

بررسی شیمی کانی و شرایط دگرگونی آمفیبولیت‌های منطقه هشت‌بندی،

پهنه مکران شمالی (جنوب شرق ایران)

مریم سوری^۱، احمد احمدی خلجی^{۱*}، جیامین وانگ^۲، رسول اسمعیلی^{۲،۳}، محمد ابراهیمی^۳، میرمحمد میری^۴

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان

۲- موسسه زمین‌شناسی و زمین‌فیزیک، آکادمی علوم چین

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زنجان

۴- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز

E-mail addresses: ahmadikhalaj.a@lu.ac.ir

تلفن: ۰۶۶۳۳۱۲۰۶۱۹، تاریخ تنظیم: ۱۴۰۳/۱۲/۵

چکیده

آمفیبولیت‌های مورد بررسی در نزدیکی دهستان هشت‌بندی از توابع شهرستان میناب قرار دارند. این آمفیبولیت‌ها بخشی از سنگ‌های دگرگونی کمرند افیولیتی مکران شمالی را تشکیل می‌دهند که به دو صورت جهت‌یافته و توده‌ای یافت می‌شوند. بر اساس کانی‌های شاخص، این سنگ‌ها شامل آمفیبولیت‌های معمولی، اپیدوت-گارنت آمفیبولیت و گارنت-پیروکسن آمفیبولیت هستند. کانی‌های تشکیل دهنده آمفیبولیت‌های معمولی شامل آمفیبول، پلاژیوکلاز، آپاتیت، زیرکن، کوارتز و اسفن می‌باشد. علاوه بر این کانی‌ها، در گارنت-پیروکسن آمفیبولیت‌ها، گارنت و پیروکسن و در اپیدوت-گارنت آمفیبولیت‌ها، اپیدوت، گارنت و پیروکسن نیز دیده می‌شود. آمفیبول‌ها از نوع کلسیک بوده و عمدتاً ترکیبی در محدوده‌ی مگنزیو تا فروهورنبلند دارند. کلینوپیروکسن‌ها از نوع کلسیک و بیشتر در محدوده دیوپسید قرار می‌گیرند. گارنت‌ها محدوده ترکیبی آلمان‌دین تا گروسولار دارند و روند تغییرات ترکیب و عناصر Ca ، Mg ، Mn و Fe^{2+} از حاشیه به مرکز در آنها روند خاصی را نشان نمی‌دهد و حالت خطی دارد. عدم مشاهده منطقه‌بندی مشخص عناصر Ca ، Mg ، Mn و Fe^{2+} و الگوهای مسطح آنها بیانگر انتشار سریع در طی دگرگونی پیش‌رونده و در درجه حرارت بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است. پلاژیوکلازها در محدوده وسیعی از آلبیت تا لابرادوریت قرار می‌گیرند. اسفن‌ها در محدوده دگرگونی/گرمایی بوده و اپیدوت‌ها در زیرگروه اپیدوت رده بندی می‌شوند. زمین‌دماسنجی هورنبلند-پلاژیوکلاز و زمین‌فشارسنجی Al در هورنبلند دمای ۶۹۰ - ۵۹۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۷/۹ - ۵/۵ کیلو بار برای آمفیبولیت‌های جهت‌یافته و دمای ۷۲۰ - ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۶-۴ کیلو بار برای آمفیبولیت‌های توده‌ای را نشان دادند. نمودار فازی دما-فشار ($P-T$) نشان می‌دهد که مجموعه آمفیبول + پلاژیوکلاز + اپیدوت + اسفن در دمای ۶۵۰ - ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار کمتر از ۸ کیلو بار پایدار است که مطابق با نتایج دما-فشارسنجی هورنبلند - پلاژیوکلاز است. بر این اساس، آمفیبولیت‌های حاوی گارنت + پیروکسن درجه‌های دگرگونی بالاتری را تحمل کرده‌اند (دما بیشتر از ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار بیش از ۸ کیلو بار).
واژه‌های کلیدی: کلینوپیروکسن، گارنت، شیمی کانی، آمفیبولیت، مکران.

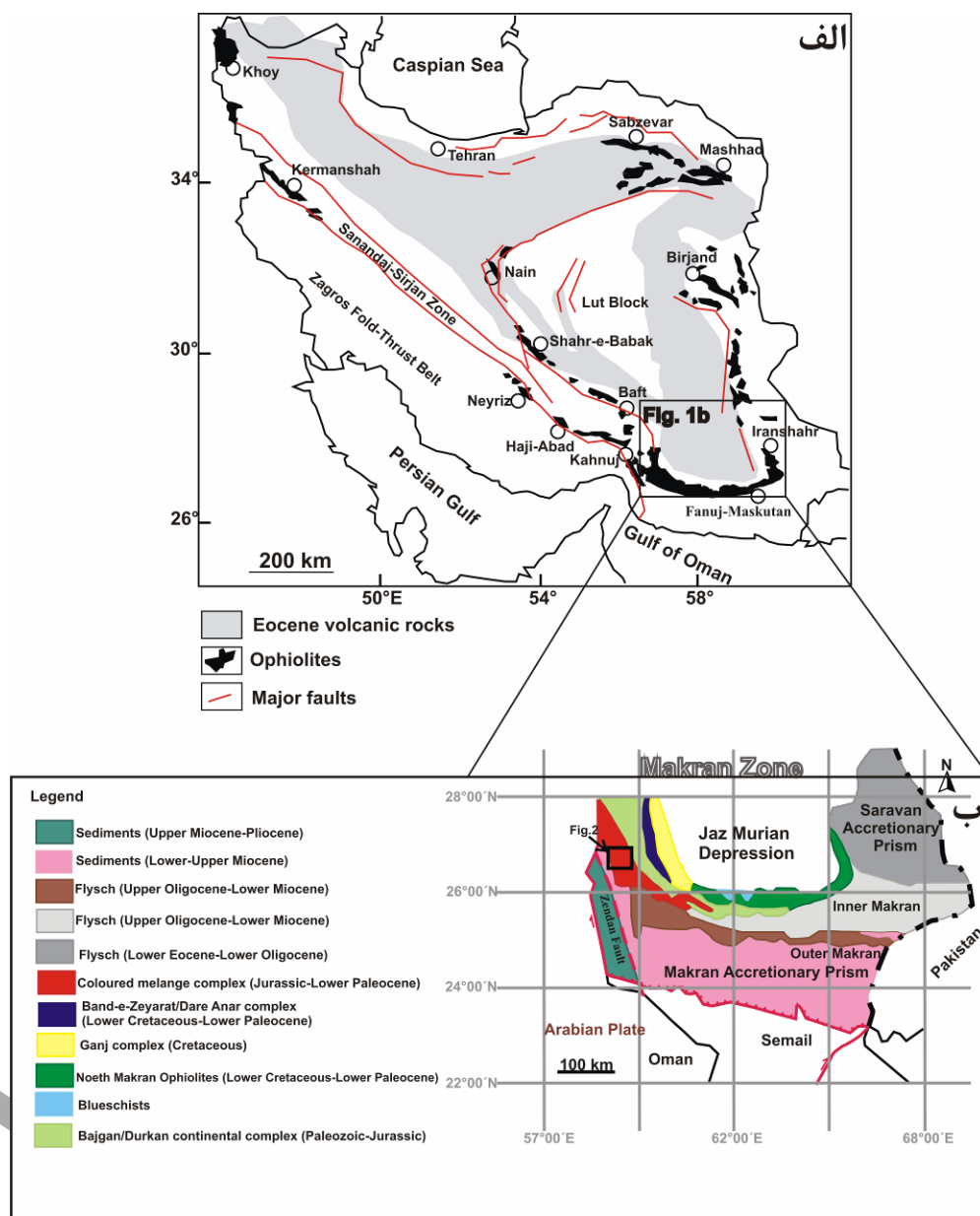
مقدمه

آمفیبولیت‌ها از جمله سنگ‌های دگرگونی هستند که در اکثر مناطق دگرگونی یافت می‌شوند. این سنگ‌ها عمدتاً متشکل از هورنبلند و پلاژیوکلاز هستند و می‌توانند دارای مقادیر فرعی از کانی‌های دیگری همچون گارنت و پیروکسن باشند. از این رو با

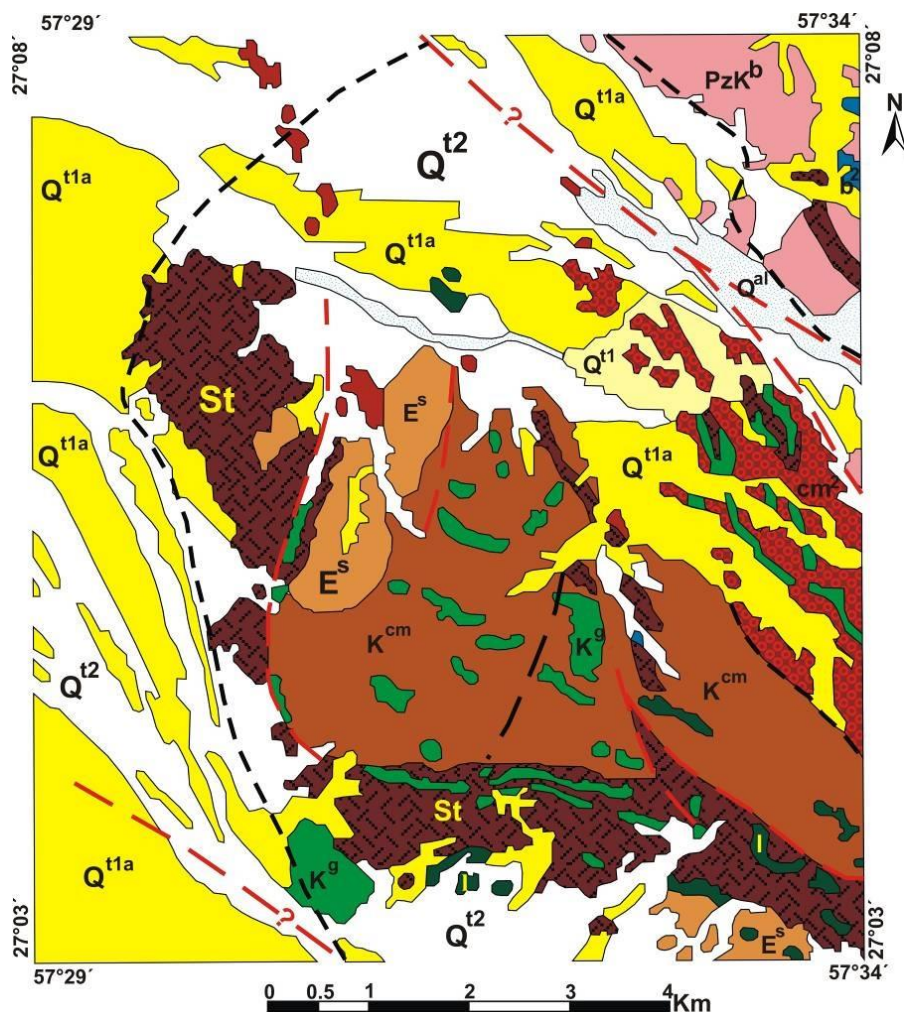
توجه به تنوع کانی‌های آنها، برای تعیین شرایط دگرگونی و بررسی تغییرات دما-فشار دگرگونی در طول زمان (P-T-t) استفاده می‌شوند [۱، ۲، ۳ و ۴]. آمفیبولیت‌ها را می‌توان براساس سنگ مادر به دو گروه پارآمفیبولیت و ارتوآمفیبولیت تقسیم کرد. سنگ مادر پارآمفیبولیت‌ها، رسوبی و سنگ مادر ارتوآمفیبولیت‌ها، سنگ‌های آذرین مافیک (عمدتاً بازالت‌ها و به مقدار کمتر گابروها) هستند [۵]. بررسی آمفیبولیت‌ها به ویژه ارتوآمفیبولیت‌ها از دیرباز مورد توجه محققان بوده است. مطالعه و بررسی ژئوشیمی آمفیبولیت‌های مکران نشان می‌دهد این سنگ‌ها دارای خاستگاه آذرین با ترکیب بازالتی می‌باشند [۶، ۷ و ۸]. از آنجا که مطالعه و تعیین شرایط دگرگونی این نوع سنگ‌ها، نقش مهمی در بازسازی ژئودینامیکی کمربندهای کوهزایی دارد [۹] و ترکیب شیمیایی کانی‌های تشکیل دهنده آنها می‌تواند در شناخت ماهیت و شرایط تشکیل سنگ‌های دگرگونی موثر باشد [۱۰]، در این پژوهش برای شناخت ترکیب شیمیایی و شرایط دگرگونی مجموعه‌های کانیایی آمفیبولیت‌های منطقه هشت‌بندی واقع در پهنه ساختاری مکران شمالی در جنوب شرق ایران (شکل ۱- الف)، از تجزیه نقطه‌ای کانی‌های آمفیبول، پیروکسن، گارنت، پلاژیوکلاز، اسفن و اپیدوت در این سنگ‌ها استفاده شده است.

