



Plastic deformation of quartz in quartzite and quartz veins of Khoy ophiolitic massif, NW of Iran

M. Rahgoshay, I. Monsef, H. Shafaii Moghadam

Earth Sciences Faculty, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran

E-mail: m-rahgoshay@sbu.ac.ir

(Received: 6/9/2004, received in revised form: 21/1/2005)

Abstract: In Khoy ophiolitic massif (NW of Iran) three types of quartzite and also quartz bearing veins can be distinguished: massive quartzite, quartz bearing veins in the amphibolites and siliceous veins in the radiolarian cherts. Massive quartzites contain quartz porphyroclasts associated with very small- deformed quartz neoblasts. These quartzites are deformed in regime I and recrystallized as grains bulging. Siliceous veins in the cherts have Cu-carbonate impregnations in the field. Very large grains of quartz with well-developed triple point junctions can be distinguished in thin section. Their pattern of c-axes distributions doesn't show any special orientation. The pattern of c-axes distributions in the quartz bearing veins in the amphibolites is consistent with prism and rhomb slip system along $\langle a \rangle$ direction. Water in these veins is at the origin of soluble structures and precipitation of clay minerals. SEM analysis on the soluble fovea as the result of water operation has revealed high amount of water.

Keywords: *Deformation regime, Recrystallization, LPO, SPO, Slip System, SEM.*



بررسی تغییر شکل پلاستیکی کوارتز در کوارتزیت و رگه‌های کوارتزی مجموعه افیولیتی خوی - شمال غرب ایران

محمد رهگشای، ایمان منصف، هادی شفائی مقدم

دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران.

پست الکترونیکی: m-rahgoshay@sbu.ac.ir E-mail

(دریافت مقاله ۸۳/۶/۱۵، دریافت نسخه نهایی ۸۳/۱۱/۱)

چکیده: در مجموعه افیولیتی خوی (شمال غرب ایران) سه نوع کوارتزیت به همراه رگه‌های سیلیسی قابل تشخیص‌اند: کوارتزیت‌های توده‌ای، رگه‌های سیلیسی موجود در آمفیبولیت‌ها و رگه‌های سیلیسی موجود در چرت‌های رادیولردار. کوارتزیت‌های توده‌ای از پورفایروکلاست‌های کوارتز به همراه نئوبلاست‌های تغییرشکل‌یافته و بسیار کوچک کوارتز تشکیل شده‌اند. این کوارتزیت‌ها نشان دهنده رژیم I تغییر شکلی و تبلور مجدد با تورم دانه‌ها هستند. رگه‌های سیلیسی موجود در چرت‌ها دارای آلودگی‌هایی از کربنات مس بوده و در مقطع نازک می‌توان دانه‌های بسیار درشت کوارتز با پیوندگاه نقاط سه‌گانه خوب توسعه یافته را مشاهده کرد. الگوی پراکندگی محور c آنها دارای سمتگیری خاصی نیست. الگوی پراکندگی محورهای c در رگه‌های کوارتزی موجود در آمفیبولیت‌ها با سیستم لغزشی لوزی‌رخ و منشوری در راستای محور $\langle a \rangle$ همخوانی دارد. عملکرد آب در رگه‌های کوارتزی باعث ایجاد ساختارهای انحلالی و ته‌نشست کانی‌های رسی شده است. آنالیز نیمه کمی SEM روی حفره‌های انحلالی حاصل از عملکرد آب نشان‌دهنده مقادیر بالای آب است.

واژه‌های کلیدی: رژیم تغییر شکلی، تبلور مجدد، جهت‌یابی ترجیحی شبکه‌ای و شکلی، سیستم لغزشی، میکروسکوپ الکترونی.

مقدمه

در شرایط پوسته‌ای، اغلب سنگ‌ها تحت شرایط شکننده^۱، تغییر شکل داده‌اند که این پدیده در اکثر موارد با حضور فاز سیال همراه است [۱]. به سبب خاصیت ناهمگنی و ناهمسانگردی پوسته، تغییر شکل‌های آن الزاماً با پیچیدگی‌های خاصی همراه هستند. سنگ‌های چند کانیایی نسبت به سنگ‌های تک‌کانی نیز رفتارهای تغییر شکلی پیچیده‌تری داشته که این خود تابع فازهای بین کانیایی است. اگر کانیهایی مثل میکاها به صورت فاز بین کانیایی موجود باشند، به سبب انعطاف‌پذیری بالایی که دارند، تغییر شکل آسانتر و با سرعت بالاتری روی خواهد داد. سنگ‌های تک‌کانی همچون کوارتزیت به سبب یکسان بودن رفتارهای تغییر شکلی کانیهایی آن و یکسان بودن مقاومت^۲ آنها، دارای همسانگردی‌های تغییر شکلی هستند.

