  | 0.017  | 0.04   | 0.028  | 0.035  | 0.037  | 3.723  | 0.005  |
| Total                          | 87.582 | 97.088 | 97.043 | 97.525 | 96.576 | 96.663 | 91.587 | 83.937 |
| Si                             | 7.334  | 5.945  | 5.959  | 5.931  | 5.995  | 5.965  | 6.353  | 5.633  |
| Ti                             | 0.008  | 0.001  | 0.002  | 0.002  | 0      | 0.004  | 0.015  | 0.006  |
| Al                             | 3.005  | 4.054  | 4.046  | 4.071  | 4.058  | 4.06   | 4.91   | 4.663  |
| Fe                             | 3.115  | 4.169  | 1.171  | 3.99   | 3.865  | 4.116  | 2.361  | 3.8    |
| Mn                             | 0.522  | 1.437  | 1.44   | 1.673  | 1.696  | 1.428  | 1.211  | 1.417  |
| Mg                             | 1.118  | 0.331  | 0.314  | 0.276  | 0.291  | 0.361  | 0.267  | 0.456  |
| Ca                             | 0.052  | 0.09   | 0.084  | 0.089  | 0.072  | 0.066  | 0.061  | 0.054  |
| Total                          | 15.155 | 16.027 | 16.016 | 16.031 | 15.976 | 16.001 | 15.177 | 16.029 |
| xmg                            | 0.233  | 0.055  | 0.104  | 0.046  | 0.049  | 0.061  | 0.068  | 0.012  |
| Xfe                            | 0.648  | 0.692  | 0.379  | 0.652  | 0.652  | 0.689  | 0.605  | 0.663  |
| Xca                            | 0.011  | 0.015  | 0.023  | 0.015  | 0.012  | 0.011  | 0.016  | 0.009  |
| Endmembers                     |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Py                             | 23.259 | 5.486  | 5.233  | 4.572  | 4.909  | 6.043  | 6.843  | 7.965  |
| Alm                            | 64.795 | 69.172 | 69.419 | 66.197 | 65.254 | 68.929 | 60.546 | 66.348 |
| Gro                            | 1.083  | 1.499  | 1.39   | 1.48   | 1.208  | 1.106  | 1.56   | 0.948  |
| Sp                             | 10.863 | 23.844 | 23.959 | 27.751 | 28.629 | 23.921 | 31.051 | 24.74  |

ادامه جدول 4. نتایج آنالیز نقطه‌ای گارنت‌های موجود در شیست‌های آندالوزیت‌دار منطقه شمال ازنا براساس 24 اکسیژن

**Table 4 (Continued).** Electron microprobe analyses results of garnet from the North of Azna andalusite-bearing schists based on 24 oxygene

| Sample                         |        | A5-1   |        |        |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mineral                        | Grt    | Grt    | Grt    | Grt    | Grt    | Grt    | Grt    |
| Analysis                       | 117    | 118    | 119    | 120    | 121    | 122    | 123    |
| SiO <sub>2</sub>               | 35.315 | 35.45  | 35.116 | 35.371 | 35.463 | 35.332 | 34.964 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.022  | 0.013  | 0.057  | 0.032  | 0.017  | 0.023  | 0.017  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20.546 | 20.413 | 20.786 | 20.51  | 20.321 | 20.413 | 19.952 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.015  | 0.004  | 0.038  | 0.02   | 0.015  | 0.023  | 0.01   |
| FeO                            | 29.907 | 29.599 | 26.35  | 29.877 | 30.456 | 28.835 | 27.114 |
| MnO                            | 8.885  | 8.993  | 13.194 | 8.729  | 8.606  | 10.6   | 11.334 |
| MgO                            | 1.953  | 1.855  | 1.144  | 1.698  | 1.68   | 1.293  | 1.088  |
| CaO                            | 0.357  | 0.404  | 0.399  | 0.438  | 0.493  | 0.46   | 0.477  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0      | 0.039  | 0.009  | 0.039  | 0      | 0      | 0      |
| K <sub>2</sub> O               | 0      | 0      | 0.141  | 0.01   | 0.01   | 0      | 0.145  |
| Total                          | 96.985 | 96.727 | 97.046 | 96.655 | 97.036 | 96.956 | 94.946 |
| Si                             | 5.935  | 5.968  | 5.918  | 5.96   | 5.966  | 5.959  | 6.01   |
| Ti                             | 0.003  | 0.002  | 0.007  | 0.004  | 0.002  | 0.003  | 0.002  |
| Al                             | 4.069  | 4.05   | 4.129  | 4.07   | 4.029  | 4.058  | 4.042  |
| Fe                             | 4.203  | 4.166  | 3.723  | 4.21   | 4.284  | 4.067  | 3.897  |
| Mn                             | 1.265  | 1.282  | 1.883  | 1.246  | 1.226  | 1.514  | 1.65   |
| Mg                             | 0.489  | 0.466  | 0.287  | 0.427  | 0.421  | 0.325  | 0.279  |
| Ca                             | 0.064  | 0.073  | 0.072  | 0.079  | 0.089  | 0.083  | 0.088  |
| Total                          | 16.028 | 16.006 | 16.01  | 15.999 | 16.018 | 16.009 | 15.967 |
| xmg                            | 0.081  | 0.078  | 0.048  | 0.072  | 0.07   | 0.055  | 0.047  |
| Xfe                            | 0.698  | 0.693  | 0.624  | 0.706  | 0.712  | 0.679  | 0.659  |
| Xca                            | 0.011  | 0.012  | 0.012  | 0.013  | 0.015  | 0.014  | 0.015  |
| Endmembers                     |        |        |        |        |        |        |        |
| Py                             | 8.127  | 7.776  | 4.826  | 7.156  | 6.998  | 5.429  | 4.715  |
| Alm                            | 69.802 | 69.592 | 62.346 | 70.62  | 71.16  | 67.902 | 65.9   |
| Gro                            | 1.068  | 1.217  | 1.21   | 1.326  | 1.476  | 1.388  | 1.485  |
| Sp                             | 21.003 | 21.415 | 31.618 | 20.897 | 20.366 | 25.282 | 27.9   |