زمین‌شناسی عمومی

آمفیبولیت‌های مورد مطالعه از لحاظ موقعیت جغرافیایی در نزدیکی دهستان هشت‌بندی در فاصله ۶۰ کیلومتری شرق شهر میناب و در منطقه مکران شمالی در مجموعه برفازیشی مکران (MAC) واقع شده‌اند (شکل ۱- ب). در پهنه مکران شمالی در امتداد شکستگی‌ها و گسل‌ها، مخلوط‌های (ملانژهای) رنگی با بیرون‌زدگی‌های وسیعی نمایان هستند. قدیمی‌ترین سنگ‌های این پهنه را همین ملانژهای رنگی تشکیل می‌دهند که به کرتاسه فوقانی - پالئوسن تعلق دارند. پس از آن رسوبات ضخیم فلیش مانند ائوسن و الیگوسن بوده که تناوبی از ماسه‌سنگ، شیل و مارن است که روی مخلوط‌های رنگی فوق واقع شده‌اند. ترکیب اصلی پوسته اقیانوسی مرتبط با نئوتتیس شامل گدازه‌های بالشی کرتاسه پایین، توف‌های آندزیتی کرتاسه بالایی، آندزیت‌ها، هیالوکلاست‌ها، ریوداسیت‌ها، توف‌ها، شیست‌های آبی، آمفیبولیت‌ها، سرپانتینیت‌ها، رادیولاریت‌های کرتاسه زیرین، سنگ آهک‌های پلاژیک تا ریفی و ماسه‌سنگ‌های توریدایتی است (شکل ۲). آمفیبولیت‌ها به صورت عدسی‌هایی به طور ناپیوسته در مرزهای تراستی با دیگر بخش‌های افیولیتی رخنمون دارند [۶ و ۷]. بزرگ‌ترین رخنمون آمفیبولیت‌ها بیش از چهار کیلومتر طول و یک کیلومتر عرض دارد. این سنگ‌ها دارای دانه‌های متوسط تا درشت با بافت‌های گرانوبلاستیک و گاهی جهت‌دار هستند. آمفیبولیت‌های منطقه هشت‌بندی با سرپانتینیت‌های جهت‌دار مرتبط هستند که نشان دهنده تماس با سایر قسمت‌های پرش افیولیت است. در برخی نقاط، این آمفیبولیت‌ها با لایه‌ای از سنگ مرمر (کمتر از ۱ متر) به صورت بین لایه‌ای هستند که احتمالاً معادل تغییر یافته توالی سنگ آهک پلاژیک - بازالت را نشان می‌دهد که یک توالی مرمر - آمفیبولیت را تشکیل می‌دهند. این آمفیبولیت‌ها از شمال بر روی سرپانتینیت‌ها و سایر قطعات آمیزه‌های افیولیتی رانده شده‌اند و از جنوب توسط رسوبات کواترنری هم مرز هستند.



شکل ۱: الف- نقشه افیولیت‌های اصلی ایران که افیولیت مکران در کادر مستطیلی نشان داده شده است [۱۱ و ۱۲]. ب- نقشه ساده شده زمین‌شناسی پهنه مکران (اصلاح شده از [۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶]).



Legend

Q ^{al}	River channel alluvium and sheet wash.	Fault, position approximate
Q ^{t2}	Low level piedmont fan and valley terrace deposits	Fault, position inferred
Q ^{t1a}	High level piedmont fan and valley terrace deposits dissected by Q ^{t2} erosion.	Major joint
Q ^{t1}	High level piedmont fan and valley terrace deposits dissected by Q ^{t1} erosion.	Animal track
E ^s	Sandstone, siltstone, shale, liemstone and conglomerate	
COLOURED MELANGE COMPLEX		
K ^{cm}	Undifferentiated pelagic and terrigenous sediment, basic to intermediate volcanics, limestone, phyllite and intrusive rocks.	
cm ²	BASIC ASSOCIATION -basalt and basaltic andesite pillow lava, with minor clastic and pelagic sediment, phyllite and intrusive rocks.	
K ^g	Globotruncana limestone with radiolarian chert.	
I	Undifferentiated, pelagic and recrystallised limestone.	
St	Serpentinite, serpentinitised durite and peridotite, with minor basic rocks.	
BAJGAN COMPLEX		
Pzk ^b	Undifferentiated pelitic and psammitic schist, calc-silicate rock, recrystallised limestone, chlorite schist, phyllite and metabasic rocks.	
b ²	Recrystallised limestone and minor pelitic schist.	

شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی ساده شده‌ای از منطقه مورد مطالعه براساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ میناب [۱۷].

روش مطالعه

در طی مطالعات صحرایی، ۱۶۰ نمونه از انواع آمفیبولیت‌ها نمونه برداری شد. برای انجام کارهای آزمایشگاهی در ابتدا تعداد ۵۵ مقطع نازک میکروسکوپی از این سنگ‌ها تهیه و مطالعه گردید. سپس برای مطالعه شیمی کانی و شرایط دگرگونی، در ۶ مقطع نازک- صیقلی، کانی‌های شاخص شامل آمفیبول، پیروکسن، گارنت، پلاژیوکلاز، اسفن و اپیدوت با استفاده از دستگاه الکترون مایکروپروب Joel Jxa-8100 در موسسه زمین‌شناسی و ژئوفیزیک، آکادمی علوم چین (IGG-CAS) با ولتاژ 15 kV و شدت جریان 10-20 nA مورد آنالیز نقطه ای قرار گرفت که نتایج آنها در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. پردازش و تفسیر داده‌ها نیز به کمک نرم‌افزارهای GCDkit، Excel و Corel Draw صورت گرفته است.

ویژگی‌های صحرایی و پتروگرافی

از نظر ساختاری و ظاهری، سنگ‌های آمفیبولیتی مورد مطالعه به دو صورت جهت‌یافته و توده‌ای یافت می‌شوند (شکل ۳) و براساس کانی‌های شاخص دگرگونی، این سنگ‌ها شامل انواع آمفیبولیت‌های معمولی (جهت‌یافته و توده‌ای)، اپیدوت- گارنت آمفیبولیت و گارنت- پیروکسن آمفیبولیت می‌باشند که به دلیل به هم ریختگی براحته قابل تفکیک نیستند. آمفیبولیت‌های معمولی به رنگ سبز تیره تا تیره گاه دارای صفحه‌واره با تناوبی از لایه‌های غنی از پلاژیوکلاز و لایه‌های غنی از آمفیبول هستند (شکل ۴- الف) و گاه فاقد صفحه‌واره هستند (شکل ۴- ب). هورنبلند و پلاژیوکلاز مهم‌ترین اجزای تشکیل دهنده این آمفیبولیت‌ها می‌باشند. کانی‌های تشکیل دهنده این سنگ‌ها شامل آمفیبول، پلاژیوکلاز، زیرکن، آپاتیت، کوارتز و اسفن می‌باشد (شکل ۴- الف و ب). گارنت- پیروکسن آمفیبولیت به صورت توده‌ای بوده در نمونه‌های دستی به رنگ سبز روشن تا سبز تیره و دارای بافت دانه‌ریز تا دانه‌درشت هستند. کانی‌های تشکیل دهنده این سنگ‌ها شامل گارنت، پیروکسن، آمفیبول، پلاژیوکلاز، زیرکن، کوارتز، آپاتیت و اسفن می‌باشد (شکل ۴- پ). اپیدوت- گارنت آمفیبولیت به صورت توده‌ای بوده، در نمونه‌های دستی به رنگ سبز روشن دیده می‌شوند که این رنگ به دلیل مقدار فراوان اپیدوت (۳۰ درصد حجمی سنگ) در این سنگ‌ها می‌باشد (شکل ۴- ت). کانی‌های تشکیل دهنده این سنگ‌ها شامل آمفیبول، پلاژیوکلاز، اپیدوت، گارنت، پیروکسن، کوارتز و به مقدار کمتر کانی‌های کدر می‌باشد.

