

## **Optical characters, chemical composition and formation mechanism of colorless sodic and sodic-calcic amphiboles in piemontite-quartz schists from high P-low T Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan**

**J. Izadyar**

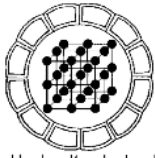
*Department of Geology, Faculty of Science, Zanjan University, Zanjan  
Email: Izadyar@mail.znu.ac.ir*

(Received: 16/7/2004, received in revised form: 11/3/2005)

**Abstract:** Colorless sodic and sodic-calcic amphiboles occur in piemontite-quartz schists in the Asemi-gawa (garnet zone) and Besshi (albite-biotite zone) areas of high P-low T Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan. Colorless sodic amphiboles in the Asemi-gawa area are glaucophane while colorless sodic-calcic amphiboles from the Besshi area are barroisite and magnesiokatophorite. Colorless sodic and sodic-calcic amphiboles are richer in Mg and poorer in Fe in comparison with the colored sodic and sodic-calcic amphiboles from the epidote-quartz schists of the same metamorphic grade. Optical characters of the glaucophanes from the Asemi-gawa area are identified by their colorless and lack of pleochroism in the  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  directions;  $n_{\gamma} \perp Z = 13$ ,  $2V_{(\alpha)} = 20$  and  $\beta = Y$ . Optical characters of magnesiokatophorite from the Besshi area are: colorless and without pleochroism in the  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  directions;  $n_{\gamma} \perp Z = 17$ ,  $2V_{(\alpha)} = 25$  and  $\beta = Y$ . Chemical composition of the coexisting minerals with colorless sodic and sodic-calcic amphiboles have shown a very high oxygen fugacity condition in which iron exists only as  $Fe^{3+}$  and occurs mostly in hematite. Therefore, such condition was responsible for formation of sodic and sodic-calcic amphiboles which are very rich in Mg.

**Keywords:** *Piemontite-quartz schist, Sanbagawa metamorphic belt, sodic and sodic-calcic amphiboles.*





## خصوصیات نوری، ترکیب شیمیایی و نحوه تشکیل آمفیبول‌های سدیک و سدیک - کلسیک بی رنگ در پیه مونیتیت - کوارتز شیست‌های بخش مرکزی شیکوگو از نوار دگرگونی فشار بالا - دمای پائین سانباگاوا واقع در جنوب غربی ژاپن

جواد ایزدی‌ار

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان

پست الکترونیکی: [Izadyar@mail.znu.ac.ir](mailto:Izadyar@mail.znu.ac.ir)

(دریافت مقاله ۸۳/۴/۲۵، دریافت نسخه نهایی ۸۳/۱۲/۲۰)

**چکیده:** آمفیبول‌های سدیک و سدیک - کلسیک بی رنگ در پیه مونیتیت - کوارتز شیست‌های منطقه آسمی گاوا (زون گارنت) و منطقه بس شی (زون آل بیت - بیوتیت) در بخش مرکزی از نوار دگرگونی فشار بالا - دمای پائین سانباگاوا واقع در جنوب غربی ژاپن یافت شدند. آمفیبول‌های سدیک بی رنگ در منطقه آسمی گاوا از نوع گلوکوفان، و آمفیبول‌های سدیک - کلسیک بی رنگ در منطقه بس شی از نوع باروئسیت و مگنزیوکاتوفورویت هستند. آمفیبول‌های سدیک و سدیک - کلسیک بی رنگ نسبت به آمفیبول‌های سدیک و سدیک - کلسیک رنگی موجود در اپیدوت - کوارتزشیست‌ها در درجه دگرگونی یکسان از منیزیم غنی تر ولی از آهن فقیرترند. مشخصات نوری گلوکوفان‌های بی رنگ منطقه آسمی گاوا عبارتند از: بی رنگ و فاقد چند رنگی در جهات  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$ ؛  $n_{\gamma} \perp Z = 1.3$ ؛  $2V_{(\alpha)} = 20^\circ$  و  $\beta = Y$ . مشخصات نوری مگنزیوکاتوفوریت‌های بی رنگ منطقه بس شی عبارتند از: بی رنگ و فاقد چندرنگی در جهات  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$ ؛  $n_{\gamma} \perp Z = 1.7$ ؛  $2V_{(\alpha)} = 25^\circ$  و  $\beta = Y$ . مطالعه ترکیب شیمیایی کانی‌های همزیست با آمفیبول سدیک و سدیک - کلسیک بی رنگ در پیه مونیتیت - کوارتزشیست‌ها نشان می‌دهد که این شیست‌ها در شرایط فوگاسیته اکسیژن بسیار بالا تشکیل شده‌اند که باعث شده است تا تمام آهن با ظرفیت ۳ و عمدتاً در ساختار هماتیت ظاهر شود. این ویژگی موجب تشکیل آمفیبول‌های سدیک و سدیک - کلسیک غنی از منیزیم بی رنگ شده است.

**واژه‌های کلیدی:** پیه مونیتیت-کوارتز شیست، آمفیبول‌های سدیک و سدیک - کلسیک، نوار دگرگونی سانباگاوا.

## مقدمه

پیه مونتیت - کوارتزشیست ها سنگ های دگرگونی غنی از منگنز هستند که در شرایط اکسیدان بالا تشکیل شده اند و در بسیاری از نوارهای دگرگونی فشار بالا نظیر اروپا [۱]، نیوزیلند [۲]، و ژاپن [۳ و ۴] گزارش شده اند. مطالعه پیه مونتیت - کوارتزشیست ها از دیدگاه های گوناگون دارای اهمیت است. از دیدگاه کانی شناسی، این سنگ ها حاوی کانی های نادر و گاهی بسیار کمیاب نظیر گارنت غنی از منگنز، پیروکسن سدیک غنی از منگنز، برونیت و غیره هستند که مطالعه آنها می تواند منجر به اطلاعات با ارزش کانی شناسی شود که بدست آوردن آنها از طریق ساخت تجربی کانی ها به دلیل شرایط خاص تشکیل بسیار مشکل است [۵ تا ۷]. از دیدگاه سنگ شناسی، دگرگونی به دلیل داشتن مجموعه خاصی از کانی ها، ترکیب شیمیایی و ارتباطات فازی آنها می تواند نقش مهمی در تعیین دقیق تر شرایط دگرگونی داشته باشد [۱]. فرمول معمولی کانی های خانواده آمفیبول به صورت  $A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}(OH,F)_2$  است. عمده ترین کاتیون هایی که می توانند وارد ساختار بلوری آمفیبول ها شوند عبارتند از [۸]:

$$A: Na, K, B, Na, Mg, Fe^{+2}, Mn, Li, Mg, C, Fe^{+2}, Fe^{+3}, Al, Mn, Zn, Cr, Ti, Li, Si, T, Al \text{ و } Si$$

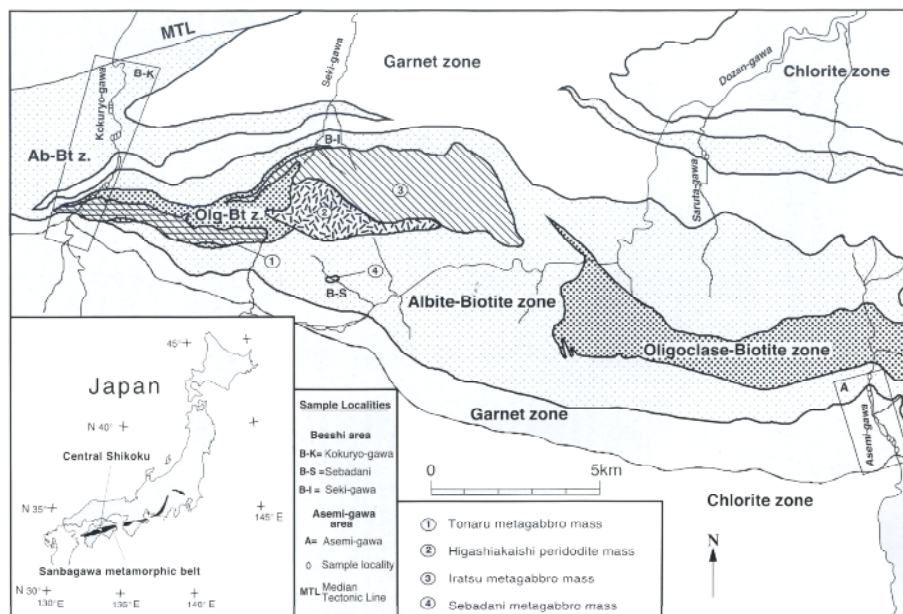
آمفیبول ها به عنوان کانی های سطل زباله ای معرفی شده اند [۹] که کنایه از تنوع کاتیون های شرکت کننده در ساختار آنها دارد. امتیاز این تنوع ترکیبی در تعیین شرایط دگرگونی آنهاست. در واقع می توان گفت که آمفیبول ها یکی از بهترین ضبط کننده های شیمیایی متغیرهای مهم دگرگونی نظیر دما، فشار و فوگاسیته اکسیژن هستند [۸ و ۱۰].

در مطالعات کانی شناسی و سنگ شناسی پیه مونتیت - کوارتز شیست های نوارسانباگاوا در شیکوکوی مرکزی، آمفیبول های سدیک و سدیک - مواد کلسیم داری یافت شدند که بر خلاف انتظار کاملاً بی رنگ بودند و این امر موجب شد که مطالعه دقیقی در مورد میزان فراوانی، خصوصیات نوری، ترکیب کانی شناسی، مجموعه کانی های همراه، و چگونگی تشکیل آنها انجام شود که نتایج آن در این مقاله ارایه می شود.

## موقعیت زمین شناسی، محل های برداشت نمونه و روش تجزیه شیمیایی

نوار دگرگونی سانباگاوا واقع در جنوب غربی ژاپن که در کرتاسه متحمل دگرگونی فشار بالا - دمای پائین شده است یکی از نوارهای دگرگونی شناخته شده که تاکنون مطالعات بسیاری در آن انجام گرفته است [۱۱ تا ۱۳] (شکل ۱). این نوار از بخش شمالی به وسیله نوار دگرگونی فشار پائین - دمای بالای ریوک محدود شده است. این دو محدوده متفاوت دگرگونی را گسل بزرگی بنام خط میانی زمین ساختی<sup>۱</sup> از یکدیگر جدا کرده است.