#### بیوتیت

بیوتیت در سنگهای متنوعی از درجه دگرگونی کم و متوسط تا بالا دیده می‌شود؛ به طوری که در شیست‌ها و هورنفلس‌ها یکی از کانیه‌های اصلی به شمار می‌رود. در سنگهای مورد

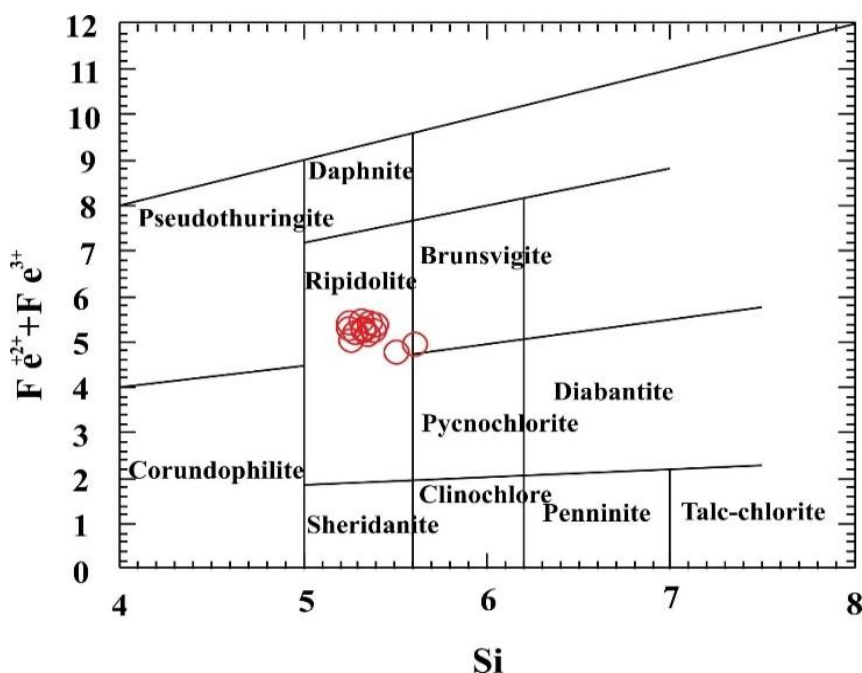
بررسی، مقدار این کانی نسبتاً کم تا متوسط و حضور آن به صورت پراکنده در زمینه سنگ محدود است. نتایج محاسبه فرمول ساختاری 11 نمونه آنالیز نقطه‌ای از این کانی در جدول 6 ارائه شده است. بر اساس جدول یادشده نمونه‌ها از

همراه نیز بر مقدار تیتانیوم موجود در بیوتیت مؤثرند (Dymek, 1983; Henry et al., 2005). به هر حال می‌توان گفت، دما بیشترین تأثیر را بر روی محتوای Ti بیوتیت داشته و تأثیر فشار بر عکس تأثیر دماست. به این معنی که افزایش Ti در طی افزایش دما و کاهش فشار امکان‌پذیر است (Forbes and Flower, 1974; Robert, 1976; Arima and Edgar, 1981; Tronnes et al., 1985; Henry et al., 2005).

همچنین میزان Ti در بیوتیت، به‌طور کلی با افزایش مقدار Fe افزایش می‌یابد (Arima and Edgar, 1981; Abrecht and Hewitt, 1988).

\*FeO غنی (18/82 - 29/62) و از محتوای MgO نسبتاً پایین (6/74 - 11/95) برخوردارند. بنابراین، می‌توان گفت عضوهای انتهایی سیدروفیلیت-آنیت تشکیل‌دهنده‌های اصلی بیوتیت هستند (شکل 9).

در شکل 10 تغییرات مربوط به Al مربوط به جانشینی چرماک (2Al = (Mg, Fe, Si)) است. در بیوتیت‌های مورد بررسی، مقدار Ti بین 0/01 تا 0/24 و  $X_{Mg}^{Bt}$  نیز بین 0/214 تا 0/268 در نوسان است. مقدار Ti بیوتیت به‌عنوان تابعی از دما محسوب می‌شود (Engel and Engel, 1960; Kwak, 1968; Robert, 1976; Dymek, 1983; Patiño, 1993). البته عوامل دیگری مانند فشار، شیمی بلور و کانیهای

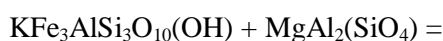


شکل 8. ترکیب کلریت‌های منطقه شمال ازنا که از نوع ریپیدولیت هستند (Hey, 1954; Deer et al., 1962).