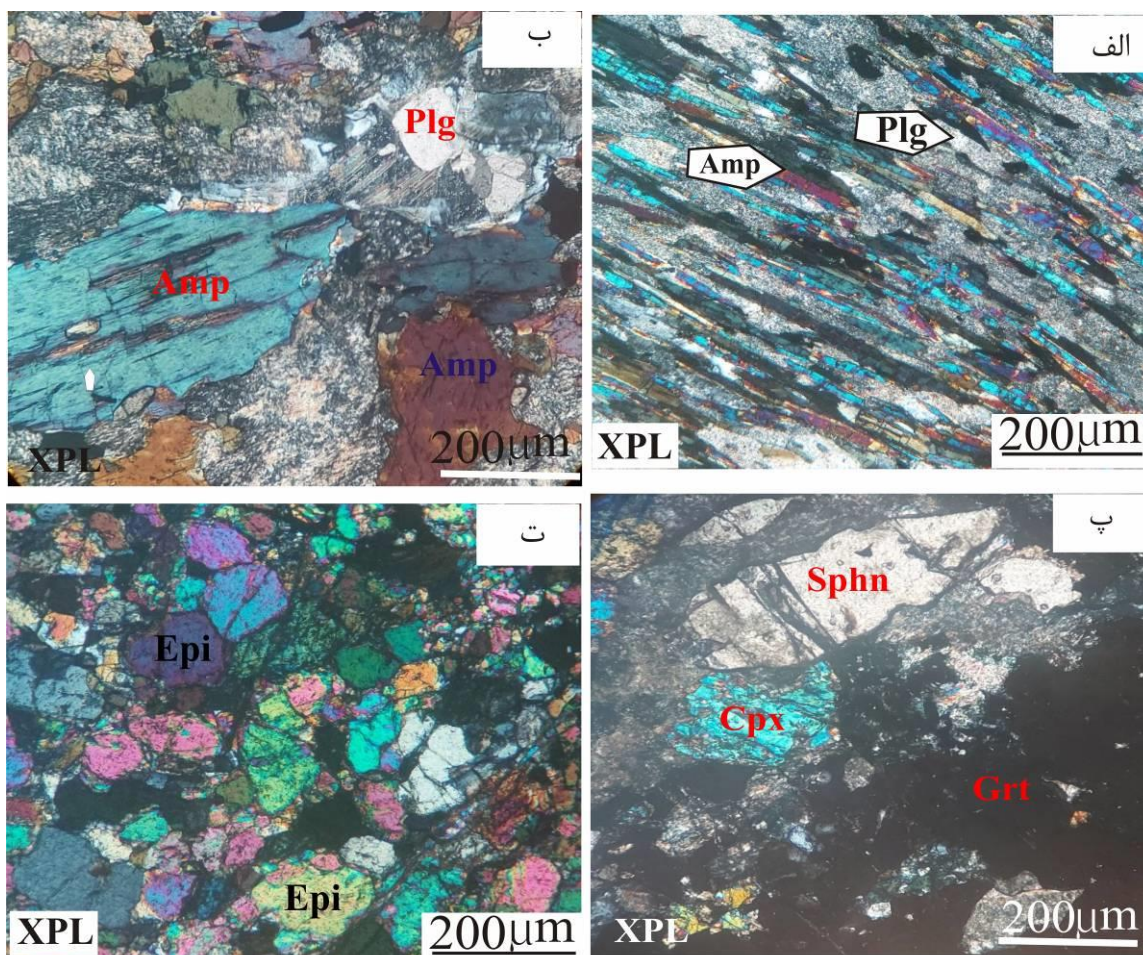


ب



الف

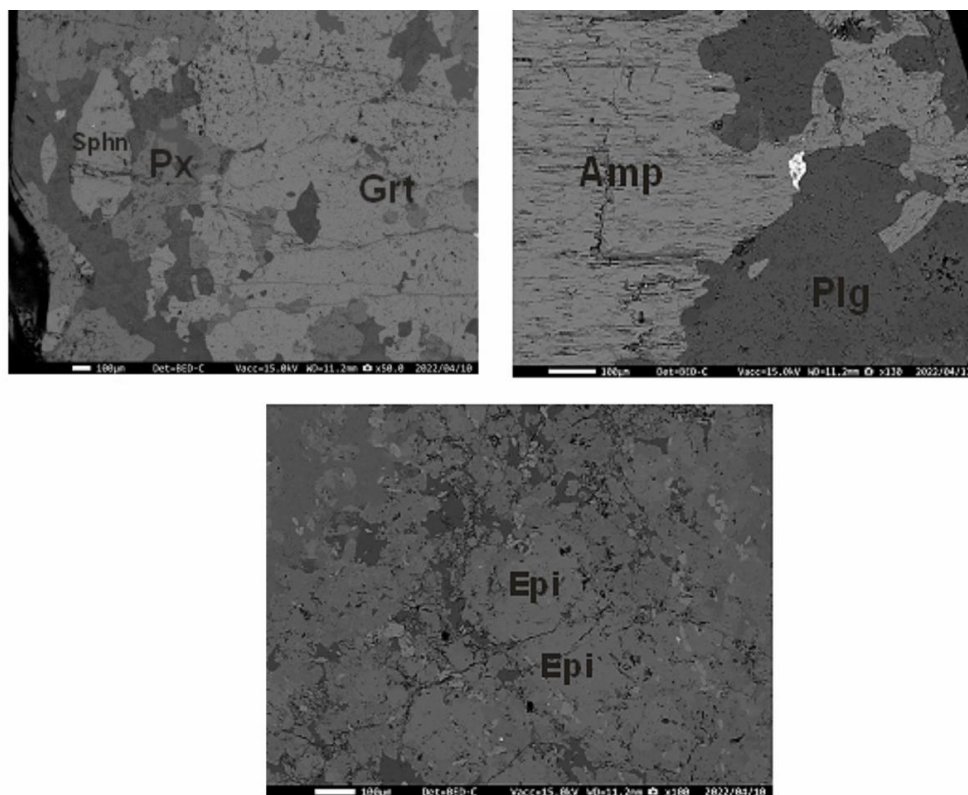
شکل ۳: تصاویر صحرایی آمفیبولیت‌های هشت‌بندی: الف- آمفیبولیت‌های جهت‌یافته، ب- آمفیبولیت‌های توده‌ای.



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپی آمفیبولیت‌های هشت‌بندی: الف- آمفیبولیت‌های معمولی جهت‌یافته، ب- آمفیبولیت‌های معمولی توده‌ای، پ- گارنت- پیروکسن آمفیبولیت‌ها، ت- اپیدوت - گارنت آمفیبولیت‌ها، آمفیبول (Amp)، پلاژیوکلاز (Plg)، گارنت (Grt)، اسفن (Sphen)، پیروکسن (Px) و اپیدوت (Epi).

شیمی کانی

برای مطالعه شیمی کانی و شرایط دگرگونی، در ۶ مقطع نازک- صیقلی، کانی‌های شاخص شامل آمفیبول، پیروکسن، گارنت، پلاژیوکلاز، اسفن و اپیدوت مورد آنالیز نقطه ای قرار گرفته اند (شکل ۵) که نتایج آنها در اینجا بررسی می‌شود. برای شناخت ترکیب شیمیایی و نوع آمفیبول در سنگ‌های آمفیبولیتی مکران، از تجزیه شیمیایی نقطه‌ای کانی آمفیبول در آمفیبولیت‌های معمولی استفاده شده است (جدول ۱). بر اساس این داده‌ها، آمفیبول‌های مورد مطالعه در گروه آمفیبول‌های کلسیمی [۱۸] قرار دارند (شکل ۶- الف) و عمدتاً دارای گستره ترکیبی منیزیه‌هورنبلند و فروهورنبلند می‌باشند [۱۸] (شکل ۶- ب).

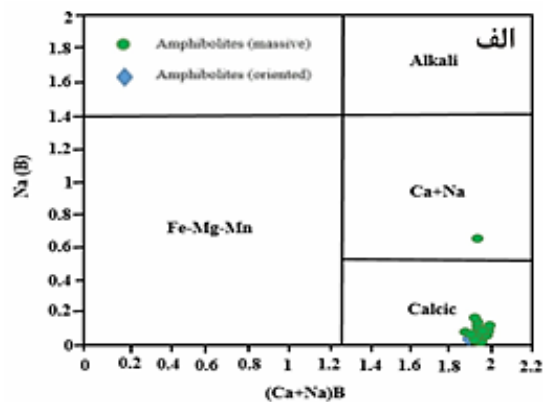
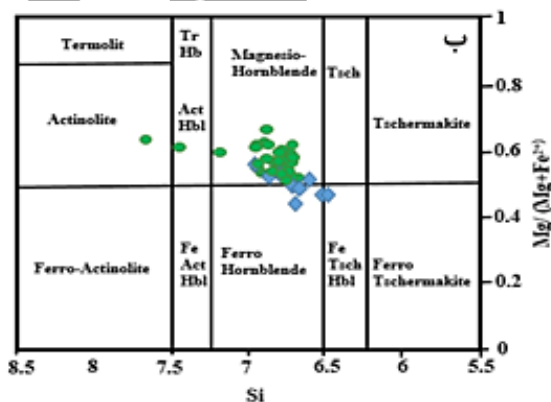


شکل ۵: تصاویر BSE از مجموعه کانی‌شناسی آمفیبولیت‌ها شامل آمفیبول (Amp)، پلاژیوکلاز (Plg)، گارنت (Grt)، اسفن (Sphen)، پیروکسن (Px) و اپیدوت (Epi).

جدول ۱: نتایج تجزیه ریزپردازش آمفیبول (۱۰ نقطه به عنوان نمونه) در آمفیبولیت‌های هشت‌بندی. تعداد کاتیون‌های موجود در فرمول ساختاری آمفیبول بر اساس ۲۳ اتم اکسیژن محاسبه شده‌اند.

Sample #	S-28-2-Amp1	S-28-2-Amp2	S-28-2-Amp3	S-38-1-Amp1	S-38-1-Amp2	S-38-1-Amp3	S-14-1-Amp1	S-14-1-Amp2	S-08-2-Amp1	S-08-2-Amp2
SiO ₂	۴۳/۹۸	۴۴/۹۵	۴۵/۳۳	۴۶/۸۰	۴۵/۱۷	۴۵/۰۲	۴۴/۳۴	۴۵/۹۳	۴۵/۲۴	۴۵/۲۰
TiO ₂	۰/۵۸	۰/۶۹	۰/۶۵	۰/۵۹	۰/۶۰	۰/۵۵	۱/۴۳	۱/۳۳	۱/۳۲	۱/۵۴
Al ₂ O ₃	۱۱/۸۴	۱۱/۰۴	۱۰/۶۳	۹/۵۲	۱۱/۰۳	۱۰/۹۴	۹/۴۵	۹/۰۶	۹/۷۳	۹/۶۶
MnO	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۳۶	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۱۹
FeO	۱۷/۴۸	۱۵/۵۳	۱۷/۶۶	۱۲/۹۰	۱۳/۷۰	۱۳/۷۹	۱۶/۰۱	۱۶/۲۴	۱۴/۴۶	۱۴/۱۰
MgO	۹/۵۸	۹/۷۵	۹/۹۵	۱۲/۲۲	۱۱/۳۹	۱۱/۳۰	۱۰/۳۴	۱۰/۴۶	۱۱/۵۲	۱۱/۴۶
CaO	۱۱/۹۱	۱۱/۶۹	۱۱/۸۱	۱۲/۰۶	۱۲/۰۲	۱۱/۸۰	۱۱/۱۲	۱۱/۲۶	۱۱/۶۳	۱۱/۷۵
Na ₂ O	۱/۲۷	۱/۱۳	۱/۰۹	۱/۳۴	۱/۶۰	۱/۴۹	۱/۶۲	۱/۴۶	۱/۵۸	۱/۵۹
K ₂ O	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۵۱	۰/۴۶	۰/۵۹	۰/۶۰
Cr ₂ O ₃	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۰۷
Total	۹۷/۱۵	۹۵/۳۹	۹۷/۶۹	۹۶/۰۶	۹۶/۱۰	۹۵/۳۶	۹۵/۱۷	۹۶/۴۵	۹۶/۴۵	۹۶/۱۶
XO	۹/۰۳	۹/۰۹	۸/۹۶	۸/۹۱	۸/۹۷	۹/۰۳	۹/۱۹	۹/۰۳	۸/۹۹	۹/۰۱
Si	۶/۶۱	۶/۸۰	۶/۷۶	۶/۹۴	۶/۷۴	۶/۷۷	۶/۷۸	۶/۹۰	۶/۷۷	۶/۷۸
Ti	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۷
Al	۲/۱۰	۱/۹۷	۱/۸۷	۱/۶۶	۱/۹۴	۱/۹۴	۱/۷۰	۱/۶۰	۱/۷۲	۱/۷۱
Cr	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱

Fe	۲/۲۰	۱/۹۶	۲/۲۰	۱/۶۰	۱/۷۱	۱/۷۳	۲/۰۵	۲/۰۴	۱/۸۱	۱/۷۷
Fe ³⁺	۰/۴۷	۰/۱۴	۰/۵۲	۰/۰۷	۰/۱۰	۰/۱۹	۰/۳۴	۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۰۶
Fe ²⁺	۱/۷۰	۱/۸۲	۱/۶۶	۱/۵۳	۱/۶۰	۱/۵۴	۱/۷۰	۱/۷۶	۱/۵۸	۱/۷۰
Mn	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲
Mg	۲/۱۵	۲/۲۰	۲/۲۱	۲/۷۰	۲/۵۴	۲/۵۳	۲/۳۶	۲/۳۴	۲/۵۷	۲/۵۶
Ca	۱/۹۲	۱/۸۹	۱/۸۹	۱/۹۲	۱/۹۲	۱/۹۰	۱/۸۲	۱/۸۱	۱/۸۶	۱/۸۹
Na	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۳۸	۰/۴۶	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۴۶	۰/۴۶
K	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۱
Tot	۱۵/۵۰	۱۵/۳۳	۱۵/۴۲	۱۵/۳۸	۱۵/۴۸	۱۵/۴۵	۱۵/۴۹	۱۵/۴۰	۱۵/۵۰	۱۵/۴۸
Si	۶/۶۱	۶/۸۰	۶/۷۶	۶/۹۴	۶/۷۴	۶/۷۷	۶/۷۸	۶/۹۰	۶/۷۷	۶/۷۸
Al ^{IV}	۱/۳۹	۱/۲۰	۱/۲۴	۱/۰۶	۱/۲۶	۱/۲۳	۱/۲۲	۱/۱۰	۱/۲۳	۱/۲۲
Tsite	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰
Al ^{VI}	۰/۷۱	۰/۷۷	۰/۶۳	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۷۱	۰/۴۸	۰/۵۱	۰/۴۹	۰/۴۸
Ti	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۷
Cr	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱
Fe	۲/۲۰	۱/۹۶	۲/۲۰	۱/۶۰	۱/۷۱	۱/۷۳	۲/۰۵	۲/۰۴	۱/۸۱	۱/۷۷
Mn	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲
Mg	۲/۱۵	۲/۲۰	۲/۲۱	۲/۷۰	۲/۵۴	۲/۵۳	۲/۳۶	۲/۳۴	۲/۵۷	۲/۵۶
Csite	۵/۱۳	۵/۰۴	۵/۱۵	۵/۰۲	۵/۰۳	۵/۰۵	۵/۱۰	۵/۰۸	۵/۰۶	۵/۰۲
C-5	۰/۱۳	۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۲
Ca	۱/۹۲	۱/۸۹	۱/۸۹	۱/۹۲	۱/۹۲	۱/۹۰	۱/۸۲	۱/۸۱	۱/۸۶	۱/۸۹
Na	-۰/۰۵	۰/۰۷	-۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۹
Bsite	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۰۰
Na	۰/۴۲	۰/۲۶	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۴۰	۰/۳۱	۰/۳۹	۰/۳۷
K	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۱
Asite	۰/۵۰	۰/۳۳	۰/۴۲	۰/۳۸	۰/۴۸	۰/۴۵	۰/۴۹	۰/۴۰	۰/۵۰	۰/۴۸