1- Median Tectonic Line, MTL.



شکل ۱ نقشه زون‌های دگرگونی نوار سانباگوا در شیکوکوی مرکزی (برگرفته از مرجع [۲۲]) و محل‌های برداشت نمونه. B-K و B-S, B-I مناطق برداشت نمونه در ناحیه بس شی را نشان می‌دهند. چهار ضلعی‌ها نمایانگر محل‌هایی است که بیشترین مطالعات در آن صورت گرفته است.

مرز جنوبی نوار سانباگوا در جنوب مجموعه میکابو و گسل مرتبط با آن واقع شده است. انتهای شرقی نوار در زیر ته نشست‌های کواترنری کانتو در نزدیکی توکیو قرار دارد و انتهای غربی آن با یک مرز گسله با ته‌نشست‌های کرتاسه در کیوشو واقع شده است [۱۲ تا ۱۴] (شکل ۱).

بیشترین و بهترین گسترش از نوار سانباگوا در شیکوکوی مرکزی واقع شده است و به همین دلیل یکی از مکان‌هایی است که بیشترین مطالعات مربوط به این نوار در دو محدوده آسمی‌گاوا و بس شی واقع در شیکوکوی مرکزی صورت پذیرفته است. نوار سانباگوا، شیکوکوی مرکزی و مناطق آسمی‌گاوا و بس شی در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. نوار سانباگوا به طور قابل توجهی دارای ترکیب سنگ‌شناسی یکنواختی در طول خود است. بخش عمده‌ای از این نوار از شیست‌های پلیتی تشکیل شده است که بیشتر دارای گرافیت‌اند. مقادیر کمتری از شیست‌های پلیتی کربناته نیز در آن وجود دارد. شیست‌های بازیک که نشان دهنده مواد اولیه پوسته اقیانوسی است نیز بخش قابل توجهی از نوار را تشکیل می‌دهند. کوارتزشیست‌های غنی از منگنز و آهن نیز که دارای ترکیب کانی‌شناسی بسیار جالبی هستند در این نوار واقع شده‌اند هر چند که دارای فراوانی کمتری از شیست‌های پلیتی و بازیک هستند. تعدادی بلوک‌های

زمین ساختی منفرد از جنس پریدوتیت، متاگابرو و سرپانتینیت نیز در نوار واقع شده‌اند [ ۱۲ و ۱۳]. در جدول ۱ مجموعه و پایداری کانیهای سیلیکاته در شیست‌های پلیتی، شیست‌های بازیک، کوارتزشیست‌های غنی از آهن ارائه شده است.

در شیکوکوی مرکزی ظهور کانی‌های شاخص دگرگونی، نوار سانباگوا را به چهار زون دگرگون تقسیم کرده‌اند که عبارتند از زون‌های کلریت، گارنت، آل بیت - بیوتیت، و الیگوکلاز - بیوتیت [ ۱۲ و ۱۵ و ۱۶ ] ( تصویر ۱ ). شرایط دگرگونی نوار سانباگوا توسط محققین بررسی شده است. براساس این شرایط برای زون کلریت فشار ۵-۶ kbar و دمای  $250-300^{\circ}\text{C}$  و برای زون الیگوکلاز - بیوتیت فشار ۱۰-۱۲ kbar و دمای  $610^{\circ}\text{C}$  تعیین شده است [ ۱۲ ]. بنابراین به طور کلی شیب دما - فشار از زون کلریت به سمت زون آل بیت - بیوتیت مثبت است (مسیر دگرگونی پیش رونده سانباگوا ) اما شواهدی همچون منطقه بندی شیمیایی کانی‌هایی مانند آمفیبول و گارنت یک مسیر مرتبط با کاهش فشار دما (مسیر دگرگونی پس رونده سانباگوا) را نیز نشان می‌دهند [ ۱۲ ].

**جدول ۱** پایداری کانی‌های سیلیکات در شیست‌های پلیتی، هماتیت - کوارتز شیست، هماتیت - بازیک شیست و پیه مونیتیت - کوارتز شیست نوار دگرگونی سانباگوا. ( - ) کانی‌های اصلی، ( - - ) کانی‌های فرعی. کوارتز، فنریت و اپیدوت غالباً وجود دارند. فلوگوپیت به عنوان کانی ثانویه در پیه مونیتیت - کوارتز شیست‌ها وجود دارد. مجموعه کانی‌های شیست‌های پلیتی و هماتیت - بازیک شیست‌ها از مرجع [ ۱۶ ] ذکر شده‌اند.

| الیگوکلاز - بیوتیت | آل بیت - بیوتیت | گارنت | کلریت | زون         |                           |
|--------------------|-----------------|-------|-------|-------------|---------------------------|
|                    |                 |       |       | کلریت       | شیست پلیتی                |
|                    |                 |       |       | گارنت       |                           |
|                    |                 |       |       | بیوتیت      |                           |
|                    |                 |       |       | هورنبلند    |                           |
|                    |                 |       |       | لاوزونیت    |                           |
|                    |                 |       |       | آل بیت      |                           |
|                    |                 |       |       | وینچیت      | هماتیت - کوارتز شیست      |
|                    |                 |       |       | کروسیست     |                           |
|                    |                 |       |       | هورنبلند    |                           |
|                    |                 |       |       | کلریت       |                           |
|                    |                 |       |       | پیروکسن     |                           |
|                    |                 |       |       | گارنت       |                           |
|                    |                 |       |       | آل بیت      |                           |
|                    |                 |       |       | کلریت       | پیه مونیتیت - کوارتز شیست |
|                    |                 |       |       | گارنت       |                           |
|                    |                 |       |       | پیه مونیتیت |                           |
|                    |                 |       |       | برونیت      |                           |
|                    |                 |       |       | تالک        |                           |
|                    |                 |       |       | آل بیت      |                           |
|                    |                 |       |       | کروسیست     |                           |
|                    |                 |       |       | باروسیت     |                           |
|                    |                 |       |       | هماتیت      |                           |
|                    |                 |       |       | وینچیت      | هماتیت - بازیک شیست       |
|                    |                 |       |       | کروسیست     |                           |
|                    |                 |       |       | هورنبلند    |                           |
|                    |                 |       |       | کلریت       |                           |
|                    |                 |       |       | بیوتیت      |                           |
|                    |                 |       |       | گارنت       |                           |

هرچند که پیه مونیتیت-کوارتز شایسته‌ها در تمام درجات دگرگونی اشاره شده در شیکوکوی مرکزی یافت می‌شوند اما به جهت بررسی تأثیر دگرگونی بر ترکیب شیمیایی آمفیبول‌ها در این مطالعه نمونه‌ها از زون گارنت واقع در منطقه آسمی گاوا و زون آل بیت-بیوتیت در ناحیه بس-شی برداشت شدند که محل دقیق برداشت نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. در دو منطقه آسمی گاوا و بس شی پیه مونیتیت-کوارتز شایسته‌ها به صورت لایه‌های با ضخامت چند سانتی-متر تا چندین متر دیده می‌شوند که در تماس مستقیم با شایسته‌های پلیتی و بازیک قرار دارند. بعضی از پیه مونیتیت-کوارتز شایسته‌ها در تماس مستقیم با کوارتز شایسته‌هایی قرار دارند که فاقد پیه مونیتیت هستند.

تجزیه‌های شیمیایی به وسیله الکترون میکروپروب مدل Hitachi S550 مجهز به تجهیزات تجزیه‌ای Kevex در دانشگاه کیوتو کشور ژاپن انجام گرفت. جزئیات روش تجزیه با دستگاه از روش پیشنهادی موری [۱۷] و هیراجیما [۱۸] استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نوع BSI با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مدل Hitachi S530 & S550 در شرایط ۲۰KV و شدت جریان در حدود ۱۰۰۰ PA در دانشگاه کیوتو تهیه شدند.

### سنگ‌نگاشتی و ترکیب شیمیایی

پیه مونیتیت - کوارتز شایسته‌های برداشت شده از زون گارنت منطقه آسمی گاوا معمولاً به صورت ترکیبی از لایه‌های غنی از منگنز و غنی از سیلیس دیده می‌شوند که هم در مقیاس موزسکویی و هم در مقیاس میکروسکویی به خوبی قابل شناسایی هستند. در مطالعه سنگ-نگاشتی، پهنای لایه‌های غنی از پیه مونیتیت از ۰/۵ تا ۱/۵ میلی‌متر تغییر می‌کند. این لایه‌ها بیشتر از پیه مونیتیت، گارنت، تالک و هماتیت با مقادیر کمتری از کوارتز، فنزیت، آل بیت، و برونیت تشکیل یافته‌اند. لایه‌های غنی از کوارتز معمولاً دارای ۱ تا ۲ میلی‌متر ضخامت هستند و از کوارتز، فنزیت، آل بیت، تالک، و کلریت همراه با مقادیر کمتری از پیه مونیتیت، گارنت و کلریت به همراه کانی‌های فرعی هماتیت و برونیت تشکیل شده‌اند. نمونه‌های برداشت شده از ناحیه بس شی تقسیم بندی لایه‌های غنی از کوارتز و غنی از منگنز نظیر نمونه‌های برداشت شده از آسمی گاوا را نشان نمی‌دهند و مجموعه کانی‌های تشکیل دهنده پیه مونیتیت - کوارتز شایسته‌های این منطقه عبارتند از کوارتز + آل بیت + کلریت + گارنت + پیه مونیتیت + برونیت + آپاتیت + هماتیت + تالک + بارویسیت + دولومیت. در جدول ۲ مجموعه کانی‌های پیه مونیتیت - کوارتز شایسته‌های نواحی بس شی و آسمی گاوا نشان داده شده است. مطالعات سنگ-نگاشتی و شیمی کانی نشان می‌دهند که فراوانی مدال تالک در نمونه‌های آسمی گاوا بیشتر از ناحیه بس شی است در حالیکه آمفیبول‌های سدیک بی رنگ فراوانی مدال کمتری در ناحیه آسمی گاوا نسبت به ناحیه بس شی دارند. تعداد کمی از نمونه‌های منطقه بس شی حاوی دولومیت و کلسیت هستند و به طور کلی مطالعات سنگ‌نگاشتی نشان می‌دهند که دولومیت و کلسیت فازهای اصلی تشکیل دهنده پیه مونیتیت - کوارتز شایسته‌های مطالعه شده نیستند.