Fig. 8. North of Azna chlorite composition is Ripidolite (Hey, 1954; Deer et al., 1962).

که در سنگهای دگرگونی از کاربرد گسترده‌ای برخوردارند، مستلزم تبادل Fe و Mg هستند. این روش معمول‌ترین روش ژئوترموبارومتری است. بوچر و فری (Bucher and Frey, 1994) در این روش تغییرات بین گارنت و بیوتیت را طبق واکنش زیر مورد بررسی قرار داده‌اند:

(1)



شرایط ترمودینامیکی تشکیل سنگهای مورد بررسی

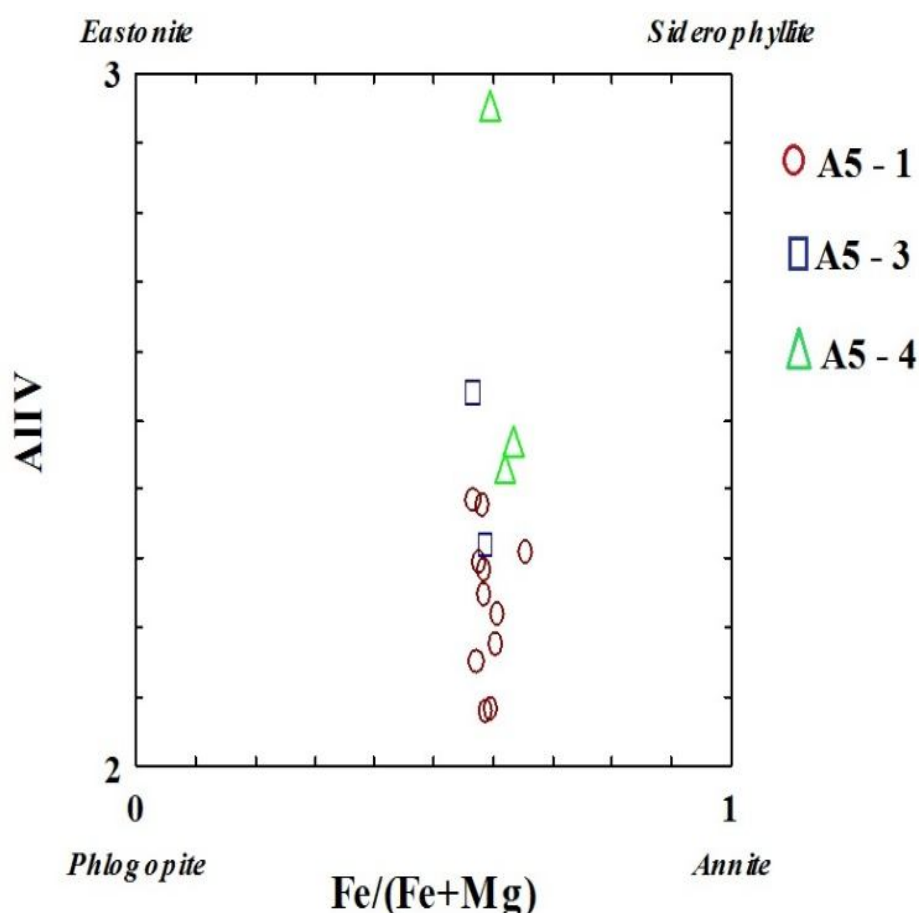
واکنشهای تبدیلی مستلزم آن است که دو اتم مشابه بین موقعیتهای مختلف یک کانی یا بین دو کانی جابه‌جایی انجام دهند. به علت این که تغییرات حجمی صورت گرفته در طی تبدیلات مورد نظر کم و تغییرات آنترپی زیاد است، در نتیجه واکنشهای تبدیلی تا حد زیادی مستقل از فشار بوده است و برای استفاده به عنوان ترمومتر دارای توانایی خوبی هستند (Bucher and Frey, 1994). بیشتر ترموبارومترهای تبدیلی



## مسیر دگرگونی

روند P-T، به‌عنوان یکی از منحصر به فردترین راه‌های ثابت تحول دمایی و دینامیکی کمپلکس‌های آذرین و دگرگونی محسوب می‌شود و بسیاری از مدل‌های ژئودینامیکی که بالآمدگی کمپلکس‌های آذرین و دگرگونی را تفسیر می‌کنند بر این روند استوارند (Tabatabaei manesh, 2007). از آن‌جا که مسیرهای P-T اساس ارزیابی‌های ژئودینامیکی هستند، روش‌های ترسیم آنها بسیار مهم است. همچنین ترسیم مسیرهای P-T بدون در نظر گرفتن اطلاعات پترولوژیکی و ساختاری دقیق نخواهد بود (Van reen et al., 2004).

با تصویر کردن فشار و دمای اندازه‌گیری شده از محاسبات ژئوترموبارومتري بر روی نمودار P-T (Yardly, 1989)، شکل 10 مشاهده شود؛ که دگرگونی به‌صورت پیش‌رونده در محدوده پایداری آندالوزیت از مرز پایداری آندالوزیت - سیلیمانیت گذشته و سپس با ورود به محدوده پایداری سیلیمانیت تا ابتدای رخساره آمفیبولیت پیشرفته و در طی دگرگونی برگشتی دوباره به محدوده آندالوزیت وارد شده است.