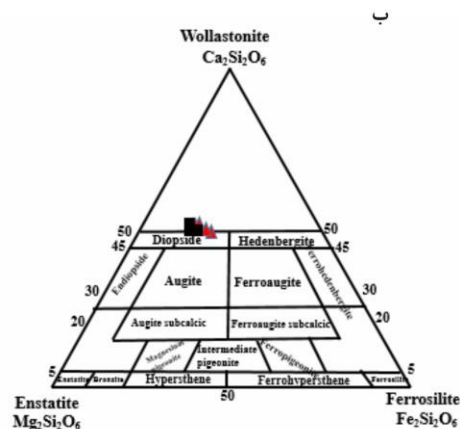


شکل ۶: نمودارهای طبقه‌بندی برای آمفیبولیت‌های مورد مطالعه. الف) با توجه به نوع عناصر در موقعیت B ساختار بلوری [۱۸]، ب) بر اساس نمودار $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ نسبت به Si [۱۸].

برای بررسی شیمی کانی پیروکسن در آمفیبولیت‌ها، تعداد ۲ نمونه (یک نمونه از گارنت - پیروکسن آمفیبولیت‌ها و یک نمونه از اپیدوت - گارنت آمفیبولیت‌ها) مورد آنالیز نقطه‌ای قرار گرفت (جدول ۲). بر اساس این داده‌ها پیروکسن‌های مورد بررسی در گستره‌ی کلینوپيروكسن‌های کلسیم-منیزیم-آهن‌دار هستند و در محدوده دیوپسید قرار می‌گیرند [۱۹] (شکل ۷).

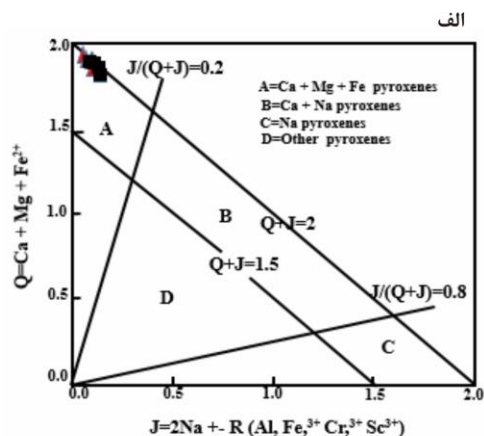
جدول ۲: نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی کانی کلینوپيروكسن (۱۰ نقطه به عنوان نمونه) در آمفیبولیت‌های هشت‌بندی. تعداد کاتیون‌های موجود در فرمول ساختاری کلینوپيروكسن بر اساس ۶ اتم اکسیژن محاسبه شده‌اند.

Sample #	S-45-1-Px1	S-45-1-Px2	S-45-1-Px3	S-45-1-Px4	S-45-3-Px1	S-17B-5-Px1	S-17B-5-Px2	S-17B-5-Px3	S-17B-5-Px4	S-17B-5-Px5
SiO ₂	۵۱/۷۸	۵۲/۲۸	۵۲/۱۱	۵۲/۴۱	۵۰/۵۶	۵۲/۲۱	۵۲/۵۱	۵۱/۱۷	۵۲/۳۵	۵۲/۵۱
TiO ₂	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۵
Al ₂ O ₃	۱/۷۲	۱/۳۹	۱/۵۲	۱/۹۹	۲/۶۵	۱/۵۰	۱/۶۶	۲/۱۱	۱/۹۵	۱/۱۸
Cr ₂ O ₃	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰
FeO	۱۱/۶۶	۱۲/۱۲	۱۱/۴۸	۱۱/۲۴	۱۱/۹۰	۹/۹۶	۱۰/۰۵	۱۱/۵۵	۱۰/۳۸	۱۱/۴۳
MnO	۰/۲۷	۰/۲۰	۰/۲۸	۰/۱۸	۰/۲۳	۰/۴۶	۰/۵۱	۰/۳۹	۰/۳۸	۰/۳۱
MgO	۱۰/۰۲	۹/۹۳	۱۰/۱۷	۱۰/۲۰	۹/۷۸	۱۰/۶۳	۱۰/۵۲	۱۰/۰۳	۱۰/۶۴	۱۰/۲۸
CaO	۲۳/۶۰	۲۳/۸۷	۲۳/۸۸	۲۳/۷۸	۲۳/۶۶	۲۳/۴۳	۲۳/۱۱	۲۲/۷۵	۲۳/۰۷	۲۲/۷۳
Na ₂ O	۰/۵۶	۰/۵۴	۰/۴۵	۰/۶۴	۰/۵۲	۰/۸۴	۰/۶۰	۱/۰۴	۰/۹۲	۰/۹۹
K ₂ O	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۱
Total	۹۹/۷۰	۱۰۰/۴۴	۱۰۰/۰۲	۱۰۰/۵۳	۹۹/۴۹	۹۹/۰۷	۹۹/۱۱	۹۹/۱۳	۹۹/۸۰	۹۹/۴۸
Si	۱/۹۷	۱/۹۸	۱/۹۸	۱/۹۷	۱/۹۴	۱/۹۹	۱/۹۹	۱/۹۶	۱/۹۸	۲/۰۰
Ti	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Al	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۰
Cr	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Fe(iii)	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۳
Fe(ii)	۰/۳۵	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۳۲	۰/۲۹	۰/۳۰	۰/۳۳
Mn	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
Mg	۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۵۸	۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۵۷	۰/۶۰	۰/۵۸
Ca	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۳
Na	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۷
Wo	۴۹/۳۱	۴۹/۴۴	۴۹/۷۳	۴۹/۵۰	۴۹/۶۷	۴۸/۹۶	۴۹/۰۶	۴۷/۵۴	۴۸/۱۶	۴۷/۳۸
En	۲۹/۱۴	۲۸/۶۴	۲۹/۴۸	۲۹/۵۵	۲۸/۵۸	۳۰/۹۱	۳۱/۰۸	۲۹/۱۶	۳۰/۹۰	۲۹/۸۲
Fs	۱۹/۴۳	۱۹/۸۹	۱۹/۱۰	۱۸/۵۴	۱۹/۷۸	۱۶/۹۶	۱۷/۵۵	۱۹/۳۶	۱۷/۴۹	۱۹/۰۵



▲ Garnet-pyroxene amphibolites

■ Epidot-garnet amphibolites



شکل ۷: الف) کلینوپیروکسن‌های مورد مطالعه در نمودار Q-J در محدوده کلینوپیروکسن‌های کلسیم-منیزیم-آهن دار قرار می‌گیرند [۱۹]، ب) در نمودار سه تایی En-Wo-Fs، کلینوپیروکسن‌های مورد مطالعه در محدوده دیوپسید قرار می‌گیرند [۱۹].

$$Q = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$$

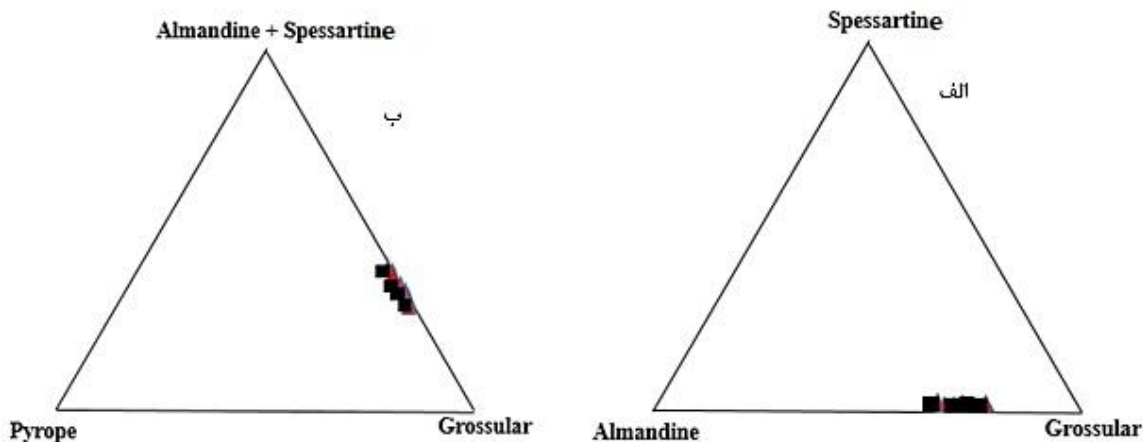
$$J = 2\text{Na} \pm R (R: \text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Cr}^{3+}, \text{Sc}^{3+})$$

نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای کانی گارنت در دو مقطع از آمفیبولیت‌های گارنت‌دار در جدول ۳ آورده شده است. نمودار سه‌تایی طبقه‌بندی گارنت‌ها نشان می‌دهد که گارنت‌های تجزیه شده در محدوده ترکیبی آلماندین تا گروسولار قرار دارند (شکل ۸).

جدول ۳: نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی کانی گارنت (۱۰ نقطه به عنوان نمونه) در آمفیبولیت‌های هشت‌بندی. تعداد کاتیون‌های موجود در فرمول ساختاری گارنت بر اساس ۱۲ اتم اکسیژن محاسبه شده‌اند.