جدول ۲ مجموعه کانی های تشکیل دهنده پیه مونتیت - کوارتز شیبست های نوار دگرگونی سانباگاو.

| منطقه       | اسمی گاو |      |      |      | بس شی |      |      |       |       |
|-------------|----------|------|------|------|-------|------|------|-------|-------|
| شماره نمونه | 1510-0   | 1510 | 1213 | B5-d | I-6p  | I-6q | B-4c | I-1ap | I-1aq |
| پیه مونتیت  | +        | +    | +    | +    | +     | +    | +    | +     | +     |
| گارت        | +        | +    | +    | +    | +     | +    | +    | +     | +     |
| برونیت      | +        | +    | +    | +    | +     | +    | -    | -     | -     |
| فنزیت       | +        | +    | -    | +    | +     | +    | +    | +     | +     |
| تالک        | +        | +    | +    | +    | +     | -    | +    | -     | -     |
| کلریت       | +        | +    | +    | +    | +     | +    | +    | +     | +     |
| فلوگوپیت    | +        | +    | -    | -    | -     | -    | -    | -     | -     |
| آلبیت       | +        | +    | +    | +    | +     | +    | +    | +     | +     |
| کوارتز      | +        | +    | +    | +    | +     | +    | +    | +     | +     |
| آمفیبول     | +        | +    | +    | +    | +     | -    | +    | -     | +     |
| هماتیت      | +        | +    | +    | +    | +     | +    | +    | +     | +     |
| آپاتیت      | +        | +    | +    | +    | +     | -    | +    | +     | +     |

تالک با شکل صفحه ای به صورت بلورهای مجزا یا به همراه فیلوسیلیکات های دیگر یعنی فنزیت و کلریت دیده می شود. تجزیه شیمیایی تالک نشان داد که دارای ترکیبی بسیار نزدیک به فرمول عضو نهایی آن است (جدول ۳).

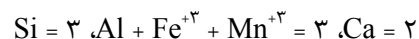
فنزیت یکی از کانیهای اصلی تشکیل دهنده پیه مونتیت - کوارتز شیبست های سانباگاو است که معمولاً در زمینه سنگ ها دیده می شود اما گاهی به صورت میانبار در پورفیروبلاست های آلبیت وجود دارد. فنزیت نسبت به سایر فیلوسیلیکات های همراه، دارای درصد آهن بیشتر و مگنیز کمتری است. مقایسه ترکیب شیمیایی فنزیت بین دو منطقه آسمی گاو و بس شی نشان می دهد که فنزیت های آسمی گاو دارای Si و Mg زیادتری از فنزیت های بس شی هستند که نمایانگر تفاوت دمای دگرگونی بین دو منطقه است [۱۹] (جدول ۳).

کلریت نیز یکی از کانیهای اصلی تشکیل دهنده پیه مونتیت - کوارتز شیبست ها محسوب می شود که معمولاً به صورت صفحه در زمینه سنگ واقع می شود. نتایج تجزیه شیمیایی کلریت نشان می دهد که دارای ترکیب شیمیایی بسیار نزدیک به عضو نهایی کلینوکلر است (جدول ۳).

فلوگوپیت تنها در حاشیه فنزیت در نمونه های جمع آوری شده از منطقه آسمی گاو دیده می شود. فنزیت که در حاشیه آن فلوگوپیت واقع شده است دارای ساختار منطقه بندی است که در آن از مرکز بلور به حاشیه، مقدار Mg و Si به مقدار کمی افزایش یافته در حالیکه مقدار Al به مقدار کمی کاهش می یابد [۱۹]. مشابه این ساختار منطقه بندی شیمیایی در مرجع [۲۰] نیز گزارش و پیشنهاد شده است که حاشیه در طی مسیر دگرگونی پس رونده سانباگاو تشکیل شده اند. فلوگوپیت نیز به عنوان یک فاز تشکیل شده در طی دو مرحله پس رونده دگرگونی سانباگاو تشکیل شده است [۱۹]. ترکیب شیمیایی فنزیت ها در جدول ۳ آورده شده است.

پیه مونتیت در تمام نمونه های مطالعه شده با فراوانی بالا (با میانگین ۲۵ درصد) وجود دارد. پیه مونتیت هم به صورت یک فاز اصلی تشکیل دهنده زمینه و هم به صورت میانبار در داخل پورفیروبلاست های گارت و آلبیت قرار دارند. ساختار فرمولی پیه مونتیت ها با استفاده از

روش اسمیت [۲۱] محاسبه شد و در اغلب پیه مونیت‌های تجزیه شده با احتساب ۱۲/۵ اکسیژن، توزیع کاتیونی زیر را نشان می‌دهند:



بنابراین جانشینی Al به جای Si در موقعیت چهاروجهی وجود ندارد. معمولاً منگنز به صورت  $\text{Mn}^{+3}$  در موقعیت هشت وجهی است ولی در بعضی از انواع پیه مونیت‌ها مقداری از منگنز به صورت  $\text{Mn}^{+2}$  جایگزین Ca می‌شود. پیه مونیت‌های منطقه آسمی گاوا به وضوح دارای ساختار منطقه‌بندی شیمیایی هستند که در آن دو منطقه مرکز و حاشیه قابل مشاهده است. بخش مرکزی یا هسته پیه مونیت که بخش عمده کانی را تشکیل می‌دهد دارای  $\text{Fe}^{+3}$  کمتر اما  $\text{Mn}^{+3}$  و Al زیادتری از حاشیه است. در پیه مونیت‌های منطقه بس شی، ساختار منطقه‌بندی شیمیایی به روشنی منطقه آسمی گاوا نیست، اما گاهی ساختار منطقه‌بندی شیمیایی متشکل از مرکز یا هسته کانی و حاشیه آن را نشان می‌دهند که در حاشیه، کانی از  $\text{Fe}^{+3}$  و  $\text{Mn}^{+3}$  نسبت به مرکز کانی غنی‌تر است (جدول ۴). گارنت به صورت پورفایرولاست‌های خود شکل تقریباً در تمامی نمونه‌های مطالعه شده دیده می‌شود و اندازه آنها بین ۱ تا ۳ میلی-متر تغییر می‌کند. گاهی گارنت‌ها به صورت پویی کیلوبلاست دیده شد که در آن مقادیر زیادی میانبار از پیه مونیت، کوارتز، هماتیت، برونیت، تالک و آمفیبول وجود دارند. از نظر شیمیایی این گارنت‌ها یکنواخت بوده و از نوع اسپسارترین حاوی مقادیری کلسیم و آهن هستند.

**جدول ۳** ترکیب‌های شیمیایی فنزیت، کلریت، فلوگوپیت و تالک از پیه مونیت-کوارتز شیست‌های نوار دگرگونی سانبا گاوا.

| منطقه                          | آسمی گاوا   |        |          |        | بس شی |       |       |
|--------------------------------|-------------|--------|----------|--------|-------|-------|-------|
|                                | شماره نمونه | ۱۵۱۰-۰ | ۱۵۱۰-۰   | ۱۵۱۰-۰ | B-5d  | B-5d  | B-5d  |
| نام کانی                       | فنزیت       | کلریت  | فلوگوپیت | تالک   | فنزیت | کلریت | تالک  |
| شماره تجزیه                    | ۱۴۱۷        | ۱۴۶    | ۱۴۱۵     | ۱۵۶    | ۳۴    | ۲۲    | ۴۴    |
| SiO <sub>2</sub>               | ۴۸/۹۲       | ۳۰/۴   | ۴۴/۶۱    | ۶۳/۱۵  | ۴۸/۱۸ | ۲۹/۸۳ | ۶۲/۷۳ |
| TiO <sub>2</sub>               | ۱/۰۷        | -      | -        | -      | ۱/۰۷  | -     | -     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۲۵/۹۱       | ۱۹/۲۵  | ۱۱/۱۵    | -      | ۲۷/۷۱ | ۱۸/۸۸ | -     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۴/۲         | ۰/۷۶   | ۰/۸۱     | ۰/۰۷   | ۴/۳۸  | ۰/۷۴  | ۰/۱۵  |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۰/۴۹        | -      | -        | -      | ۰/۲   | -     | -     |
| MnO                            | -           | ۲/۰۶   | ۱/۱۲     | ۰/۳۳   | -     | ۱/۳۷  | ۰/۳۴  |
| MgO                            | ۳/۱۸        | ۳۱/۷۹  | ۲۴/۸     | ۳۰/۹۶  | ۳/۱۷  | ۳۱/۳۱ | ۳۰/۹۳ |
| CaO                            | -           | -      | -        | -      | -     | -     | -     |
| Na <sub>2</sub> O              | ۱/۲۷        | -      | -        | -      | ۱/۲۲  | -     | -     |
| K <sub>2</sub> O               | ۹/۶۴        | -      | ۱۰/۱۲    | -      | ۹/۷۸  | -     | -     |
| Total                          | ۹۴/۶۸       | ۸۴/۲۶  | ۹۲/۶۱    | ۹۴/۵۱  | ۹۵/۷۱ | ۸۲/۱۳ | ۹۴/۱۵ |
|                                | O=۲۲        | O=۲۸   | O=۲۲     | O=۲۲   | O=۲۲  | O=۲۸  | O=۲۲  |

|       |       |       |       |       |      |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| Si    | ۶/۶۱  | ۵/۸۸  | ۶/۳۶  | ۸     | ۶/۴۵ | ۵/۹   | ۸     |
| AlIV  | ۱/۳۹  | ۲/۱۲  | ۱/۶۴  | -     | ۱/۵۵ | ۲/۱   | -     |
| AlVI  | ۲/۷۴  | ۲/۲۲  | ۰/۲۳  | -     | ۲/۸۲ | ۲/۳   | -     |
| Ti    | ۰/۱۱  | -     | -     | -     | ۰/۱  | -     | -     |
| Fe3+  | ۰/۴۳  | ۰/۱۱  | ۰/۰۹  | ۰/۰۰۷ | ۰/۴۴ | ۰/۱   | ۰/۰۱۴ |
| Mn3+  | ۰/۰۵  | -     | -     | -     | ۰/۰۲ | -     | -     |
| Mn2+  | -     | ۰/۳۴  | ۰/۱۳  | ۰/۰۳  | -    | ۰/۲۳  | ۰/۰۳  |
| Mg    | ۰/۶۴  | ۹/۱۶  | ۵/۲۷  | ۵/۸۷  | ۰/۶۳ | ۹/۲۲  | ۵/۸۹  |
| Ca    | -     | -     | -     | -     | -    | -     | -     |
| Na    | ۰/۳۳  | -     | -     | -     | ۰/۳۲ | -     | -     |
| K     | ۱/۶۶  | -     | ۱/۸۴  | -     | ۱/۶۷ | -     | -     |
| Total | ۱۳/۹۶ | ۱۹/۸۳ | ۱۵/۵۷ | ۱۳/۹  | ۱۴   | ۱۹/۸۵ | ۱۳/۹  |