شکل 9. ترکیب شیمیایی بیوتیت‌های منطقه شمال ازنا بر روی نمودار دوتایی  $Al(IV) - Mg/(Mg+Fe^{2+})$ ، بیوتیت‌ها غنی از سیدروفیلیت-آنیت هستند (Guidotti, 1984).

**Fig. 9.** North of Azna biotite chemical composition on the Al(IV) via Mg/(Mg+Fe) diagram, biotites are sidrophylite-annite rich (Guidotti, 1984).

جدول 6. نتایج آنالیز نقطه‌ای کانی بیوتیت در منطقه شمال ازنا بر اساس 22 اکسیژن

Table 6. Electron microprobe analyses results of biotite from the North of Azna region based on 22 oxygene

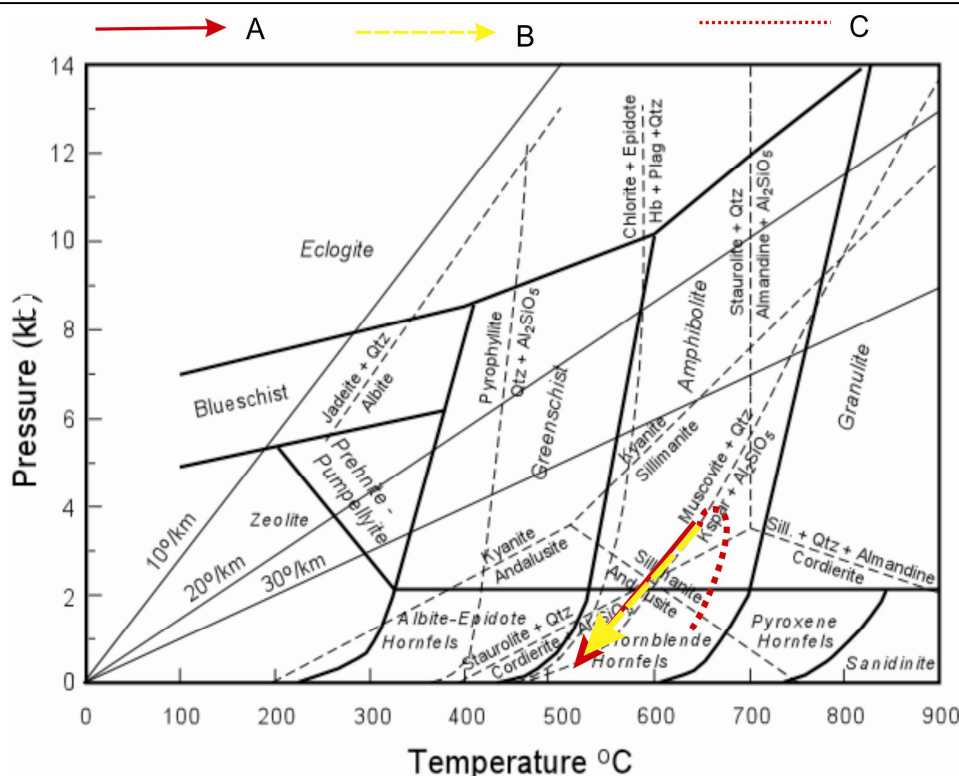
| Sample                         | A5-1   |        |        |        |       |        |        |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mineral                        | Bt     | Bt     | Bt     | Bt     | Bt    | Bt     | Bt     | Bt     | Bt     | Bt     |
| Analysis                       | 96     | 97     | 98     | 99     | 100   | 101    | 134    | 136    | 137    | 138    |
| SiO <sub>2</sub>               | 33.81  | 30.93  | 33.76  | 33.63  | 33.54 | 33.7   | 32.29  | 32.87  | 34.68  | 28.11  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.45   | 1.16   | 1.84   | 1.74   | 1.41  | 1.68   | 0.91   | 1.25   | 1.76   | 0.6    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17.64  | 16.34  | 16.77  | 16.88  | 17.43 | 16.08  | 15.92  | 18.6   | 17.71  | 20.21  |
| FeO                            | 20.46  | 20.46  | 21.26  | 20.99  | 21.27 | 21.36  | 18.82  | 23.01  | 22.2   | 26.44  |
| MnO                            | 0.2    | 0.2    | 0.2    | 0.14   | 0.14  | 0.13   | 0.07   | 0.26   | 0.24   | 0.31   |
| MgO                            | 8.26   | 8.697  | 7.55   | 8.16   | 8.28  | 7.71   | 6.74   | 9.74   | 8.63   | 11.35  |
| BaO                            | 0.08   | 0.06   | 0.1    | 0.07   | 0.06  | 0.05   | 0.04   | 0.05   | 0.11   | 0.02   |
| CaO                            | 0.31   | 0.25   | 0.35   | 0.23   | 0.32  | 0.3    | 0.22   | 0.2    | 0.19   | 0.09   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.15   | 0.08   | 0.15   | 0.06   | 0.13  | 0.09   | 0.05   | 0.04   | 0.01   | 0.04   |
| K <sub>2</sub> O               | 8.06   | 5.51   | 7.17   | 7.04   | 6.47  | 7.45   | 5.26   | 5.6    | 7.97   | 2.78   |
| H <sub>2</sub> O               | 1.78   | 1.65   | 1.75   | 1.75   | 1.76  | 1.73   | 1.61   | 1.8    | 1.83   | 1.75   |
| Total                          | 92.2   | 85.34  | 90.9   | 90.69  | 90.81 | 90.28  | 81.93  | 93.42  | 95.33  | 91.7   |
| Si                             | 5.708  | 5.618  | 5.783  | 5.756  | 5.719 | 5.827  | 6.009  | 5.465  | 5.685  | 4.822  |
| Al <sup>IV</sup>               | 2.292  | 2.382  | 2.217  | 2.244  | 2.281 | 2.173  | 1.991  | 2.535  | 2.315  | 3.178  |
| Al <sup>VI</sup>               | 1.215  | 1.113  | 1.166  | 1.158  | 1.219 | 1.102  | 1.498  | 1.107  | 1.104  | 0.905  |
| Ti                             | 0.184  | 0.158  | 0.237  | 0.224  | 0.181 | 0.219  | 0.127  | 0.156  | 0.217  | 0.077  |
| Fe <sup>2+</sup>               | 2.889  | 3.108  | 3.045  | 3.004  | 3.033 | 3.089  | 2.929  | 3.199  | 3.044  | 3.793  |
| Mn                             | 0.029  | 0.031  | 0.029  | 0.02   | 0.02  | 0.019  | 0.011  | 0.037  | 0.033  | 0.045  |
| Mg                             | 2.079  | 2.355  | 1.928  | 2.082  | 2.105 | 1.988  | 1.87   | 2.414  | 2.109  | 2.903  |
| Ba                             | 0.005  | 0.004  | 0.007  | 0.005  | 0.004 | 0.003  | 0.003  | 0.003  | 0.007  | 0.001  |
| Ca                             | 0.056  | 0.049  | 0.064  | 0.042  | 0.058 | 0.056  | 0.044  | 0.036  | 0.033  | 0.017  |
| Na                             | 0.049  | 0.028  | 0.05   | 0.02   | 0.043 | 0.03   | 0.018  | 0.013  | 0.003  | 0.013  |
| K                              | 1.736  | 1.277  | 1.567  | 1.537  | 1.407 | 1.643  | 1.249  | 1.188  | 1.667  | 0.608  |
| Total                          | 16.242 | 16.123 | 16.093 | 16.092 | 16.07 | 16.149 | 15.749 | 16.153 | 16.217 | 16.362 |
| Fe_FeMg                        | 0.58   | 0.57   | 0.61   | 0.59   | 0.59  | 0.61   | 0.61   | 0.57   | 0.59   | 0.57   |
| Mg_FeMg                        | 0.42   | 0.43   | 0.39   | 0.41   | 0.41  | 0.39   | 0.39   | 0.43   | 0.41   | 0.43   |