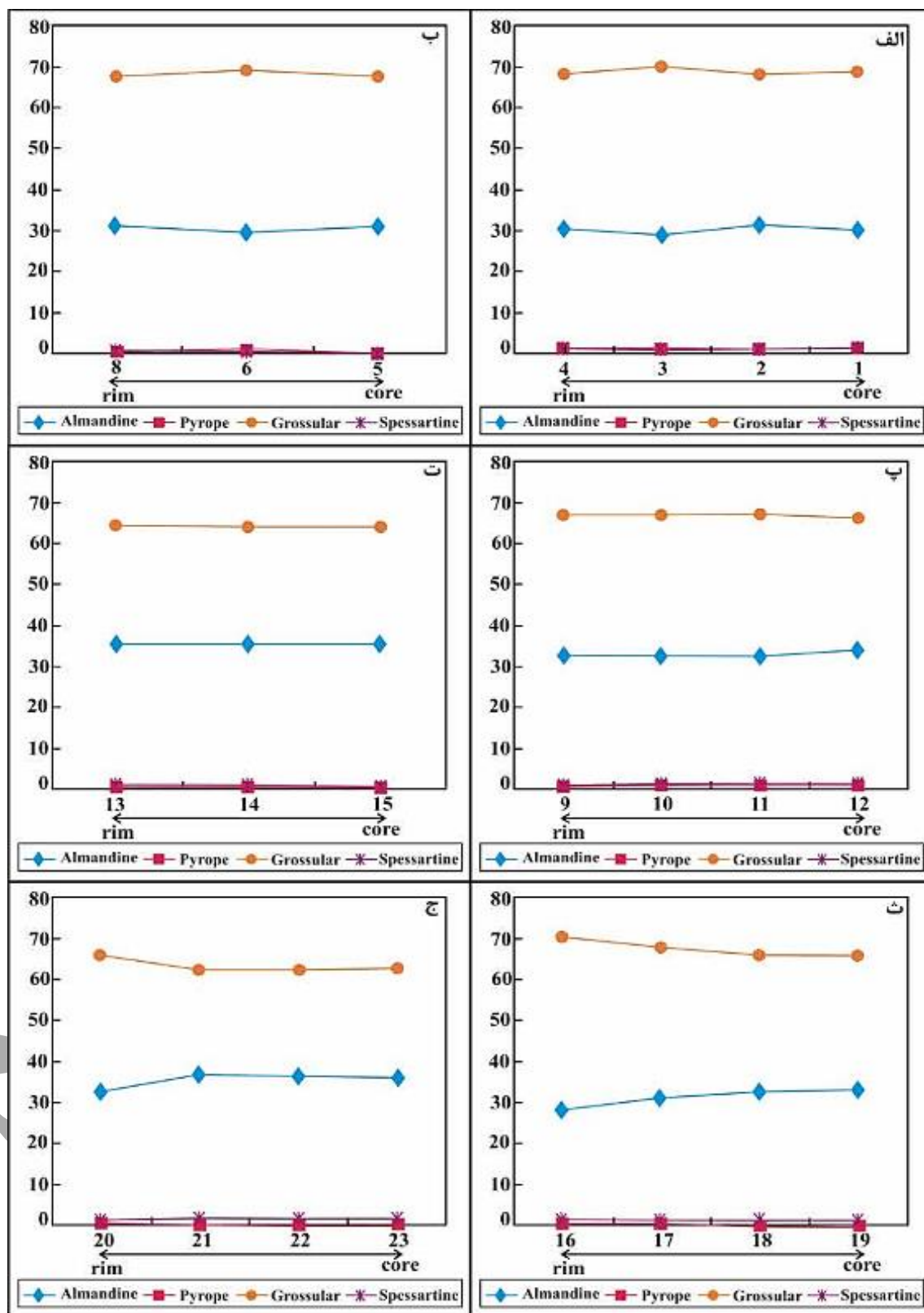
Sample #	S-45-1Grt1	S-45-1Grt2	S-45-1Grt3	S-45-1Grt4	S-45-2Grt1	S-17B-1-Grt4	S-17B-3-Grt1	S-17B-3-Grt2	S-17B-3-Grt3	S-17B-3-Grt4
SiO ₂	۳۷/۲۶	۳۷/۱۶	۳۷/۷۶	۳۷/۸۶	۳۶/۵۳	۳۶/۸۱	۳۶/۳۷	۳۶/۱۲	۳۷/۱۸	۳۶/۸۶
TiO ₂	۱/۳۲	۰/۷۱	۱/۳۷	۱/۲۸	۰/۶۹	۰/۷۸	۰/۶۷	۰/۵۱	۰/۵۴	۰/۵۶
Al ₂ O ₃	۸/۴۰	۸/۳۰	۸/۷۰	۸/۳۲	۷/۷۴	۶/۸۱	۶/۴۷	۴/۴۲	۴/۸۱	۴/۵۷
Cr ₂ O ₃	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۰
FeO	۱۸/۳۰	۱۹/۳۱	۱۷/۳۲	۱۸/۶۰	۱۹/۶۹	۲۰/۸۸	۲۰/۶۸	۲۳/۷۳	۲۳/۸۵	۲۳/۵۷
MnO	۰/۵۶	۰/۳۵	۰/۴۷	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۷۶	۰/۹۲	۰/۸۸
MgO	۰/۲۱	۰/۱۰	۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۱۱
CaO	۳۳/۲۹	۳۳/۲۳	۳۳/۲۱	۳۲/۹۶	۳۳/۱۸	۳۲/۷۰	۳۲/۵۱	۳۱/۶۴	۳۱/۹۳	۳۲/۰۸
Total	۹۹/۳۳	۹۹/۲۱	۹۹/۰۸	۹۱/۶۶	۹۸/۲۸	۹۸/۸۳	۹۷/۵۰	۹۷/۳۴	۹۹/۳۸	۹۸/۶۲
Si	۲/۹۸	۲/۹۸	۳/۰۳	۳/۰۲	۲/۹۶	۲/۹۸	۲/۹۹	۳/۰۰	۳/۰۲	۳/۰۲
Ti	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳
Al	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۸۲	۰/۷۸	۰/۷۴	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۴۳	۰/۴۶	۰/۴۴

Cr	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Fe ³⁺	۱/۰۸	۱/۱۶	۰/۹۶	۱/۰۱	۱/۲۴	۱/۲۸	۱/۳۲	۱/۵۰	۱/۴۳	۱/۴۵
Fe ²⁺	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۱۶
Mn	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶
Mg	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱
Ca	۲/۸۶	۲/۸۶	۲/۸۵	۲/۸۲	۲/۸۸	۲/۸۴	۲/۸۶	۲/۸۲	۲/۷۸	۲/۸۲
tot. cat.	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰
tot. oxy.	۱۲/۰۰	۱۲/۰۰	۱۲/۰۰	۱۲/۰۰	۱۲/۰۰	۱۲/۰۰	۱۲/۰۰	۱۲/۰۰	۱۲/۰۰	۱۲/۰۰
almandine	۲۹/۵۷	۳۰/۹۳	۲۸/۵۴	۳۰/۲۰	۳۱/۴۵	۳۲/۸۱	۳۲/۶۸	۳۶/۴۰	۳۶/۱۹	۳۵/۸۵
pyrope	۰/۶۰	۰/۲۹	۰/۵۹	۰/۶۱	۰/۱۱	۰/۳۴	۰/۵۲	۰/۲۵	۰/۳۴	۰/۲۹
grossular	۶۸/۹۱	۶۸/۲۱	۷۰/۰۹	۶۸/۵۶	۶۷/۸۸	۶۵/۸۴	۶۵/۸۱	۶۲/۱۷	۶۲/۰۶	۶۲/۵۱
spessartine	۰/۹۲	۰/۵۷	۰/۷۸	۰/۶۳	۰/۵۶	۱/۰۰	۰/۹۹	۱/۱۸	۱/۴۱	۱/۳۵

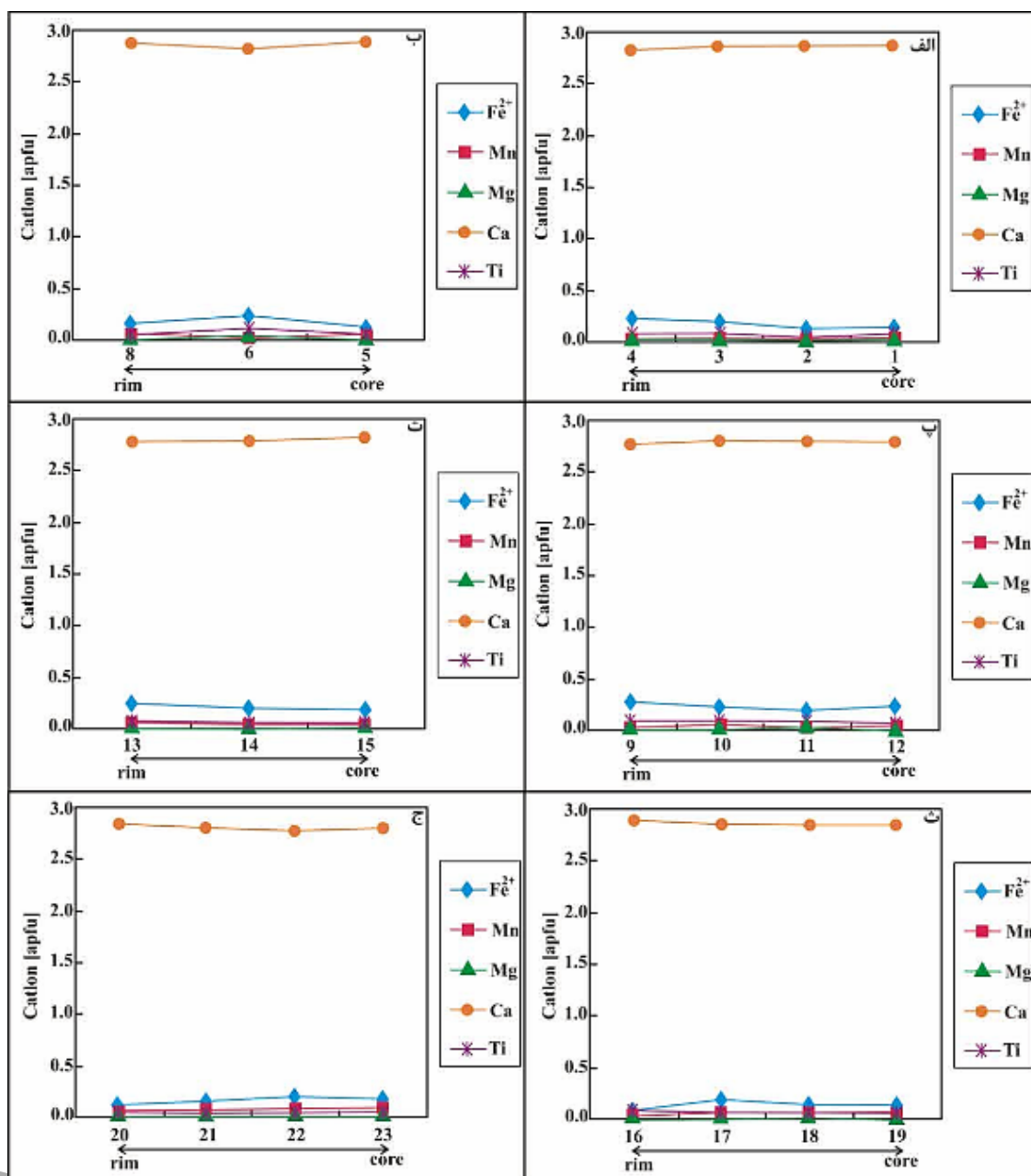


شکل ۸: الف و ب (ترکیب گارنت‌ها در نمودار مثلی اعضای نهایی اسپسارتین-پیروپ-آلماندین-گروسولار [۲۰]. علائم مشابه شکل ۷ می‌باشند.

بررسی روند تغییرات ترکیب گارنت (شکل ۹) و عناصر Mn, Mg, Ca و Fe²⁺ (شکل ۱۰) از حاشیه به مرکز در بلورهای گارنت موجود در آمفیبولیت‌های منطقه هشت‌بندی روند خاصی را نشان نمی‌دهند و حالت خطی دارند. عدم مشاهده منطقه‌بندی مشخص عناصر Mn, Mg, Ca و Fe²⁺ و الگوهای مسطح آنها در گارنت درون آمفیبولیت‌های مورد مطالعه بیانگر انتشار سریع در طی دگرگونی پیش‌رونده و در درجه حرارت بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است. زیرا در دماهای بالا (C ۶۰۰ >) و در طی دگرگونی پیش‌رونده، پدیده انتشار موجب همگن شدن گارنت‌ها از لحاظ شیمیایی می‌شود [۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴ و ۲۵].



شکل ۹: روند تغییرات ترکیب گارنت از حاشیه به مرکز در بلورهای گارنت موجود در آمفیبولیت‌های منطقه هشت‌بندی

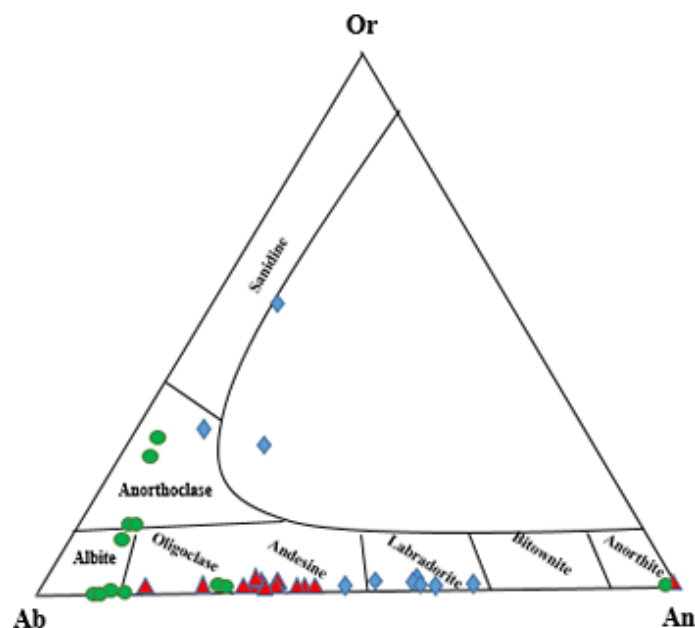


شکل ۱۰: روند تغییرات عناصر اصلی از حاشیه به مرکز در بلورهای گارنت موجود در آمفیبولیت‌های منطقه هشت‌بندی

تجزیه نقطه‌ای پلاژیوکلازهای مورد نظر با انتخاب ۵ مقطع از آمفیبولیت‌ها انجام شد که نتایج آنها در جدول ۴ آمده است. در نمودار مثلی آل‌بیت-آنورتیت-اورتوکلاز [۲۶]، ترکیب پلاژیوکلازها در آمفیبولیت‌های توده‌ای بیشتر در محدوده آل‌بیت - الیگوکلاز، در گارنت- پیروکسن آمفیبولیت‌ها بیشتر در محدوده الیگوکلاز- آندزین و در آمفیبولیت‌های جهت‌یافته بیشتر در محدوده آندزین- لابرادوریت قرار گرفته است (شکل ۱۱).

جدول ۴: نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی کانی پلاژیوکلاز (۱۰ نقطه به عنوان نمونه) در آمفیبولیت‌های هشت‌بندی. تعداد کاتیون‌های موجود در فرمول ساختاری پلاژیوکلاز بر اساس ۸ اتم اکسیژن محاسبه شده‌اند.

Sample #	S-45-8-Plg1	S-45-8-Plg2	S-28-3-Plg3	S-28-3-Plg4	S-38-2-P11	S-38-3-P11	S-38-3-P12	S-38-3-P13	S-38-5-P11	S-08-3-P13
SiO ₂	۶۰/۰۶	۵۸/۷۴	۶۲/۵۶	۶۱/۱۷	۵۱/۳۱	۵۲/۳۵	۵۵/۸۳	۵۵/۳۷	۵۹/۴۲	۶۵/۱۶
TiO ₂	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰
Al ₂ O ₃	۲۵/۱۱	۲۵/۳۷	۲۳/۰۹	۲۳/۹۲	۳۰/۲۹	۲۹/۸۶	۲۷/۱۵	۲۸/۴۰	۲۸/۲۴	۲۲/۶۴
Cr ₂ O ₃	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱
FeO	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۰۲
MnO	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
MgO	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۱	۰/۰۰
CaO	۶/۷۳	۷/۷۵	۴/۳۳	۵/۷۰	۱۳/۴۵	۱۲/۴۶	۹/۵۸	۱۰/۶۱	۱/۶۲	۱/۷۷
Na ₂ O	۷/۳۲	۶/۹۲	۸/۸۳	۷/۹۲	۳/۶۵	۴/۰۷	۵/۷۳	۵/۱۷	۵/۴۹	۹/۲۴
K ₂ O	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۱۷	۰/۲۷	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۶	۴/۸۶	۱/۳۶
Total	۹۹/۸۲	۹۹/۳۲	۹۹/۱۴	۹۹/۰۱	۹۸/۹۱	۹۸/۹۰	۹۸/۵۲	۹۹/۷۵	۹۹/۹۱	۱۰۰/۲۰
Si	۲/۶۹	۲/۶۵	۲/۸۰	۲/۷۵	۲/۳۶	۲/۴۰	۲/۵۵	۲/۵۱	۲/۶۶	۲/۸۷
Ti	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Al	۱/۳۲	۱/۳۵	۱/۲۲	۱/۲۷	۱/۶۴	۱/۶۲	۱/۴۶	۱/۵۲	۱/۴۹	۱/۱۸
Cr	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Fe	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰
Mn	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Mg	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰
Ca	۰/۳۲	۰/۳۷	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۶۶	۰/۶۱	۰/۴۷	۰/۵۱	۰/۰۸	۰/۰۸
Na	۰/۶۳	۰/۶۰	۰/۷۷	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۴۸	۰/۷۹
K	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۸	۰/۰۸
tot. cat.	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰	۵/۰۰
tot. oxy.	۸/۰۲	۸/۰۱	۸/۰۲	۸/۰۳	۸/۰۲	۸/۰۳	۸/۰۳	۸/۰۴	۸/۰۳	۸/۰۳
An	۳۲/۹۷	۳۷/۴۶	۲۱/۱۳	۲۷/۹۹	۶۶/۹۵	۶۲/۶۹	۴۷/۷۸	۵۲/۹۶	۹/۳۴	۸/۷۹
Ab	۶۴/۸۵	۶۰/۵۴	۷۷/۹۲	۷۰/۴۳	۳۲/۸۴	۳۷/۰۲	۵۱/۷۲	۴۶/۶۷	۵۷/۳۲	۸۳/۱۵
Or	۲/۱۸	۲/۰۰	۰/۹۶	۱/۵۷	۰/۲۱	۰/۲۹	۰/۵۰	۰/۳۷	۳۳/۳۴	۸/۰۶



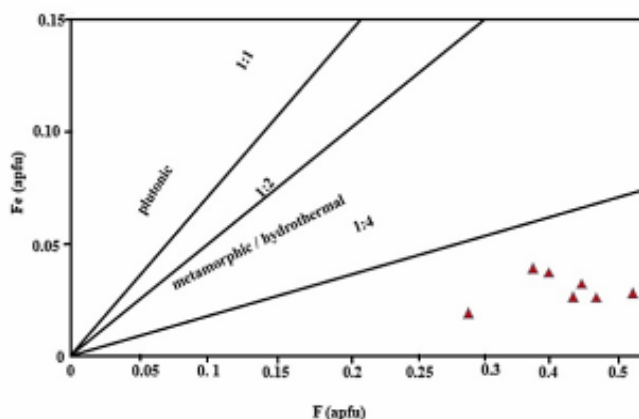
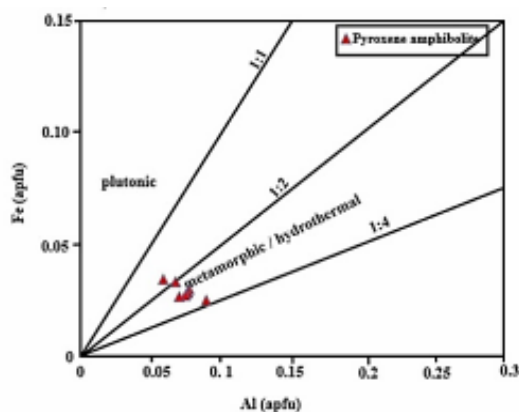
شکل ۱۱: موقعیت ترکیبی پلاژیوکلاز در نمودار آلبیت-آنورتیت-اورتوکلاز [۲۶]. علائم مشابه شکل های ۶ و ۷ می باشند

نتایج تجزیه ی شیمیایی ۷ نقطه از کانی اسفن در گارنت- پیروکسن آمفیبولیت های مورد مطالعه در جدول ۵ آورده شده است. براساس نمودارهای Fe در مقابل Al و F [۲۷]، اسفن های مورد مطالعه در محدوده دگرگونی/گرمایی قرار می گیرند (شکل ۱۲).

جدول ۵: نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی کانی اسفن در آمفیبولیت های هشت بندی. تعداد کاتیون های موجود در فرمول ساختاری اسفن بر اساس ۵ اتم اکسیژن محاسبه شده اند.

Sample #	S-45-3-Sph1	S-45-3-Sph2	S-45-3-Sph3	S-45-4-Sph1	S-45-4-Sph2	S-45-Sph1	S-45-6-Sph2
SiO ₂	۳۰/۶۳	۳۰/۳۹	۳۰/۷۹	۳۰/۵۰	۳۰/۸۱	۳۰/۱۰	۳۰/۶۷
TiO ₂	۳۵/۳۱	۳۵/۱۱	۳۵/۴۴	۳۵/۱۳	۳۵/۰۴	۳۴/۶۵	۳۵/۱۰
Al ₂ O ₃	۱/۹۷	۲/۰۲	۱/۸۳	۱/۵۵	۱/۸۶	۲/۲۳	۲/۰۲
Cr ₂ O ₃	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
FeO	۱/۰۱	۱/۰۹	۰/۹۸	۱/۳۲	۱/۳۰	۰/۹۲	۱/۰۴
MnO	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۲
MgO	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰
CaO	۲۸/۶۴	۲۸/۳۲	۲۸/۴۹	۲۸/۱۶	۲۸/۱۴	۲۷/۷۷	۲۸/۴۰
Na ₂ O	۰/۰۴	۰/۳۰	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۴۳	۰/۰۶
K ₂ O	۰/۰۰	۰/۱۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۹	۰/۰۴
BaO	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
NiO	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
P ₂ O ₅	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۰۸
Cl	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۰۱
F	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۲۸	۰/۵۲
Total	۹۸/۲۷	۹۷/۹۸	۹۸/۳۱	۹۷/۱۶	۹۷/۶۵	۹۶/۹۳	۹۷/۹۷

Si	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۲	۱/۰۲
Ti	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸
Al	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۸
Cr	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Fe ³⁺	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳
Fe ²⁺	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Mn	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Mg	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Ca	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۱	۱/۰۱	۱/۰۲
Na	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۰
K	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰
Ba	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Ni	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
P	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Cl	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰
F	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۵



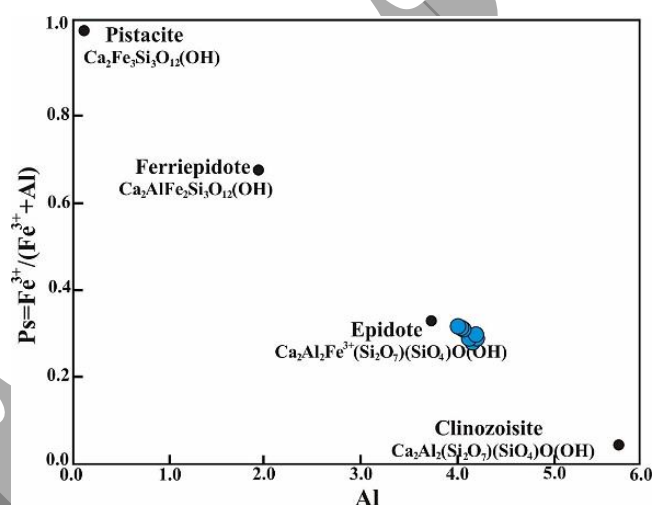
شکل ۱۲: نمودارهای Fe در مقابل Al و F [۲۷] اسفن در گارنت - پیروکسن آمفیبولیت‌های هشت‌بندی

برای تعیین نوع اپیدوت در اپیدوت-گارنت آمفیبولیت‌های مورد مطالعه، تعداد ۷ نقطه از این کانی مورد آنالیز نقطه‌ای قرار گرفته است که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است. همگی آهن در ساختار این کانی‌ها به صورت Fe^{+3} در نظر گرفته شد و مقدار $XPs = \text{pistacite}$: $XPs = Fe^{3+}/Fe^{3++Al}$ ۰/۲۸ تا ۰/۳۱ در نوسان است (جدول ۶). از این رو براساس رده‌بندی Armbruster و همکاران [۲۸] (شکل ۱۳)، اپیدوت‌های آنالیز شده در اپیدوت-گارنت آمفیبولیت‌های مورد مطالعه، در زیرگروه اپیدوت رده‌بندی می‌شوند.