جدول ۴ ترکیب‌های شیمیایی پیه مونتیت و گارنت از پیه مونتیت-کوارتز شیست‌های منطقه آسمی گاوا و بس شی.

| منطقه                          | آسمی گاوا  |        |        | بس شی      |       |        |
|--------------------------------|------------|--------|--------|------------|-------|--------|
| شماره نمونه                    | 1510-0     | 1510-0 | 1510-0 | B5-d       | B5-d  | B-5d   |
| نام کانی                       | پیه مونتیت | -      | گارنت  | پیه مونتیت | -     | گارنت  |
| شماره تجزیه                    | ۵۱۱۲       | ۵۲۱۲   | ۲۷     | ۳۹         | ۳۱۰   | ۴۷     |
| مرکز/حاشیه                     | مرکز       | حاشیه  | -      | مرکز       | حاشیه | -      |
| SiO <sub>2</sub>               | ۳۴/۷۴      | ۳۸/۵۵  | ۳۷/۳۹  | ۳۷/۸۹      | ۳۷/۸۹ | ۳۷/۸۳  |
| TiO <sub>2</sub>               | ۰/۱۱       | ۰/۰۷   | ۰/۲۳   | -          | -     | ۰/۱۹   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۲۰/۵۵      | ۱۹/۰۷  | ۱۹/۵۸  | ۲۱/۲۵      | ۲۱/۱۹ | ۲۰/۰۸  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۲/۹        | ۹/۷۸   | ۱/۷۴   | ۸/۸۹       | ۹/۳۱  | ۱/۶۶   |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۱۴/۵۸      | ۱۱/۷۵  | -      | ۷/۰۳       | ۷/۴۲  | -      |
| MnO                            | -          | -      | ۳۶/۹۲  | -          | -     | ۳۴/۷۶  |
| MgO                            | -          | -      | ۰/۷۱   | -          | -     | ۱/۶۲   |
| CaO                            | ۲۲/۹۹      | ۱۹/۸۱  | ۴/۰۸   | ۲۱/۳       | ۲۰/۸۵ | ۴/۵۷   |
| Total                          | ۹۸/۸۷      | ۹۹/۰۳  | ۱۰۰/۶۳ | ۹۶/۳۶      | ۹۶/۶۷ | ۱۰۰/۶۹ |
|                                | O=۱۲/۵     |        | O= ۱۲  | O=۱۲/۵     |       | O= ۱۲  |
| Si                             | ۳/۰۱       | ۳/۰۷   | ۳/۰۴   | ۲/۹۵       | ۲/۹۴  | ۳/۰۲   |
| Ti                             | ۱/۹۴       | ۰/۰۱   | ۰/۰۱   | -          | -     | ۰/۰۱   |
| Al                             | ۰/۱۸       | ۱/۸    | ۱/۸۶   | ۱/۹۵       | ۱/۹۴  | ۱/۸۹   |
| Fe3+                           | ۰/۸۸       | ۰/۵۸   | ۰/۰۹   | ۰/۵۲       | ۰/۵۴  | ۰/۱    |
| Mn3+                           | ۰/۸۸       | ۰/۶۲   | -      | ۰/۴۲       | ۰/۴۴  | -      |
| Mn2+                           | -          | ۰/۰۱   | ۲/۵۵   | -          | -     | ۲/۳۵   |
| Mg                             | -          | -      | ۰/۰۸   | -          | -     | ۰/۱۹   |
| Ca                             | ۱/۹۶       | ۱/۶۹   | ۰/۳۴   | ۱/۷۷       | ۱/۷۳  | ۰/۳۹   |
| Total                          | ۷/۹۸       | ۷/۷۸   | ۷/۹۷   | ۷/۶۱       | ۷/۵۹  | ۷/۹۷   |

آلیت به صورت پورفیرو و پویی کیلوبلاست مشاهده می‌شود و حاوی مقادیر زیادی میانبار از انواع همتایت، تالک، فنزیت، آمفیبول، پیه مونیت و کوارتز است. همتایت هم به صورت یک فاز در زمینه و هم به صورت میانبار در داخل پورفیروبلاستهای گارنت و آلیت دیده می‌شود و میانگین ترکیب شیمیایی آن به صورت  $(\text{Fe}_{1/9}\text{Mn}_{1/8}\text{Ti}_{1/1})\text{O}_3$  است. برونیت نیز در زمینه و نیز به صورت میانبار در داخل گارنت مشاهده می‌شود. برونیت‌ها معمولاً از نظر شیمیایی یکنواخت بوده و ترکیب آنها بین دو منطقه آسمی گاوا و بس شی تغییر چندانی نمی‌کند. میانگین ترکیب شیمیایی برونیت به صورت  $(\text{Fe}_{1/9}\text{Mn}_{1/8}\text{Ti}_{1/1})(\text{Mn}^{+3}_{5/7}\text{Fe}^{+3}_{2/9})\text{SiO}_{12}$  است. برای جزئیات بیشتر در سنگ‌نگاشتی، ترکیبات شیمیایی، ارتباطات فازی و مطالعات سنگ‌شناسی پیه مونیت - کوارتز شیست‌های نوارسانباگاوا مراجع [۳، ۱۹ و ۲۲] را ببینید.

### ترکیب شیمیایی و خصوصیات نوری آمفیبول‌های سدیک و سدیک - کلسیک بی رنگ

آمفیبول‌های سدیک بی رنگ تقریباً در تمامی نمونه‌های مطالعه شده از هر دو منطقه آسمی - گاوا و بس شی مشاهده می‌شوند. اما نحوه حضور، میزان فراوانی، و ترکیب شیمیایی آنها در دو منطقه کاملاً متفاوت است. در نمونه‌های متعلق به منطقه آسمی گاوا آمفیبول‌های بی رنگ فقط به صورت میانبار در داخل پورفیروبلاست‌های آلیت و گارنت مشاهده می‌شوند (شکل ۲). این آمفیبول‌ها از نظر شیمیایی یکنواخت بوده و ترکیب شیمیایی آنها در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

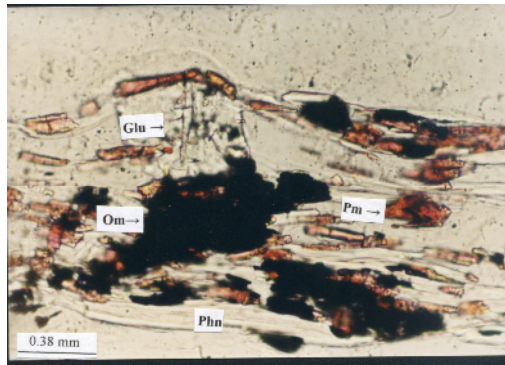
برای نامگذاری آمفیبول‌ها از روش لیک و همکاران [۲۳] استفاده شد. به دلیل وجود فوگاسیت اکسیژن بالا هنگام تشکیل آمفیبول، تمام آهن به صورت  $\text{Fe}^{+3}$  در نظر گرفته شده است. بر این اساس چون مقدار  $\text{Na}_B \geq 1/50$  است لذا آمفیبول‌های بی رنگ منطقه آسمی گاوا در گروه آمفیبول‌های سدیک منظور می‌شوند و با توجه به متغیرهای دیگر که عبارتند از  $\text{Si} = 8$  و  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) = 1$ ،  $(\text{Na} + \text{k})_A < 0.50$ ،  $\text{Al}^{\text{VI}} > \text{Fe}^{3+}$  منطقه آسمی گاوا از نوع گلوکوفان هستند (جدول ۳). در حالیکه آمفیبول‌های بی رنگ منطقه بس شی به عنوان یک فاز نسبتاً فراوان با شکل منشوری در زمینه سنگ مشاهده می‌شوند (شکل ۳ و ۴)، مطابق نامگذاری لیک و همکاران [۲۳] چون  $0.5 < \text{Na}_B < 1/5$  و  $(\text{Ca} + \text{Na})_B \geq 1$  است لذا آمفیبول‌های بی رنگ منطقه بس شی در گروه آمفیبول‌های سدیک - کلسیک قرار می‌گیرند. نام یک آمفیبول از منطقه بس شی در جدول ۵ با در نظر گرفتن مقادیر متغیرهایی چون  $(\text{Na} + \text{k})_A < 0.50$ ،  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) = 1$  و  $\text{Si} = 7.473$  باروسیت تعیین می‌شود. نمونه دیگر منطقه بس شی ذکر شده در جدول ۳ با توجه به متغیرهای  $(\text{Na} + \text{k})_A > 0.50$ ،  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) = 1$  و  $\text{Si} = 7.168$  مگنزیوکاتوفوریت است. با وجود همزیستی آمفیبول‌های بی رنگ با کانی‌های غنی از منگنز، آمفیبول‌های بی رنگ مربوط به هر دو منطقه حاوی مقادیر کمی منگنز هستند (جدول ۵).