جدول 7. نتایج محاسبه ترموبارومتري (Geo - Path (Perchuk, 1991)) برای مجموعه Qtz+Ms+Bt+And+Grt در متاپلیت‌های منطقه شمال ازنا

Table 7. Thermobarometry calculated results (Geo - Path (Perchuk, 1991)) for Qtz+Ms+Bt+And+Grt assemblages in North of Azna metapelites

| Bt            | Grt | Ms  | X <sub>Mg</sub> <sup>Bt</sup> | X <sub>Mg</sub> <sup>Grt</sup> | X <sub>Ca</sub> <sup>Grt</sup> | X <sub>Al</sub> <sup>Ms</sup> | T°C | P kbar |
|---------------|-----|-----|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----|--------|
| (Sample A5-3) |     |     |                               |                                |                                |                               |     |        |
| 133           | 140 | 103 | 0.215                         | 0.051                          | 0.013                          | 0.96                          | 611 | 1.97   |
| 134           | 145 | 104 | 0.222                         | 0.064                          | 0.015                          | 0.98                          | 655 | 3.09   |
| 136           | 144 | 105 | 0.256                         | 0.066                          | 0.015                          | 0.96                          | 621 | 2.62   |
| 137           | 143 | 107 | 0.24                          | 0.081                          | 0.015                          | 0.98                          | 695 | 4.12   |
| 138           | 142 | 108 | 0.268                         | 0.071                          | 0.015                          | 1.12                          | 625 | 2.83   |
| 139           | 140 | 131 | 0.266                         | 0.058                          | 0.015                          | 0.91                          | 583 | 1.79   |
| (Sample A5-1) |     |     |                               |                                |                                |                               |     |        |
| 96            | 115 | 104 | 0.24                          | 0.068                          | 0.016                          | 0.96                          | 647 | 3.09   |
| 97            | 114 | 105 | 0.231                         | 0.061                          | 0.011                          | 0.98                          | 632 | 2.59   |
| 98            | 113 | 107 | 0.224                         | 0.049                          | 0.011                          | 0.96                          | 591 | 1.59   |
| 99            | 112 | 131 | 0.239                         | 0.046                          | 0.016                          | 0.98                          | 562 | 1.07   |





شکل 10. مسیر دگرگونی شیست‌های آندالوزیت دار منطقه شمال ازنا در نمودار تلفیقی P-T (Yardly, 1989) و نمودار رخساره های دگرگونی A: مسیر دگرگونی نمونه A5-3، B: مسیر دگرگونی نمونه A5-1 و C: مسیر احتمالی دگرگونی پیش‌رونده

**Fig. 10.** North of Azna andalusite-bearing schist metamorphism path on Compilation diagram of P-T (Yardly, 1989) and metamorphism facies A: metamorphism path of sample A5-3, B: metamorphism path of sample A5-1 and C: possible path of prograde metamorphism