جدول ۶: نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی کانی اپیدوت در اپیدوت-گارنت آمفیبولیت‌های هشت‌بندی. تعداد کاتیون‌های موجود در فرمول ساختاری اپیدوت بر اساس ۲۵ اتم اکسیژن محاسبه شده‌اند.

SiO ₂	۳۷/۷۳	۳۸/۱۳	۳۸/۰۲	۳۷/۳۳	۳۵/۶۰	۳۷/۸۳	۳۸/۶۹
TiO ₂	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۳
Al ₂ O ₃	۲۱/۵۰	۲۱/۷۶	۲۱/۹۴	۲۲/۰۶	۲۰/۹۱	۲۲/۶۴	۲۳/۱۴

FeO	۱۳/۴۱	۱۳/۳۵	۱۳/۶۱	۱۱/۹۹	۱۱/۵۲	۱۲/۷۷	۱۲/۷۱
MnO	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۲۴	۰/۱۱	۰/۱۹	۰/۰۴	۰/۱۱
MgO	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۳
CaO	۲۲/۸۹	۲۲/۸۹	۲۲/۹۵	۲۲/۶۱	۲۲/۳۸	۲۳/۳۳	۲۳/۱۴
Na ₂ O	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۹	۰/۷۶	۰/۰۴	۰/۱۷
K ₂ O	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۱۹	۰/۰۲	۰/۰۷
Total	۹۵/۹۷	۹۶/۴۷	۹۶/۹۳	۹۵/۰۷	۹۱/۹۳	۹۶/۸۷	۹۸/۲۹
Si	۳/۰۴	۳/۰۵	۳/۰۳	۳/۰۳	۳/۰۱	۳/۰۱	۳/۰۳
Ti	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱
Al	۲/۰۴	۲/۰۵	۲/۰۶	۲/۱۱	۲/۰۸	۲/۱۲	۲/۱۴
Fe ³⁺	۰/۹۰	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۵	۰/۸۳
Mn	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱
Mg	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰
Ca	۱/۹۸	۱/۹۶	۱/۹۶	۱/۹۷	۲/۰۳	۱/۹۹	۱/۹۴
Na	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۰۳
K	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱

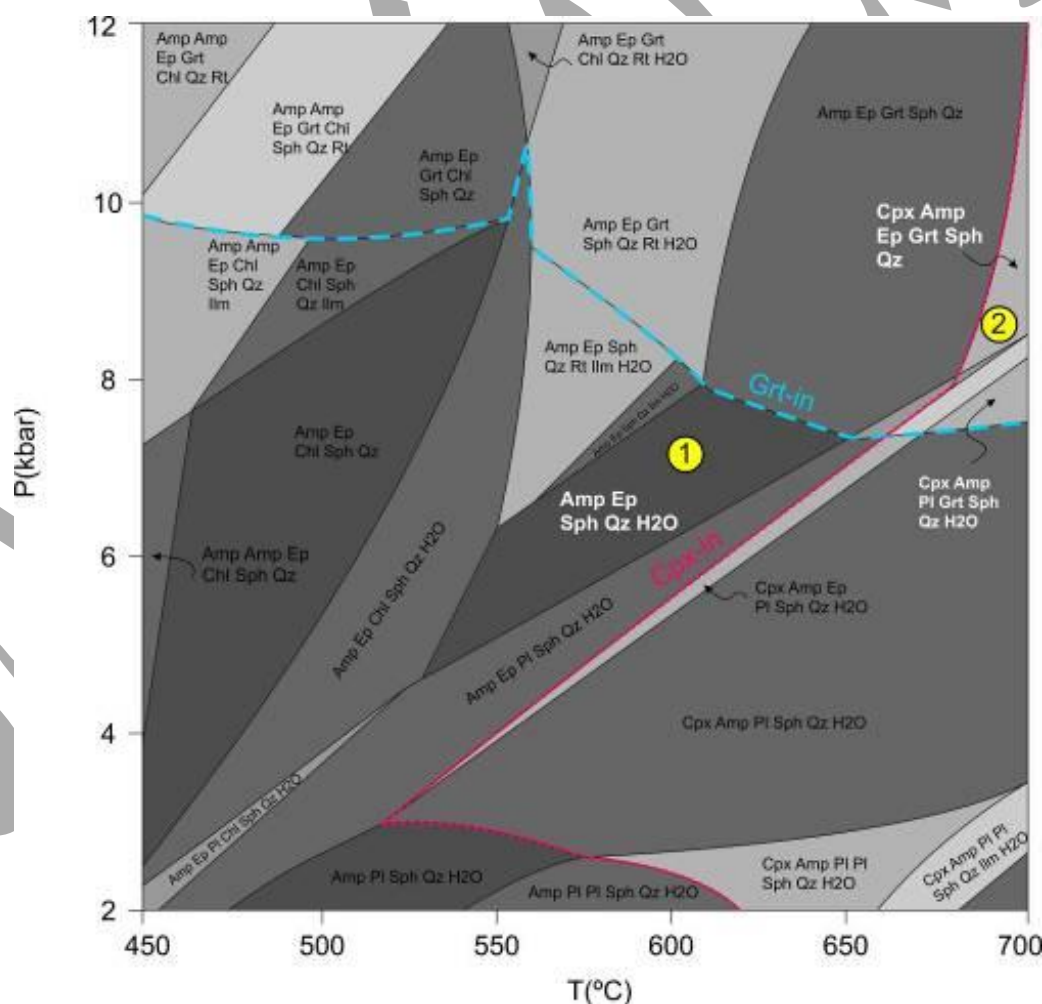


شکل ۱۳: رده‌بندی کانی اپیدوت در اپیدوت- گارنت آمفیبولیت‌های منطقه مورد مطالعه. نام‌گذاری اعضای مونوکلینیک آهن و آلومینیم‌دار گروه اپیدوت بر اساس مقدار پیستاسیت [۲۸].

دگرگونی و شرایط P-T

مجموعه کانی پلاژیوکلاز + هورنبلند در آمفیبولیت‌ها نشان دهنده شرایط رخساره آمفیبولیت دما-فشار متوسط است. از سوی دیگر، ظهور گارنت و کلینوپیروکسن نیاز به دما-فشار بالاتری دارد. برای بررسی وضعیت تشکیل سنگ‌های آمفیبولیتی مورد مطالعه، از ترموبارومتري معمولی و مدل‌سازی نمودار فازي (pseudosection) استفاده شد. زمین‌دماسنجی هورنبلند- پلاژیوکلاز [۲۹] و زمین‌فشارسنجی Al در هورنبلند [۳۰]، ۶۹۰ - ۵۹۰ درجه سانتی‌گراد و ۷/۹ - ۵/۵ کیلو بار فشار برای آمفیبولیت‌های جهت‌یافته و ۷۲۰ - ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴-۶ کیلو بار برای آمفیبولیت‌های توده‌ای حاصل شد.

یک نمودار فازی دما-فشار (P-T) (شکل ۱۴) برای ترکیب متوسط نمونه‌ها (با در نظر گرفتن یک سنگ مادر بازالتی مشابه MORB) با استفاده از نرم افزار Perple_X v. 7.1 (<https://www.perplex.ethz.ch>) [۳۱] محاسبه شد. نمودار تعادل فازی در سیستم شیمیایی NCFMASHT ($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}^*-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}$) در ارتباط با پایگاه داده ترمودینامیکی hp62ver.dat محاسبه شد. در محاسبات، LOI به عنوان یک سیال H_2O خالص در نظر گرفته شد. مدل‌های محلول جامد زیر (جزئیات در فایل solution.dat file enclosed in the Perple_X package) استفاده شد: Chl (W) برای کلریت، Gt (W) برای گارنت، Ctd (W) برای مسکوویت [۳۲]، cAmph (G) برای آمفیبول، Augite (G) برای کلینوپیروکسن [۳۳]، Ep (HP11) برای اپیدوت [۳۴] و FSP (C1) برای پلاژیوکلاز [۳۵]. نمودار نشان می‌دهد که مجموعه آمفیبول + پلاژیوکلاز + اپیدوت + اسفن در دمای ۶۵۰ - ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار کمتر از ۸ کیلو بار پایدار بوده که مطابق با نتایج دما-فشارسنجی هورنبلند - پلاژیوکلاز است. در دماها و فشارهای بالاتر، به ترتیب کلینوپیروکسن و گارنت در مجموعه‌ها ایجاد می‌شوند. بر این اساس، آمفیبولیت‌های حاوی گارنت + پیروکسن درجه‌های دگرگونی بالاتری را تحمل کرده‌اند (دما بیشتر از ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار بیش از ۸ کیلو بار). Miri و Sepahi [۳۶] نیز نتایج مشابهی برای متابازیت‌های منشور برافزایشی مکران با استفاده از مدل‌سازی نمودار فازی گزارش کرده‌اند.



شکل ۱۴: مدل سازی نمودار فازی آمفیبولیت های هشت بندی در مجموعه برافراشی مکران. قلمرو ۱ مربوط به آمفیبولیت های معمولی و قلمرو ۲ مربوط به گارنت- پیروکسن آمفیبولیت های مورد مطالعه است.

نتیجه گیری

- از نظر ساختاری و ظاهری، سنگ های آمفیبولیتی مکران به دو صورت جهت یافته و توده ای یافت می شوند و براساس کانی های شاخص دگرگونی، این سنگ ها شامل انواع آمفیبولیت های معمولی (جهت یافته و توده ای)، گارنت- پیروکسن آمفیبولیت و اپیدوت- گارنت آمفیبولیت می باشند.

- براساس نتایج آنالیز ریزکاوالکترونی، ترکیب آمفیبول عمدتاً مگنزیو تا فروهورنبلند و از نوع کلسیک هستند. پیروکسن در نمونه سنگ های اپیدوت - گارنت آمفیبولیت ها و گارنت- پیروکسن آمفیبولیت ها در گستره ی کلینوپیروکسن های کلسیم- منیزیم- آهن دار قرار می گیرند و از نوع دیوپسید می باشند. گارنت ها در محدوده ترکیبی آلماندین تا گروسولار قرار دارند. روند تغییرات ترکیب گارنت و عناصر Ca , Mg , Mn و Fe^{2+} از حاشیه به مرکز در بلورهای آن روند خاصی را نشان نمی دهند و حالت خطی دارند. عدم مشاهده منطقه بندی مشخص عناصر Ca , Mg , Mn و Fe^{2+} و الگوهای مسطح آنها بیانگر انتشار سریع در طی دگرگونی پیش رونده و در درجه حرارت بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی گراد است. ترکیب پلاژیوکلازها در آمفیبولیت های توده ای بیشتر در محدوده آلبیت - الیگوکلاز، در گارنت- پیروکسن آمفیبولیت ها بیشتر در محدوده الیگوکلاز- آندزین و در آمفیبولیت های جهت یافته بیشتر در محدوده آندزین - لابرادوریت قرار می گیرد. اسفن ها در گارنت- پیروکسن آمفیبولیت ها در محدوده دگرگونی/ گرمایی قرار می گیرد و اپیدوت در اپیدوت- گارنت آمفیبولیت های مورد مطالعه، در زیرگروه اپیدوت رده بندی می شوند.

- زمین دماسنجی هورنبلند- پلاژیوکلاز و زمین فشارسنجی Al در هورنبلند دمای ۶۹۰ - ۵۹۰ درجه سانتی گراد و فشار ۷/۹ - ۵/۵ کیلو بار برای آمفیبولیت های جهت یافته و دمای ۷۲۰ - ۵۵۰ درجه سانتی گراد و فشار ۶-۴ کیلو بار برای آمفیبولیت های توده ای را نشان دادند.