جدول ۵ ترکیب های شیمیایی آمفیبول های سدیک و سدیک-کلسیک بی رنگ از پیه مونتیت-کوارتز شیست های آسمی گاوا و بس شی و آمفیبول های سدیک و سدیک-کلسیک رنگی از اپیدوت-کوارتز شیست های گارنت زون و آلبیت - بیوتیت زون سانباگاوا. دادهای آمفیبول های رنگی از مرجع [ ۲۴ ] نقل شده اند.

| منطقه                          | آسمی گاوا |          |          |         | بس شی   |                 |        |         |
|--------------------------------|-----------|----------|----------|---------|---------|-----------------|--------|---------|
|                                | 1510-0    | 1510-0   | As62     | As62    | B5-d    | B5-d            | YB154  | YB154   |
| شماره نمونه                    | 1510-0    | 1510-0   | As62     | As62    | B5-d    | B5-d            | YB154  | YB154   |
| نام کانی                       | گلوکوفان  | گلوکوفان | گلوکوفان | باروسیت | باروسیت | مگنزیوکاتوفوریت | وینچیت | باروسیت |
| شماره تجزیه                    | ۷۳۹       | ۸۳۹      | -        | -       | ۱۸      | ۲۱۱             | -      | -       |
| مرکز/حاشیه                     | -         | -        | مرکز     | حاشیه   | -       | -               | مرکز   | حاشیه   |
| SiO <sub>2</sub>               | ۵۹/۱۷     | ۶۰/۱۶    | ۵۷/۰     | ۵۱/۰    | ۵۴/۱۰   | ۵۱/۹۹           | ۵۴/۰   | ۴۵/۷۰   |
| TiO <sub>2</sub>               | ۰/۰۳      | ۰/۰۷     | ۰/۰۱     | ۰/۰۵    | -       | -               | ۰/۰۷   | ۰/۹۸    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۷/۱۹      | ۹/۴۳     | ۶/۸۸     | ۵/۸۵    | ۶/۴۸    | ۸/۶۷            | ۲/۹۴   | ۱۳/۱۰   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۷/۱۹      | ۵/۹۲     | -        | -       | ۷/۲۳    | ۷/۲۸            | -      | -       |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۰/۳۱      | ۰/۵۹     | -        | -       | ۱/۵۵    | ۰/۱۴            | -      | -       |
| FeO                            | -         | -        | ۱۱/۶۰    | ۱۵/۵۰   | -       | -               | ۲۰/۳۰  | ۱۷/۷۰   |
| MnO                            | -         | -        | ۰/۴۲     | ۰/۹۱    | -       | -               | ۰/۲۶   | ۰/۳۸    |
| MgO                            | ۱۴/۶۹     | ۱۲/۷۷    | ۱۲/۵۰    | ۱۲/۸۰   | ۱۷/۶۹   | ۱۷/۴۹           | ۱۰/۵۰  | ۸/۳۴    |
| CaO                            | ۰/۵۹      | ۰/۶۰     | ۰/۸۲     | ۶/۴۰    | ۵/۵۸    | ۶/۸۰            | ۴/۵۱   | ۶/۴۲    |
| Na <sub>2</sub> O              | ۷/۰       | ۷/۸۶     | ۷/۰۴     | ۴/۲۶    | ۵/۱۷    | ۵/۸۰            | ۴/۹۴   | ۵/۰۴    |
| K <sub>2</sub> O               | ۰/۰۵      | ۰/۰۳     | ۰/۰      | ۰/۱۸    | -       | ۰/۲۵            | ۰/۰۷   | ۰/۵۷    |
| Total                          | ۹۶/۲۲     | ۹۷/۴۳    | ۹۶/۲۷    | ۹۷/۰    | ۹۷/۸۰   | ۹۸/۴۲           | ۹۸/۰   | ۹۸/۲۳   |
|                                | O=۲۳      | O=۲۳     | O=۲۳     | O=۲۳    | O=۲۳    | O=۲۳            | O=۲۳   | O=۲۳    |
| Si                             | ۸/۰۵      | ۸/۰۵     | ۷/۹۰     | ۷/۳۱    | ۷/۴۵    | ۷/۱۷            | ۷/۹۴   | ۶/۶۸    |
| Al <sup>IV</sup>               | -         | -        | ۰/۱۰     | ۰/۶۹    | ۰/۵۵    | ۰/۵۸            | ۰/۲۱   | ۱/۳۲    |
| Al <sup>VI</sup>               | ۱/۱۵      | ۱/۴۹     | ۱/۰۳     | ۰/۳۰    | ۰/۵۰    | ۰/۵۸            | ۰/۲۹   | ۰/۹۳    |
| Ti                             | ۰/۰       | ۰/۰۱     | ۰/۰      | ۰/۰۱    | -       | -               | ۰/۰    | ۰/۰۴    |
| Fe <sup>3+</sup>               | ۰/۷۴      | ۰/۶۰     | ۰/۹۴     | ۱/۲۱    | ۰/۷۵    | ۰/۷۵            | ۱/۱۴   | ۰/۷۶    |
| Mn <sup>3+</sup>               | ۰/۰۳      | ۰/۰۶     | -        | -       | ۰/۱۶    | ۰/۰۲            | -      | -       |
| Fe <sup>2+</sup>               | -         | -        | ۰/۴۰     | ۰/۶۵    | -       | -               | ۱/۲۹   | ۱/۴۰    |
| Mn <sup>2+</sup>               | -         | -        | ۰/۰۵     | ۰/۱۱    | -       | -               | ۰/۰۳   | ۰/۰۵    |
| Mg                             | ۲/۹۸      | ۲/۵۹     | ۲/۵۸     | ۲/۷۳    | ۳/۶۳    | ۳/۵۹            | ۲/۸۴   | ۱/۸۲    |
| Ca                             | ۰/۰۸      | ۰/۰۹     | ۰/۱۲     | ۰/۹۸    | ۰/۸۲    | ۱/۰             | ۰/۶۹   | ۱/۰     |
| Na                             | ۱/۸۵      | ۲/۰۴     | ۱/۸۹     | ۱/۱۸    | ۱/۳۸    | ۱/۵۵            | ۱/۳۷   | ۱/۴۳    |
| K                              | ۰/۰۱      | ۰/۰۱     | ۰/۰      | ۰/۰۳    | -       | ۰/۰۴            | ۰/۰۱   | ۰/۱۰    |
| Total                          | ۱۴/۸۹     | ۱۴/۹۴    | ۱۵/۰۱    | ۱۵/۲۰   | ۱۵/۲۴   | ۱۵/۲۸           | ۱۵/۸۱  | ۱۵/۵۵   |

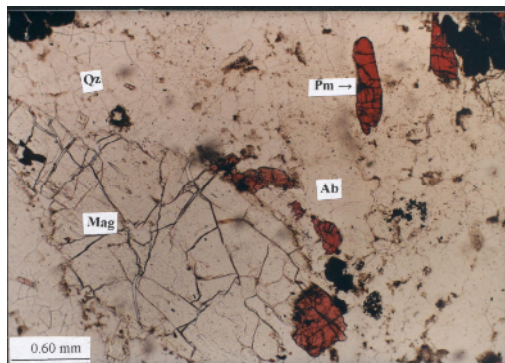
به این دلیل که فوگاسیتئ اکسیژن، ترکیب شیمیایی سنگ مادر، و مجموعه کانیهای همزیست در پیه مونتیت- کوارتز شیست های منطقه آسمی گاوا و بس شی با یکدیگر متشابه-

اند، تنها عاملی که باعث تفاوت میان ترکیب شیمیایی آمفیبول‌های بی رنگ و سایر کانیهای همزیست بین دو منطقه می‌شود مربوط به اختلاف درجه دگرگونی است [۳، ۱۹ و ۲۲]. مشابه این روند در آمفیبول‌های انواع دیگر شیست‌های سانباگوا نیز گزارش شده‌اند [۲۳ و ۲۴].



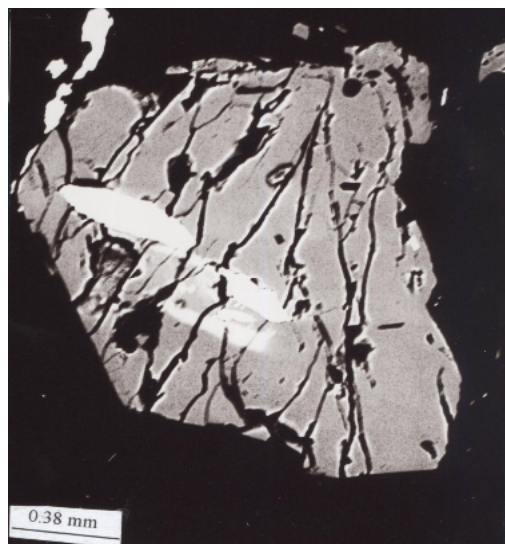
شکل ۲ تصویر میکروسکوپی از گلوکوفان بی‌رنگ که به صورت میانبار داخل پورفیرو بلاست آلبيت دیده می‌شود. نمونه یک پیه‌مونیت-کوارتز شیست متعلق به منطقه آسمی گاواست (نمونه شماره ۱۵۱۰-۰).

Pm: پیه‌مونیت، Phn: فنژیت، Om: کانیهای اپک، Glu: گلوکوفان.



شکل ۳ تصویر میکروسکوپی از مگنزیو کاتوفوریت بی‌رنگ متعلق به یک پیه‌مونیت-کوارتز شیست از منطقه بس‌شی (نمونه شماره B5-d).

Pm: پیه‌مونیت، Qz: کوارتز، Mag: مگنزیو کاتوفوریت، Ab: آلبيت.



شکل ۴ تصویر پس‌پراکندگی میکروسکوپ الکترونی از یک مگنزیو کاتوفوریت بی‌رنگ متعلق به یک پیه‌مونیت - کوارتز شیست از منطقه بس‌شی (نمونه شماره B5-d).