**نتیجه‌گیری**

می‌کای سفید تشکیل شده از مسکویت با درصد ناچیزی از فنزیت است. نوع پلاژیوکلاز این سنگها غنی از عضو انتهایی آل بیت بوده و آندالوزیت‌ها در ترکیب شیمیایی خود از آلومینا با درصد کاتیونی 7/8 درصد و عنصر Fe با 1/2 درصد تشکیل شده‌اند. با توجه به میانگین بالای  $Al_2O_3$  با مقدار 54/50 درصد و اکسید تیتانیم با مقدار پایین 0/5 درصد در نمونه‌های آندالوزیتی، این نمونه‌ها جزو ذخایر غنی برای آلومینیوم هستند؛ ولی به دلیل بالابودن اکسیدهای قلیایی، قابلیت ماده اولیه مواد دیرگداز را ندارند. گارنت‌های مورد بررسی از نوع آلماندین است و مقدار این تشکیل‌دهنده به‌طور متوسط به 70 درصد می‌رسد،  $X_{Mg}^{Gr}$  بین 0/013 و 0/081 متغیر است و تغییرات اکسیدهای  $MnO$ ،  $MgO$  و  $FeO$  در ترکیب گارنت، از حاشیه زونینگ ترکیبی خفیفی را نشان می‌دهد. در ترکیب شیمیایی بیوتیت این سنگها، درصد وزنی Ti بین 0/01 تا 0/24،  $X_{Mg}^{Bt}$  نیز بین 0/214 تا 0/268 متغیر است و نوع بیوتیت‌ها شامل عضوهای انتهایی سیدروفیلیت-آنیت هستند.

سنگهای دگرگونی مورد بررسی شامل انواع شیست‌های لکه‌دار، شیست‌های کوارتز و فلدسپاری، سریسیت‌شیست، مسکویت‌شیست، فیلیت‌لکه‌ای، بیوتیت‌مسکویت‌شیست، مسکویت‌شیست، آندالوزیت‌شیست گارنت‌دار و مسکویت-بیوتیت‌شیست با بافتهای پورفیربلاستیک، لپیدوبلاستیکی و پورفیرولپیدوبلاستیکی هستند. از نظر کانی‌شناسی، کانیهای مهم تشکیل‌دهنده این سنگها شامل آندالوزیت، گارنت، فلدسپار، مسکویت، بیوتیت، کوارتز و کلریت است. به‌دلیل فراوانی آندالوزیت‌ها در شیست‌های لکه‌دار که به 30 تا 60 درصد می‌رسد، نام شیست‌های آندالوزیت‌دار برای سنگ انتخاب شد. در این شیست‌ها، در نتیجه واکنش آندالوزیت با سیالات سرشار از پتاسیم، بلورهای آندالوزیت به سریسیت تبدیل شده است. بررسی ترکیب شیمیایی کانیهای موجود در شیست‌های آندالوزیت‌دار که شامل می‌کای سفید، پلاژیوکلاز، آندالوزیت، گارنت، کلریت و بیوتیت است، نشان می‌دهد که

ماگماتیسیم گرانیتوئیدی موجب دگرگونی مجاورتی سنگها و تشکیل شیست‌های لکه‌ای عمدتاً آندالوزیت‌دار شده است.

با توجه به بررسی‌های ترمودینامیکی انجام شده این سنگها، در دمای 592 تا 692 درجه سانتی‌گراد و فشار حدود 1/07 تا 4/12 کیلوبار تشکیل شده‌اند. پس از تشکیل این سنگها