- نمودار فازی دما- فشار (P-T) نشان می دهد که مجموعه آمفیبول + پلاژیوکلاز + اپیدوت + اسفن در دمای ۶۵۰ - ۴۵۰ درجه سانتی گراد و فشار کمتر از ۸ کیلو بار پایدار است که مطابق با نتایج دما- فشارسنجی هورنبلند - پلاژیوکلاز است. بر این اساس، آمفیبولیت های حاوی گارنت + پیروکسن درجه های دگرگونی بالاتری را تحمل کرده اند (دما بیشتر از ۶۵۰ درجه سانتی گراد و فشار بیش از ۸ کیلو بار).

References

- [1] Triboulet C., Audren C., "Controls on P-T-t deformation path from amphibole zonations during progressive metamorphism of basic rocks (estuary of the River Vilaine, South Brittany, France)", Journal of Metamorphic Geology 6 (1988) 117-133. doi.10.1111/j.1525-1314.1988.tb00412.x
- [2] Triboulet C., "The (Na-Ca) amphibole-albite-chlorite-epidote-quartz geothermobarometer in the system S-A-F-M-C-N-H₂O 1. An empirical calibration", Journal of Metamorphic Geology 10 (1992) 545-556. doi.10.1111/j.1525-1314.1992.tb00105.x
- [3] Schulz B., Triboulet C., Audren C., "Microstructures and mineral chemistry in amphibolites from the western Tauern Window (Eastern Alps) and P-T-deformation paths of the Alpine greenschist-amphibolite facies metamorphism", Mineralogical Magazine 59 (1995) 641- 659. <https://doi.org/10.1180/minmag.1995.059.397.08>
- [4] Zenk M., Schulz B., "Zoned Ca-amphiboles and related P-T evolution in metabasites from the classical Barrovian metamorphic zones in Scotland", Mineralogical Magazine 68 (2004) 769. doi. 10.1180/0026461046850218

- [5] Bucher K., Frey M., "*Petrogenesis of Metamorphic Rocks (6th edn)*", Springer Verlag: Berlin, (1994) 318,.
- [6] Esmaeili R., Xiao W., Griffin W.L., Shafaii Moghadam H., Zhang Z., Ebrahimi M., Zhang J., Wan B., Ao S., Bhandari S., "*Reconstructing the source and growth of the Makran Accretionary Complex: Constraints from detrital zircon U-Pb geochronology*", *Tectonics* 39 (2) 2020 e2019TC005963. <https://doi.org/10.1029/2019TC005963>
- [7] Esmaeili R., Ao S., Shafaii Moghadam H., Zhang Z., Griffin W.L., Ebrahimi M., Xiao W., Wan B., Bhandari S., "*Amphibolites from makran accretionary complex record Permian-Triassic Neo-Tethyan evolution*", *International Geology Review* 17 64 (11) (2022) 1594-610. <https://doi.org/10.1080/00206814.2021.1946663>
- [8] Souri M., Ahmadi-Khalaji A., Wang J., Esmaeili R., Ebrahimi M., "*Amphibole mineral chemistry of amphibolites from the Makran accretionary complex (southeast of Iran)*", *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 8 (2) (2023) 236-258. (in Persian). doi. 10.22034/KJES.2023.8.2.105432
- [9] Andreev A. A., Ryt'sk E. Yu., Velikoslavinskii S. D., Tolmacheva E. V., Bogomolov E. S., Lebedeva Y.M., Fedoseenko A. M., "*Age, Composition, and Tectonic Setting of the Formation of Late Neoproterozoic (Late Baikalian) Complexes in the Kichera Zone, Baikal-Vitim Belt, Northern Baikal Area Geological, Geochronological, and Nd Isotope Data*", *Petrology* 30 (4) (2022) 337-368. <https://doi.org/10.1134/S0869591122040026>
- [10] Zhou Mei-Fu., Robinson Paul T., "*Origin and tectonic environment of podiform chromite deposits*", *Economic Geology*, 92.2, (1997) 259-262. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.92.2.259>
- [11] Braud J., "*Geological map of Kermanshah 1/250000 scale*", Tehran, Geological Survey of Iran, (1978).
- [12] Stocklin J., "*Geological map of Ajabshir plain*", Geological survey and mineral exploration of Iran, (1968).
- [13] McCall G. J. H., "*Mélanges of the Makran, southeastern Iran*", *Ophiolitic and related mélanges*, 66 (1983) 292-299.
- [14] McCall G.J.H., "*The geotectonic history of the makran and adjacent areas of southern Iran*", *Journal of Asian Earth Sciences* 15 (6) (1997) 517-531. [https://doi.org/10.1016/S0743-9547\(97\)00032-9](https://doi.org/10.1016/S0743-9547(97)00032-9)
- [15] McCall G. J. H., "*A Critique of the analogy between Archean and Phanerozoic tectonics based on regional mapping of the Mesozoic-Cenozoic plate convergent zone in the Makran, Iran*", *Precambrian Research* 127 (1-3) (2003) 5-17. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(03\)00178-5](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(03)00178-5)
- [16] Bagheri S., Damani Gol S.D., "*The eastern iranian orocline*", *Earth-Science Reviews* 210 (2020) 103322. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103322>
- [17] Samimi Namin M., "*Geological Map of Minab 1:250000 Scale*", Geological Survey of Iran (1983).
- [18] Leake B.E., "*Nomenclature of amphiboles*", *Mineralogical Magazine* 61 (1997) 296-311. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.405.13>
- [19] Morimoto N; "*Die nomenklatur von Pyroxenen*", *Mineralogy and Petrology* 39 (1988) 55-76. <https://doi.org/10.1007/BF01226262>
- [20] Goldsmith J.R., "*Review of the behavior of plagioclase under metamorphic conditions*", *American Mineralogist* 67(7-8) (1982) 643-652.
- [21] Spear F.S., "*Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths*", *Mineralogical Society of America Monographs* (1993) 352.

- [22] Carlson W., Schwarze E., "Petrological significance of prograde homogenization of growth zoning in garnet: an example from the Llano Uplift", *Journal of metamorphic Geology* 15.5 (1997) 631-644. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1997.tb00640.x>
- [23] Carlson W.D., "Scales of disequilibrium and rates of equilibration during metamorphism", *American Mineralogist* 87(2-3) (2002) 185-204. <https://doi.org/10.2138/am-2002-2-301>
- [24] Nyström A.I., Kriegsman L.M., "Prograde and retrograde reactions, garnet zoning patterns, and accessory phase behaviour in SW Finland migmatites, with implications for geochronology", *Geological Society, London, Special Publications* 220(1) (2003) 213-230. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.220.01.13>
- [25] Caddick M.J., Konopásek J., Thompson A.B., "Preservation of garnet growth zoning and the duration of prograde metamorphism", *Journal of Petrology* 51(11) (2010) 2327-2347. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq059>
- [26] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "An introduction to the rock forming minerals", Wiley New York (1992) 1–696.
- [27] Kowallis B.J., Christiansen E.H., Dorais M.J., Winkel A., Henze P., Franzen L., Mosher H., "Variation of Fe, Al, and F substitution in titanite (sphene)", *Geosciences* 12(6) (2022) 229. <https://doi.org/10.3390/geosciences12060229>
- [28] Armbruster T., Bonazzi P., Akasaka M., Bermanec V., Chopin C., Gieré R., Heuss-Assbichler S., Liebscher A., Menchetti S., Pan Y., Pasero M., "Recommended nomenclature of epidote-group minerals", *European Journal of Mineralogy* 18(5) (2006) 551-567. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2006/0018-0551>
- [29] Holland T., Blundy J., "Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry", *Contributions to mineralogy and petrology* 116 (1994) 433-447. <https://doi.org/10.1007/BF00310910>
- [30] Anderson J.L., Smith D.R., "The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer", *American mineralogist* 80(5-6) (1995) 549-559. <https://doi.org/10.2138/am-1995-5-614>
- [31] Connolly J.A., "Computation of phase equilibria by linear programming: a tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation", *Earth and Planetary Science Letters* 236(1-2) (2005) 524-541. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.033>
- [32] White R.W., Powell R., Johnson T.E., "The effect of Mn on mineral stability in metapelites revisited: New $a-x$ relations for manganese bearing minerals", *Journal of Metamorphic Geology* 32(8) (2014) 809-828. <https://doi.org/10.1111/jmg.12095>
- [33] Green E.C.R., White R.W., Diener J.F.A., Powell R., Holland T.J.B., Palin R.M., "Activity–composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks", *Journal of Metamorphic Geology* 34(9) (2016) 845-869. <https://doi.org/10.1111/jmg.12211>
- [34] Holland T.J.B., Powell R., "An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids", *Journal of metamorphic Geology*, 29(3), (2011) 333-383. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00923.x>
- [35] Holland T., Powell R., "Activity–composition relations for phases in petrological calculations: an asymmetric multicomponent formulation", *Contributions to Mineralogy and Petrology* 145 (2003) 492-501. <https://doi.org/10.1007/s00410-003-0464-z>
- [36] Miri M., Sepahi A.A., "High-pressure–Low-temperature metamorphic rocks of Iran and their geodynamic significance: A review", *Journal of Geodynamics* 157 (2023) 101986. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2023.101986>

The study of mineral chemistry and metamorphism condition of the amphibolites in the Hashtbandi area, North Makran zone (southeast of Iran)

Maryam Souri¹, Ahmad Ahmadi Khalaji^{1*}, Jiamin Wang², Rasoul Esmaeili^{2,3}, Mohammad Ebrahimi³, Mirmohammad Miri⁴

1. Department of Geology, Faculty of Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2. Institute of Geology and Geophysics, Academy of Sciences, Beijing, China

3. Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

4. Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran

*E-mail addresses: ahmadikhalaj.a@lu.ac.ir Tel: 06633120619

Abstract

The study amphibolites are located in Hashtbandi village (east of Minab). The Makran amphibolites form a part of the metamorphic rocks of northern Makran ophiolitic belt, which are found in massive and orientated forms. Based on the indicator minerals, these rocks include ordinary amphibolite, epidote-garnet amphibolite and garnet-pyroxene amphibolite. The minerals in the ordinary amphibolites include amphibole, plagioclase, zircon apatite, quartz and sphene. In addition to these minerals, garnet and pyroxene are found in the garnet-pyroxene amphibolites, and epidote, garnet and pyroxene in the epidote-garnet amphibolites. Amphiboles in these rocks are calcic type and composition from magnesian to ferrohornblende. The clinopyroxene is calcic type and mostly in the diopside range. Garnets have a compositional range from almandine to grossular, and the trend of changes in composition and elements such Mn, Mg, Ca and Fe²⁺ from the rim to core in this mineral does not show a specific trend and is linear. The lack of clear zoning of elements such Mn, Mg, Ca and Fe²⁺ and their flat patterns in garnet indicate rapid diffusion during progressive metamorphism and at temperatures above 600 °C. The composition of plagioclases is mostly in the albite- labradorite range. The sphene is in the metamorphic/hydrothermal range, and epidote is classified in the epidote subgroup. The hornblende-plagioclase geothermometry and Al-in-hornblende geobarometry result 590 – 690 °C and 5.5 – 7.9 kbar P for the oriented amphibolites and 550 to 720 °C and 4–6 kbar for the massive ones. A P-T phase diagram shows that the amphibole + plagioclase + epidote+ sphene assemblage is stable at 450 – 650 °C T and < 8 kbar P corresponding to the hornblende – plagioclase thermobarometry results. In higher temperatures and pressures, clinopyroxene and garnet occur in the assemblages, respectively. On this basis, the garnet + pyroxene bearing amphibolites endured higher metamorphism degrees, at comparative temperature and pressure of > 650 °C and > 8 kbar.

Key Words: *clinopyroxene, garnet, mineral chemistry, amphibolite, Makran.*