برای مقایسه ترکیب شیمیایی آمفیبول های بی رنگ در پیه مونتیت - کوارتز شیست های سانباگاوا، نمونه هایی از کوارتز شیست های فاقد پیه مونتیت اما دارای اپیدوت در همان درجه دگرگونی از دو منطقه آسمی گاوا و بس شی نیز برداشت شدند. لایه های اپیدوت - کوارتز شیست به صورت هم شیب با مرز کاملاً مشخص با پیه مونتیت - کوارتز شیست ها دیده می شوند. همه نمونه ها دارای آمفیبول های سدیک و سدیک - کلسیک رنگی بود که ویژگی های نوری و شیمیایی آنها برای مقایسه با آمفیبول های کاملاً بی رنگ سدیک و سدیک - کلسیک مورد استفاده قرار گرفت. بیان دقیق ترکیب شیمیایی و ارتباطات فازی اپیدوت - کوارتز شیست ها مورد بحث این مقاله نیست و فقط ویژگی های شیمیایی و نوری آمفیبول های رنگی آنها برای مقایسه با آمفیبول های کاملاً بی رنگ در پیه مونتیت - کوارتز شیست ها آورده شده اند. علاقمندان به جزئیات مرتبط با اپیدوت - کوارتز شیست های نوارسانباگاوا می توانند به مرجع شماره [۲۴] مراجعه کنند. اپیدوت - کوارتز شیست های سانباگاوا در منطقه شیکوکوی مرکزی دارای مجموعه کانایی گارنت، آمفیبول، اپیدوت، کلریت، فنزیت، آلبیت، کوارتز، و هماتیت اند.

آمفیبول های همراه با اپیدوت - کوارتز شیست همگی رنگین بوده و دارای فراوانی بیشتری نسبت به آمفیبول های بی رنگ در پیه مونتیت - کوارتز شیست ها هستند. این آمفیبول ها هم در زمینه سنگ و هم به صورت میانبار در پورفایروبلست های آلبیت وجود دارند. عموماً این آمفیبول ها دارای ساختار منطقه بندی شیمیایی نیز هستند.

در جدول ۵ ترکیب شیمیایی آمفیبول های رنگی از اپیدوت - کوارتز شیست ها در منطقه شیکوکوی مرکزی از زون های دگرگونی گارنت و آلبیت - بیوتیت که همان زون های دگرگونی پیه مونتیت - کوارتز شیست ها هستند، انتخاب شده اند. نسبت  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  در آمفیبول های موجود در اپیدوت - کوارتز شیست ها بر اساس مجموع کاتیون ۱۳ بر مبنای  $O = 23$  محاسبه شده اند با در نظر گرفتن این واقعیت که میزان ( $Fe^{2+}$ ,  $Mn$ ,  $Mg$ ) در موقعیت  $M_{(4)}$  آمفیبول های سنگهای دگرگونی سانباگاوا پائین است [۲۵ و ۲۴]. این آمفیبول ها نیز با استفاده از روش نامگذاری لیک و همکاران [۲۳] نامگذاری شده اند. به این ترتیب آمفیبول های رنگی موجود در اپیدوت - کوارتز شیست ها متعلق به درجه آلبیت - بیوتیت زون عبارتند از آمفیبول های سدیک - کلسیک و ینچیت در مرکز و آمفیبول سدیک - کلسیک مگنزیوکاتوفوریت در حاشیه (جدول ۵). آمفیبول های رنگی موجود در اپیدوت - کوارتز شیست های متعلق به درجه گارنت در منطقه آسمی گاوا در مرکز عبارت است از آمفیبول سدیک از نوع گلوکوفان و در حاشیه آمفیبول سدیک - کلسیک از نوع باروئیسیت (جدول ۵).

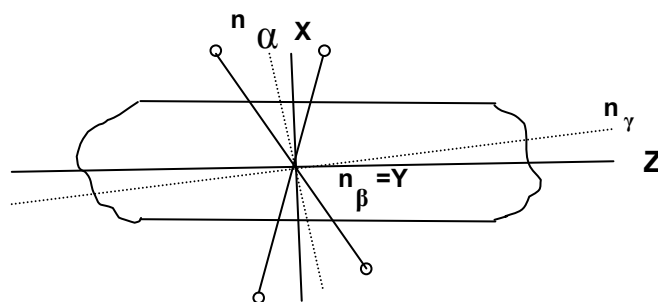
ساختار منطقه بندی شیمیایی مشاهده شده به مسیرهای دگرگونی پیش رونده و پس رونده نوار دگرگونی سانباگاوا نسبت داده شده است [۲۰ و ۲۴]. مشخصات نوری آمفیبول های سدیک و سدیک - کلسیک بی رنگ از پیه مونتیت - کوارتز شیست ها و آمفیبول های سدیک و

سدیک - کلسیک رنگی از اپیدوت - کوارتز شیت‌ها در مناطق آسمی گاوا و بس شی با استفاده از پلاتین یونیور سال فدروف مورد بررسی دقیق قرار گرفتند. آمفیبول‌های موجود در پیه مونتیت - کوارتز شیت در هر دو منطقه آسمی - گاوا و بس شی بی رنگ بوده و فاقد چند رنگی در جهات  $\alpha$ ،  $\beta$ ، و  $\gamma$  هستند. مقدار زاویه خاموشی میان جهات  $\gamma$  و  $Z$  در حدود  $13^\circ$  درجه  $(n_{\gamma \perp Z} = 13)$  است و مقدار زاویه بین دو محور نوری در حدود  $20^\circ$  درجه  $(2V_{(a)} = 20)$  تعیین شد. این آمفیبول‌ها دو محوره منفی بوده و سمتگیری نوری آنها به گونه‌ای است که ضریب شکست  $\beta$  منطبق بر جهت  $Y$  بلورشناسی است (شکل ۵). در حالیکه در آمفیبول‌های بی رنگ منطقه بس شی مقدار زاویه خاموشی بین  $\gamma$  و  $Z$  در حدود  $17^\circ$  درجه  $(n_{\gamma \perp Z} = 17)$  و زاویه بین دو محور نوری در حدود  $25^\circ$  است  $(2V_{(a)} = 25)$ . آمفیبول‌های بی رنگ منطقه بس شی دو محوره منفی بوده و از نظر سمتگیری نوری در آن ضریب شکست  $\beta$  منطبق بر جهت  $Y$  است.

آمفیبول‌های رنگی از اپیدوت - کوارتز شیت‌های منطقه آسمی گاوا دارای مشخصات نوری زیرند: چند رنگی واضح (سبز متمایل به زرد  $\alpha$ ، سبز متمایل به آبی  $\beta$  و آبی متمایل به سبز  $\gamma$ )، زاویه خاموشی بین جهات  $\gamma$  و  $Z$  بین  $20^\circ$  تا  $24^\circ$  درجه  $(n_{\gamma \perp Z} = 20 - 24)$ ، دو محوره منفی با زاویه بین دو محور نوری متغیر بین  $45^\circ$  تا  $48^\circ$  درجه  $(2V_{(a)} = 45 - 48)$  و از نظر سمتگیری نوری  $\beta$  منطبق بر  $Y$  است. مشخصات نوری آمفیبول‌های رنگی از اپیدوت - کوارتز شیت‌های منطقه بس شی بشرح زیرند:

چند رنگی (سبز متمایل به زرد  $\alpha$  و سبز  $\beta$  و سبز متمایل به آبی  $\gamma$ )، زاویه خاموشی بین جهات  $\gamma$  و  $Z$  بین  $30^\circ$  تا  $35^\circ$  درجه  $(n_{\gamma \perp Z} = 30 - 35)$ ، دو محوره منفی با زاویه بین دو محور نوری متغیر بین  $50^\circ$  تا  $55^\circ$  درجه  $(2V_{(a)} = 50 - 55)$  و از نظر سمتگیری نوری  $\beta$  منطبق بر  $Y$  است.

چنانکه مشاهده می‌شود تفاوت‌های آشکاری از نظر خصوصیات نوری بین آمفیبول‌های بی رنگ و آمفیبول‌های رنگی حتی در یک درجه دگرگونی وجود دارد. این تفاوت‌ها علاوه بر تفاوت شاخص چند رنگی مربوط به زاویه خاموشی و زاویه بین دو محور نوری کمتر در آمفیبول‌های بی رنگ است.



**شکل ۵** سمتگیری نوری آمفیبول‌های سدیک و سدیک-کلسیک بی رنگ.  $X, Y, Z$  = جهات‌های بلورشناسی،  $n_\alpha, n_\beta, n_\gamma$  = ضرایب شکست نوری،  $0$  = جهت محورهای نوری.

## چگونگی تشکیل آمفیبول های سدیک و سدیک - کلسیک بی رنگ

آنچه که می توان گفت، آمفیبول های بی رنگ موجود در پیه مونتیت - کوارتز شیست ها و آمفیبول های رنگی موجود در اپیدوت - کوارتز شیست ها در شرایط مشابه دگرگونی از نظر دما و فشار تشکیل شده اند به این دلیل است که هر دو از یک درجه دگرگونی برداشت شده اند که عبارتند از زون گارنت در منطقه آسمی گاوا را و زون دگرگونی بالاتر آلبیت - بیوتیت در منطقه بس شی. بنابراین اگر آمفیبول های بی رنگ و رنگی هر زون دگرگونی را به طور جداگانه در نظر بگیریم این امکان وجود خواهد داشت که دو متغیر مهم دگرگونی دما - فشار را در تشکیل این آمفیبول ها ثابت فرض کنیم. مقایسه مجموعه کانیهای همزیست پیه مونتیت - کوارتز شیست و اپیدوت - کوارتز شیست نشان می دهد که دو متغیر مهم دیگر دگرگونی یعنی فوگاسیته اکسیژن و ترکیب شیمیایی سنگ مادر در تشکیل آمفیبول های سدیک و سدیک - کلسیک بی رنگ دخالت داشته اند.