## References

- Abrecht, J. and Hewitt D.A., 1988. Experimental evidence on the substitution of Ti in biotite. *American Mineralogist*, 73(1): 1275-1284.
- Aghanabati, A., 2004. *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, 586 pp (in Persian).
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros Orogenic Belt of Iran: New Data and Interpretations. *Tectonophysics*, 22(1): 211-238.
- Arima, M. and Edgar, A.D., 1981. Substitution mechanisms and solubility of titanium in phlogopites from rocks of probable mantle origin. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 77(1): 288-295.
- Barker, A.J., 1991. *Introduction to metamorphic textures and microstructures*. Blackie, New York, 162 pp.
- Barzegari, T., 2011. *Economical geology and mineral chemistry of the Marzian industrial minerals with a special view on the feldspar resources (Lorestan province)*. M.Sc. Thesis, University of Lorestan, Iran, 132 pp.
- Bucher, K. and Frey, M., 1994. *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Springer-Verlag, New York, 318 pp.
- Carlson, W. and Schwartze, E., 1997. Petrological significance of prograde homogenization of growth zoning in garnet: An example from the Liano uplift. *Journal of metamorphic Geology*, 15(2): 631-639.
- Ciesielczuk, J., 2002. Chlorite from hydrothermally altered Strzelin and Borow granites (the fore - sudetic block) An attempt of chlorite geothermometry application. *Mineralogical Society of Poland, Special papers*, 20(1): 74-76.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1962. *Rock-forming minerals, non-silicates*. John Wiley and Sons, New York, 371 pp.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 2001. *An Introduction to the rock-forming Minerals*. Longman, London, 972 pp.
- Dymek, R.F., 1983. Titanium, aluminum and interlayer cation substitutions in biotite from high-grade gneisses. *West Green land, American Mineralogist*, 68(1): 880-899.
- Engel, A.E.J. and Engel C.G., 1960. Progressive metamorphism and granitization of the major paragenesis, Northwest Adirondack Mountains. *Mineralogy Bulletin of the Geological Society of America*, 71(2): 1-58.
- Feenstra, A., 1996. An EMP and TEM-AEM Study of Margarite, Muscovite and Paragonite in Polymetamorphic Metabauxites of Naxos (Cyclades, Greece) and the Implications of Fine - scale Mica Interlayering and Multiple Mica Generations. *Journal of Petrology*, 37(1): 201-233.
- Forbes, W.C. and Flower, M.F.J., 1974. Phase relations of titan-phlogopite,  $K_2Mg_4TiAl_2Si_6O_{20}(OH)_4$ : A refractory phase in the upper mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 22(2): 60-66.
- Ghasemi, A. and Talbot, C.J., 2005. A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 5(1): 1-11.
- Guidotti, S., 1984. Micas in metamorphic rocks. *Mineralogy*, 13(2) 357-476.
- Henry, D.J., Guidotti, C.V. and Thomson, J.A., 2005. The Ti saturation surface for low to medium pressure metapelitic biotite: Implications for Geothermometry and Ti-substitution Mechanisms. *American Mineralogist*, 90(2): 316-328.
- Hey, M.H., 1954. Nomenclature of chlorites. *Mineralogical Magazine, American*, 277 pp.
- Hossein Mirzaei, Z., Sepahi, A., Moazen, M., Hossein Mirzaei, Z. and Dadkhah, R., 2010. Investigation of controller factors of the garnet crystals morphology in the Hamadan region metamorphic and igneous rocks. *Iranian Journal of Crystallography and mineralogy*, 4(1): 519-530.
- Kwak, T.A.P., 1968. Ti in biotite and muscovite as an indication of metamorphic grade in almandine amphibolite facies rocks from Sudbury. *Ontario Geochimica et Cosmochimica Acta*, 32(1): 1222-1229.

- Ling-chu, Z. and Yi, M., 2010. Flotation separation of XiXia andalusite ore. College of Resources and Environmentally Engineering, Wuham University of Sciences and Technology, 11(2): 23-44.
- Mohajjel, M., 1997. Structure and Tectonic Evolution of Palaeozoic-Mesozoic Rocks, Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran. Ph.D. Thesis, University of Wollongong, Australia, 226 pp.
- Mohajjel, M., 1998. Tectonic model for the Azna mylonitic granite replacement synchronous with orogeny. Second Conference on Geological Society of Iran, Tarbiat Moallem University, Tehran, Iran.
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone (Western Iran). *Journal of Structural Geology*, 22(1): 1125-1139.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L. and Sahandi, M.R., 2003. Cretaceous-Tertiary continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 397-412.
- Mokhtari, S., 2007. Outlook on the Azna andalusite-bearing schists. M.Sc. Thesis, University of Lorestan, Khormabad, Iran, 160 pp.
- Patiño, D.A.E., 1993. Titanium substitution in biotite: an empirical model with applications to thermometry,  $O_2$  and  $H_2O$  barometries, and consequences for biotite stability. *Chemical Geology*, 108(1): 133-162.
- Perchuk, L.L., 1991. Derivation of Thermodynamically Consistent Set of Geothermometers and Geobarometers for Metamorphic and Magmatic Rocks. In: L.L. Perchuk (Editor), *Progress in Metamorphic and Magmatic Petrology*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 93-112.
- Perchuk, L.L., Van Reenen, D.D., Varlamov, D.A., Van Kal, S.M., Tabatabaeimanesh, S.M. and Boshoff, R., 2008. P - T record of two high-grade metamorphic events in the Central Zone of the Limpopo Complex (South Africa). *Lithos*, 103(1): 70-105.
- Robert, J.L., 1976. Titanium solubility in synthetic phlogopite solid solutions. *Chemical Geology*, 17(2): 213-227.
- Shabaniyan borujeni, N., 2008. Petrology and tectonic setting of the Azna granitoid masses (Sanandaj-Sirjan Zone, Iran). Ph.D. Thesis, University of Isfahan, Iran, 192 pp.
- Shao-Zhu, X., Qi-Gai, F., Rou-Zhou, H. and Yo, Z., 2013. Andalusite family mineral resources and beneficiation. *Metalmine (InChines)*, 3(2): 36-42
- Soheili, M., 1993. Geology Map of Khoram abad. 1: 100000 Scale. Geological Survey of Iran.
- Tabatabaei manesh, S.M., 2007. P - T trends evidence for Polymorphism in high grade metamorphic rocks in the central zone of a Limpopo complex (Central Africa). *Isfahan University Science and Technology*, 3(1): 43-60.
- Tronnes, R.G., Edgar, A.D. and Arima, M., 1985. A high pressure-high temperature study of  $TiO_2$  solubility in Mg-rich phlogopite: Implications to phlogopite chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(1): 2323-2329.
- Van reenen, D.D., Perchuk, L.L., Smit, C.A., Varlamov, D.A., Boshoff, R., Huizenga, J. M. and Gerya, T.V., 2004. Structural and P-T Evolution of a Major Cross Fold in the Central Zone of the Limpopo High - Grade Terrain (South Africa). *Journal of Petrology*, 45(1) 1-27.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(2) 185-187.
- Yardly, B.W.D., 1989. An introduction to metamorphic petrology. John wily and Sons, New York, 248 pp.
- Zhang, Z., Sang, S. and Yang, D., 2004. Dense medium separation of coarse andalusite using waste Iron powder as solid medium. *Department of Resources Engineering, Wuham University of Sciences and Technology*, 14(1): 55-72.