برای شناسائی تأثیر فوگاسیته اکسیژن می توان از ترکیب شیمیایی فازهای همراه و همزیست با آمفیبول های بی رنگ استفاده کرد. در پیه مونتیت - کوارتز شیست ها، منگنز به هر دو صورت  $Mn^{3+}$  و  $Mn^{2+}$  وجود دارد. بیشترین مقدار منگنز سه ظرفیتی در ساختار پیه مونتیت وجود دارد و مقدار باقیمانده آن جذب ساختار برونیت شده است. منگنز دو ظرفیتی در ساختار اسپسارتین گارنت بکار گرفته شده است و مقدار باقیمانده جهت تشکیل برونیت به کار رفته است (جدول ۴). آهن نیز علاوه بر منگنز از عناصر حساس به تغییرات فوگاسیته اکسیژن است. نکته جالب اینکه آهن فقط به صورت سه ظرفیتی  $Fe^{3+}$  در این شیست ها موجود بوده که بخش عمده آن در هماتیت مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر کمتری از  $Fe^{3+}$  در ساختار اسپسارتین گارنت (به صورت عضونهای اندرادیست) و مقداری نیز در ساختار پیه مونتیت (به صورت عضو نهایی پیستاسیت) وارد شده اند. این امر موجب شده است که آهن در ترکیب سایر کانیها از جمله کلریت، تالک، فنزیت و آمفیبول یا وارد نشده و یا به صورت درصد های بسیار کم بصورت سه ظرفیتی در آمده است. بنحویکه تقریباً تمام آنها را می توان غنی از منیزیم نامید (جدول ۳ و ۵). در مقابل منگنز در اپیدوت - کوارتز شیست ها فقط به صورت منگنز دو ظرفیتی ( $Mn^{2+}$ ) در ساختمان گارنت دیده می شود. آهن هم به صورت دو ظرفیتی ( $Fe^{2+}$ ) و هم به صورت سه ظرفیتی ( $Fe^{3+}$ ) در این شیست ها وجود دارد. آهن دو ظرفیتی بیشتر در ساختار کلریت، آمفیبول و فنزیت وارد شده اند در حالیکه آهن سه ظرفیتی بیشتر در ساختمان هماتیت، گارنت و اپیدوت یافت می شوند (جدول ۵).

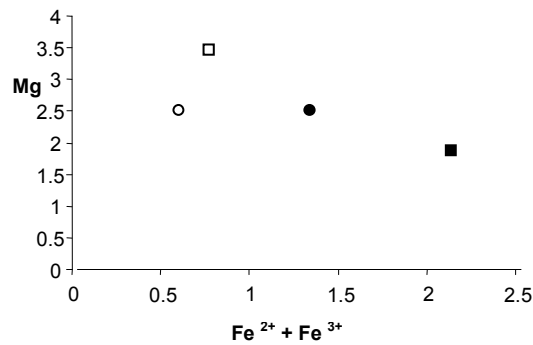
چوپین [۲۷] معتقد است که اگر منگنز بیشتر به صورت سه ظرفیتی در ساختار پیه مونتیت و برونیت و به صورت دو ظرفیتی در ساختار اسپسارتین گارنت وجود داشته باشد و نیز آهن فقط به صورت سه ظرفیتی و بیشتر در فاز با اهمیت هماتیت یافت شود، آن مجموعه اکسید شده است. وی همچنین اشاره می کند که اگر منگنز فقط به صورت دو ظرفیتی در کانیهای همچون گارنت وجود داشته باشد آن مجموعه احیاء شده است. بنابراین پیه مونتیت - کوارتز شیست ها یک مجموعه اکسیدان در نظر گرفته شده اند در حالیکه اپیدوت - کوارتز

شیست‌ها یک مجموعهٔ احیاء شده‌اند. مقایسهٔ ترکیب شیمیایی آمفیبول‌های بی رنگ و رنگی (شکل ۶ و جدول ۵) متعلق به یک زون دگرگونی به وضوح نشان می‌دهد که تفاوت اصلی میان ترکیب شیمیایی این دو گروه مربوط است به افزایش آهن دو و سه ظرفیتی و کاهش مقدار منیزیم در ساختار آمفیبول‌های رنگی. نتایج مطالعات تجربی در مورد آمفیبول‌ها نیز نشان می‌دهد که با افزایش فوگاسیتهٔ اکسیژن نسبت  $Fe/(Fe+Mg)$  به طور چشمگیری کاهش می‌یابد [۲۸] که در تطابق آشکاری با نسبت مشاهده شده در مورد آمفیبول‌های بی‌رنگ و رنگی است. در واقع عامل اصلی تشکیل آمفیبول‌های سدی و سدی - کلسیک بی‌رنگ، وجود فوگاسیتهٔ اکسیژن بسیار بالاست. این فوگاسیتهٔ اکسیژن در حدی بوده است که در آن شرایط بخش عمدهٔ منگنز به صورت سه ظرفیتی و تمام آهن به صورت سه ظرفیتی وجود داشته‌اند، به گونهٔ ای که تقریباً تمام آهن وارد ساختار هماتیت شده است. در واقع می‌توان گفت که تحت شرایط فوگاسیتهٔ اکسیژن بالا، آمفیبول‌های غنی از منیزیم و فقیر از آهن تشکیل شده است که همین امر موجب تغییر خصوصیات نوری از جمله بی رنگی، زاویهٔ خاموشی و زاویهٔ بین دو محور نوری شده است (شکل ۶ و ۷). به نظر می‌رسد که شرایط فوگاسیتهٔ اکسیژن بالا در پیه مونتیت - کوارتز شیست‌ها ناشی از تأثیر سنگ مادر باشد تا تغییرات فوگاسیتهٔ اکسیژن در حین دگرگونی. دلایل این نظر به شرح زیر است:

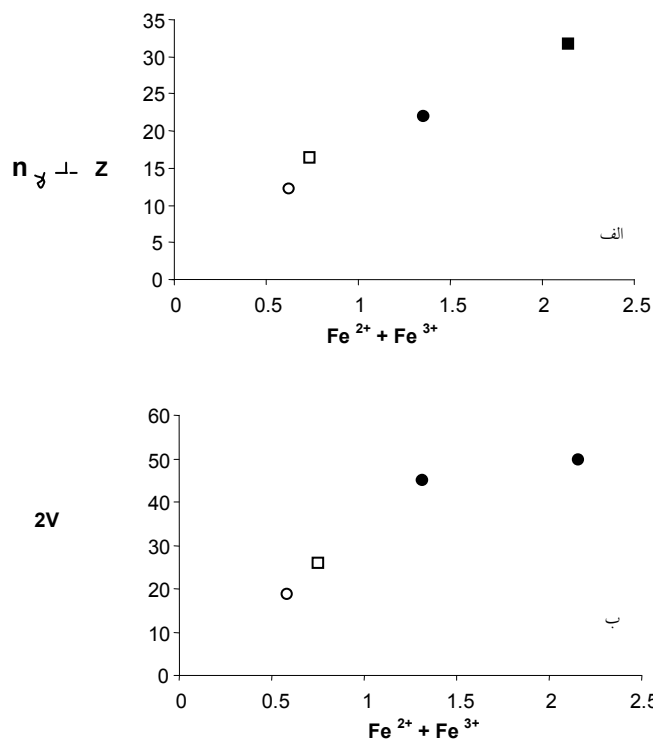
(الف) لایه‌های پیه مونتیت - کوارتز شیست و اپیدوت کوارتز شیست به صورت هم‌شیب و حتی گاهی در مقیاس سانتی متری به صورت بین لایه‌ای واقع شده‌اند. این نشان می‌دهد که هر دو در شرایط یکسانی در زون فروورانش وارد شده و دگرگون شده‌اند. لذا فوگاسیتهٔ اکسیژن ناشی از دگرگونی به عنوان یک عامل خارجی در شرایط یکسان نمی‌تواند در چنین مقیاسی تغییرات بسیار زیادی داشته باشد.

(ب) میانبارهای پیه مونتیت و هماتیت به عنوان دو کانی حساس به تغییرات شرایط فوگاسیتهٔ اکسیژن در مرکز و حاشیهٔ پورفایروپلاست‌های گارنت و آلبیت واقع شده‌اند، نیز در زمینهٔ سنگ نیز با همان ترکیب دیده می‌شوند. لذا از آغاز تا انتهای دگرگونی تغییر واضحی در شرایط فوگاسیتهٔ اکسیژن حاصل نشده است، و در همهٔ زمان دگرگونی فوگاسیتهٔ اکسیژن بسیار بالا بوده است.

ایزدیار و همکاران [۲۲] در مطالعات ژئوشیمیایی سنگ مادر پیه مونتیت - کوارتز شیست‌ها نشان دادند که چهار فرایند در شکل‌گیری سنگ منشأ آنها دخالت داشته‌اند که عبارتند از: منشأ تخریبی (آورندهٔ عناصری نظیر  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $TiO_2$ )، منشأ زیستی (آورندهٔ عناصری نظیر  $CaO$ ,  $SiO_2$ ) و منشأ گرمایی (آورندهٔ اصلی  $MnO$ ). در واقع پیه - مونتیت - کوارتز شیست‌های نوارسانباگوا معادل دگرگونی ترکیب ته نشستهای پلاژیک مناطق عمیق اقیانوسی، سیلیس و  $CaO$  با منشأ زیستی و گرهمکهای اکسید منگنز با منشأ گرمایی هستند. بسیاری از محققین نشان داده‌اند که معادل امروزی چنین ته نشستهایی در شرایط اکسیدان بالا تشکیل می‌شوند [۲ و ۲۹].



شکل ۶ نمودار  $Mg / Fe^{2+} + Fe^{3+}$  برای آمفیبول های سدیک و سدیک - کلسیک بی رنگ و رنگی زون های گارنت و آلبیت - بیوتیت. ○ = گلوکوفان بی رنگ زون گارنت؛ ● = گلوکوفان رنگی زون گارنت، □ = مگنزیوکاتوفوریت و باروسیت بی رنگ زون آلبیت - بیوتیت، ■ = مگنزیوکاتوفوریت و باروسیت رنگی زون آلبیت - بیوتیت.



شکل ۷ نمودارهای زاویه خاموشی ( $2V$ ) و زاویه بین دو محور نوری ( $2V_a$ ) در مقابل  $Fe^{2+} + Fe^{3+}$  برای آمفیبول های سدیک و سدیک - کلسیک بی رنگ و رنگی زون های گارنت و آلبیت - بیوتیت. ○ = گلوکوفان بی رنگ زون گارنت، ● = گلوکوفان رنگی زون گارنت، □ = مگنزیوکاتوفوریت و باروسیت بی رنگ زون آلبیت - بیوتیت، ■ = مگنزیوکاتوفوریت و باروسیت رنگی زون آلبیت - بیوتیت.

## برداشت

۱- آمفیبول‌های سدیک و سدیک - کلسیک بی رنگ در پیه مونیت - کوارتز شیست‌های سانباگاوا و آمفیبول‌های سدیک و سدیک - کلسیک رنگی در اپیدوت - کوارتز شیست‌های سانباگاوا در منطقه شیکوکوی مرکزی ژاپن وجود دارند.

۲- نتایج مطالعات تجزیه شیمیایی با استفاده از الکترون مایکروپروب نشان می‌دهد که آمفیبول‌های بی رنگ منطقه آسمی گاوا واقع در زون گارنت از نوع گلوکوفان و آمفیبول‌های بی‌رنگ منطقه بس شی واقع در زون آلبیت - بیوتیت از نوع بارویسیت و مگنزیوکاتوفوریت هستند.

۳- مشخصات نوری آمفیبول‌های سدیک و سدیک - کلسیک بی رنگ عبارتند از گلوکوفان بی رنگ منطقه آسمی گاوا فاقد چند رنگی در جهات  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$ ،  $n_{\gamma\perp Z} = 1.3$ ،  $2V_{(\alpha)} = 20$  و  $\beta = Y$ ، مگنزیوکاتوفوریت بی رنگ منطقه بس شی فاقد چند رنگی در جهات  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$ ،  $n_{\gamma\perp Z} = 1.7$  و  $2V_{(\alpha)} = 25$ ،  $\beta = Y$ .

۴- تفاوت اساسی میان ترکیب شیمیایی آمفیبول‌های بی رنگ و رنگی متعلق به یک زون دگرگونی مربوط به افزایش مقدار آهن دو و سه ظرفیتی و کاهش مقدار منیزیم در آمفیبول‌های رنگی است.

۵- حضور منگنز به صورت سه ظرفیتی در ساختار پیه مونیت و برونیت و به صورت دو ظرفیتی در ساختار اسپسارتین گارنت و نیز حضور آهن تماماً به صورت سه ظرفیتی بیشتر در ساختار همتایت نشان می‌دهد که پیه مونیت - کوارتز شیست‌ها بنا بر تعریف چاپین [۲۷] مجموعه‌هایی اکسیده شده‌اند. در حالیکه وجود منگنز تنها به صورت دو ظرفیتی در گارنت و وجود آهن به صورت دو و سه ظرفیتی در کانیهای همراه نظیر کلریت و فنژیت در اپیدوت - کوارتز شیست‌ها نشان می‌دهد که این سنگها در شرایط احیاء نسبت به پیه مونیت - کوارتز شیست‌ها تشکیل شده‌اند.

۶- عامل اصلی تشکیل آمفیبول‌های بی رنگ سدیک و سدیک - کلسیک در پیه مونیت - کوارتز شیست‌ها مربوط به شرایط فوگاسیته اکسیژن بسیار بالا هنگام دگرگونی بوده است که باعث شده آمفیبول‌های سدیک و سدیک - کلسیک غنی از منیزیم بی رنگ تشکیل شود.

## تشکر و قدردانی

لازم است تشکر فراوان خود را نسبت به وزارت علوم ژاپن در جهت تأمین اعتبارات برای انجام این پژوهش اعلام دارم. از بحث‌های روشن‌گر اساتید گرانقدر Dr. T. و Pro. S. Banno و Hirajima بهره‌های بسیار برده‌ام که نهایت تشکر را از ایشان دارم. از پیشنهاد‌های سازنده داوران محترم مجله در ارائه بهتر مقاله سپاسگزاری می‌شود.

## مراجع

- [1] Reinecke T., "Crystal chemistry and reaction relation of piemontites and thulites from highly oxidized low grade metamorphic rocks at Vitali", Andros Island, Greece, Contribution to Mineralogy and Petrology 93 (1986) 56-76.
- [2] Kawachi Y., Grapes R. H., Coombs D. S., Dowse M., "Mineralogy and petrology of a piemontite-bearing schist, western Otago", New Zealand, Journal of Metamorphic Geology 1 (1983) 353-372.
- [3] Izadyar J., "Chemical composition of piemontites and reaction relations of piemontite and spessartine in piemontite-quartz schists of central Shikoku", Sanbagawa metamorphic belt, Japan, Swiss Bulletin of Mineralogy and Petrology 80 (2000) 199-211.
- [4] Minakawa T., "Study on characteristic mineral assemblages and formation process of metamorphosed manganese ore deposit in the Sanbagawa belt", Meorial of Faculty of Science, Ehime University 1 (1992) 1-74.
- [5] Coombs D. S., Martin D., Grapes R., Kawachi Y., Roser B., "Geochemistry and origin of piemontite-bearing and associated manganiferous schists from Arrow Junction", western Otago, New Zealand, Chemical Geology 48 (1985) 57-78.
- [6] Griffin W. L., Mottana A., "Crystal chemistry of clinopyroxenese from st. Marcel manganese deposit", Vald, saosta, Italy, American Mineralogist 67 (1982) 568-586.
- [7] Mottana A., "Blueschist-facies metamorphism of manganiferous cherts: A review of the alpine occurrences", Geological Society of America memoir 164 (1986) 267-299.
- [8] Deer W. A., Howie R. A., Zussman J., "An introduction to rock forming minerals", Longman Scientific and Technical, 2<sup>nd</sup> edition (1992) P. 549.
- [9] Ernst W. G., "Amphibole phase relations", In Smith J. W. (Ed), Short Course Lecture Notes: Chain Silicates, American Geological Institute (1966) 1-41.
- [10] Veblen D. R., Buseck P. R., "Microstructures and reaction mechanisms in biopyriboles", American Mineralogist 65 (1980) 599-623.
- [11] Miyashiro A., "Evolution of metamorphic belts", Journal of Petrology 2 (1961) 277-311.
- [12] Banno S., Sakai C., "Geology and metamorphic evolution of the Sanbagawa metamorphic belt", Japan. In Dally J.S, Cliff R.A., Yardly B.W.D. (Eds.): Evolution of Metamorphic belts. Geological Society Special Publication 43 (1989) 519-532.
- [13] Wallis S. R., Banno S., "The Sanbagawa belt trends in research", Journal of Metamorphic Geology 8 (1990) 393-399.
- [14] Takasu A., Wallis S. R., Banno S., Dallmeyer R. D., "Evolution of the Sanbagawa metamorphic belt", Japan. Lithos 33 (1994) 119-133.

- [15] Higashino T., *"Biotite zone of Sanbagawa metamorphic terrain in the Siragayama area,"* central Shikoku, Japan, Journal of Geological Society of Japan 81(1975) 653-670.
- [16] Enami M., *"Petrology of pelitic schists in the oligoclase-biotite zone of the Sanbagawa metamorphic terrain, Japan: phase equilibria in the highest grade zone of a high-pressure intermediate type of metamorphic belt,"* Journal of Metamorphic Geology 1 (1983) 141-161.
- [17] Mori K., Kanehira K., *"X-ray energy spectrometry for electron probe analysis,"* Journal of Geological Society of Japan 90 (1984) 271-285.
- [18] Hirajima T., Banno S., *"Electron-microprobe analysis of rock forming minerals with Kevex delta IV(Quantum detector),"* Hitachi Scientific Instrument News 34 (1991)2-7.
- [19] Izadyar J., Hirajima T., Nakamura D., *"Talc-phengite-albite assemblage in piemontite- quartz schists of the Sanbagawa metamorphic belt,"* central Shikoku, Japan, Island Arc 9 (2000) 145-158.
- [20] Radvanec M., Banno S., Okamoto K., *"Multiple stages of phengite formation in Sanbagawa schists,"* Mineralogy and Petrology 51 (1994) 37-48.
- [21] Smith D., Albee A., *"Petrology of a piemontite-bearing gneiss, San Gorgonio Pass,"* California. Contribution to Mineralogy and Petrology 16 (1967) 189-203.
- [22] Izadyar J., Tomita K., Shinjoe H., *"Geochemistry and origin of piemontite-quartz schists in the Sanbagawa Metamorphic belt,"* central Shikoku, Japan, Journal of Asian Earth Sciences 21 (2003) 711-730.
- [23] Leak B., Maresh W.V., Nickel E.H., et al., *"Nomenclature of amphiboles,"* Mineralogical Magazine 61 (1997) 296-311.
- [24] Nakamura C., Enami M., *"Prograde amphiboles in hematite-bearing basic and quartz schists in the Sanbagawa belt,"* central Shikoku: relation between metamorphic field gradient and P-T paths of individual rocks, Journal of Metamorphic Geology 12 (1994) 841- 84.
- [25] Banno S., *"Petrologic studies of the Sanbagwa crystalline schists in the Bessi-Ino district,"* central Shikoku, Japan, Journal of the Faculty of Science, University of Tokyo, Section II 15 (1964) 203-319.
- [26] Otsuki M., Banno S., *"Prograde and retrograde metamorphism of hematite-bearing basic schists in the Sanbagawa belt in central Shikoku,"* Journal of Metamorphic Geology 8 (1990) 425-439.
- [27] Chopin C., *"Les paragenèses réduites ou oxydées de concentrations manganésifères des schistes lustrés de Haute-Maurienne (Alpes françaises),"* Bulletin Minéralogique 101 (1978) 514-531.
- [28] Spear F. S., *"An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibolite,"* American Journal of Science 281 (1981) 697-734.
- [29] Burdige D. J., Gieskes J. M., *"A pore water/solid diagenetic model for manganese in marine sediments,"* American Journal of Science 283 (1983) 29-47.