## Petrography, Mineral Chemistry and Geothermobarometry of Andalusite-Bearing Schists North of Azna (Northern Sanandaj-Sirjan Zone, Iran)

Karim Abdollahi Silabi<sup>1</sup>, Seyed Mohsen Tabatabaei Manesh<sup>1\*</sup> and Somaye Karimi<sup>2</sup>

1) Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2) Young Researchers Club, Khorasgan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Submitted: Apr. 29, 2014

Accepted: May 3, 2015

**Key words:** Petrography, Mineral chemistry, Andalusite, Azna, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran

### Introduction

The area studied is located north of Azna (Lorestan Province) in a small portion of the Sanandaj – Sirjan structural zone (Mohajjel et al., 2003). This area is part of the Zagros orogenic belt, formed by the opening and closure of Neotethyan ocean. From NE to SW, it consists of three parallel tectonic regions: the Orumieh-Dokhtar magmatic belt, the Sanandaj-Sirjan structural zone and the Zagros thrust-fold belt (Ghasemi and Talbot, 2005).

The Sanandaj-Sirjan structural zone is a metamorphic belt composed mostly of greenschist, amphibolite and eclogite facies rocks. The development of the zone took place during the opening of the Tethys ocean and its subsequent closing during the Cretaceous and early Tertiary convergence of the Afro-Arabian and Eurasian plates (Mohajjel and Fergusson, 2000). The second stage of metamorphism and deformation of the zone, designated D2, is the most important, resulting from the opening and closure of the Neotethyan ocean and the collision of the Arabian plate with the southwestern part of central Iran in the Late Cretaceous to Tertiary (Laramide orogenic phase) (Ghasemi and Talbot, 2005; Aghanabati, 2004; Mohajjel et al., 2003; Mohajjel and Fergusson, 2000; Alavi, 1994). In the Sanandaj-Sirjan zone, which includes the Azna area, Cretaceous granitic intrusions into the schists were followed by folding and faulting. The intrusions produced contact metamorphism, and have lens-shaped outlines, trending NW-SE. Consequently, the Azna area has a varied petrologic assemblage with polyphase

metamorphism and deformation, including schists, metabasites and mylonitic granites. The phases include: 1. Deformation D1, and dynamothermal metamorphism (M1), a result of the subduction of Neotethys oceanic crust beneath the Iranian plate in the Late Jurassic. 2. Deformation D2, and thermal metamorphism (M2), a result of Paleocene continental collision and 3. Deformation D3, and dynamic metamorphism (M3). This deformation is a progressive deformation that has produced the current morphology of the Sanandaj-Sirjan zone (Shabanian Borujeni, 2008).

In this paper we focused on petrography and mineral chemistry and thermodynamic conditions of the metapelites.

### Materials and methods

The chemical compositions of minerals were determined by a CAMECA SX100 electron microprobe (EMP) at Universität Stuttgart (Germany). The instrument is equipped with five wavelength dispersive spectrometers. The beam current and acceleration voltage were 15 nA and 15 kV, respectively.

### Discussion and Results

The Azna regional metamorphic rocks include quartz-feldspar schists, mica schists, andalusite-bearing schists and quartzites.

The Azna metapelites are schists, containing quartz, feldspars, andalusite, muscovite, biotite, muscovite, chlorite and garnet, in variable proportions, characterized by porphyroblastic and

\*Corresponding authors Email: tabataba@sci.ui.ac.ir

lepidoblastic textures. Based on mineralogy, minerals of these rocks contain andalusite, garnet, feldspar, muscovite, biotite, quartz and chlorite. Microprobe analyses show that the mineral compositions are as follows: White micas in the andalusite-bearing schists are muscovite, plagioclases are albite-oligoclase, garnets are almandine-spessartine with weak chemical zoning and biotites are siderophyllite-annite.

Based on geothermobarometry, these rocks formed in the hornblende-hornfels facies and the low pressure part of the amphibolite facies, with temperatures about 562-692 °C and pressures 1.07-4.12 kbar. After the regional metamorphism of these rocks, granitoid intrusions caused thermal metamorphism of these rocks and the formation of andalusite-bearing schists.

#### Acknowledgments

The authors wish to thank the Office of Graduate Studies of the University of Isfahan for their support. We also thank Prof. Hans-Joachim Massonne, who played major roles during the microprobe analysis of minerals at the Institut für Mineralogie und Kristallchemie, Universität Stuttgart (Germany).

#### References

- Aghanabati, A., 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, 586 pp (in Persian).
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros Orogenic Belt of Iran: New Data and Interpretations. *Tectonophysics*, 22(1): 211–238.
- Ghasemi, A. and Talbot, C.J., 2005. A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 5(1):1–11.
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone (Western Iran). *Journal of Structural Geology*, 22(1): 1125–1139.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L. and Sahandi, M.R., 2003. Cretaceous-Tertiary continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 397–412.
- Shabaniyan borujeni, N., 2008. Petrology and tectonic setting of the Azna granitoid masses (Sanandaj-Sirjan Zone, Iran). Ph.D. Thesis, University of Isfahan, Iran, 192 pp.