کانی کوارتز حتی در درجات پائین دگرگونی، در طبیعت به راحتی دچار تغییر شکل می‌شود. این امر بستگی شدیدی به وجود آب در سنگ‌های پوسته‌ای و نیز ناخالصی‌های شیمیایی موجود در ساختار کوارتز (علاوه بر فشار و دما) دارد. عواملی مثل انحلال فشاری، تبلور و تبلور مجدد نیز پدیده‌هایی هستند که در ایجاد ساختارهای تغییر شکلی نقش دارند. به منظور مطالعه رفتار تغییر شکلی کوارتز، کوارتزیتها و رگه‌های کوارتزی مجموعه افیولیتی خوی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

وضعیت زمین شناسی

مجموعه افیولیتی خوی در شمال غرب ایران قرار دارد که حاشیه غربی آن تا ترکیه نیز ادامه دارد. این مجموعه افیولیتی شامل لرزولیتها، هارزبورژیتها، گابروهای ایزوتروپ، پیلولاواها، گدازه‌های بازالتی، دیابازها، گابروهای لایه‌ای، آمفیبولیتها، شیستها، فیلیتها، لیستونیتها و کوارتزیتها می‌باشند. سه نوع کوارتزیت به همراه رگه‌های کوارتزی در این مجموعه افیولیتی قابل تشخیص‌اند:

۱- کوارتزیت‌های توده‌ای که بهترین رخنمون آن در مختصات $38^{\circ}41'$ طول و $44^{\circ}39'$ عرض جغرافیایی قرار دارد (شکل ۱).

۲- رگه‌های کوارتزی که در آمفیبولیت‌های منطقه گردیک پائین قرار دارند و عموماً دارای روند و شیب $N145/50$ هستند (شکل ۱).

۳- رگه‌های کوارتزی که در درون چرت‌های رادیولردار (رادیولاریت‌ها) قرار داشته و دارای آلودگی‌های کربنات مس (مالاکیت) هستند (شکل ۲). این رگه‌های کوارتزی درون چرت‌های منطقه جنگ سرد قابل مشاهده است. رگه کوارتزی که در این مطالعه مورد بررسی قرار

1- Brittle

2- Strength

GEOLOGICAL MAP OF THE KHOY OPHIOLITIC MASSIF (NW OF IRAN)

The map displays the Khoys Ophiolitic Massif, a large geological formation in the northwest of Iran. The map is color-coded to represent different geological units, with a legend provided below the main map. The legend includes the following units and their corresponding colors:

- peridotites (Serpentinized hornblites and minor hornblites): Green
- Amphibolites, quartzites, schistes: Blue
- Micaschists, amphibolites, quartz and muscovite bearing veins: Pink
- Towns: Yellow
- Greenschists, metavolcanic schistes: Light Green
- Gabbro mylonite: Orange
- Granites mylonite: Red
- Basaltic pillow lava, sheeted flows: Brown
- Basaltic lava flows, tuffs, breccias, shales: Dark Blue

The map also shows the location of the study area within the context of the surrounding region, including the Black Sea, Caspian Sea, and the Araks River. The map includes a scale bar (0 to 10 km) and a north arrow. The map is labeled with various towns and locations, including Zaqeh, Zur Mord, Chayeh Pain, Golestan, W. Ghaz Khan, Gaharus, Shahr A, Gerdik Pain, Khonghah, Panchi, Duzi Aland, Ghaz, Shiran Kandi, Duzi Pain, Hesar, and Khoys. The map is dated 1978.

شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده‌شدهٔ افیولیت‌های منطقهٔ خوی به همراه تصویر ماهواره‌ای و موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه. A: کوارتزیت‌های توده‌ای، B: رگه‌های کوارتزی موجود در آمفیبولیت‌ها و C: رگه‌های کوارتزی درون چرت‌های رادیولاریتی.

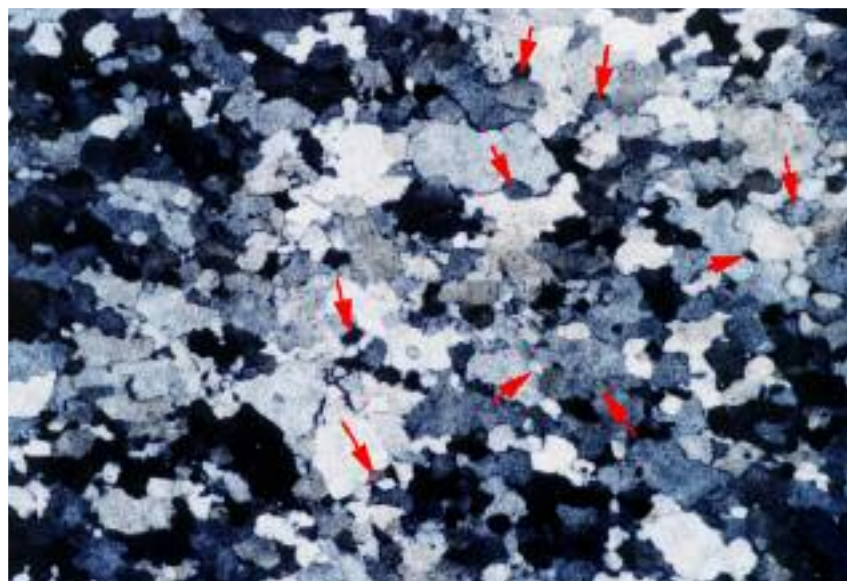


شکل ۲ رگه‌های کوارتزی موجود در چرت‌ها (فلش) به همراه آلودگی کربنات مس.

خصوصیات سنگ‌شناختی

رگه‌های سیلیسی موجود در آمفیبولیت‌ها دارای پورفیروکلاست‌های کوارتز بوده که نئوبلاست‌های کوارتز خصوصاً در حد فاصل مرز پورفیروکلاست‌ها نیز دیده می‌شود (شکل ۳). در محل برخورد رگه با آمفیبولیت‌ها، اپیدوت و گاهی آمفیبول و دانه‌های مگنتیت نیز دیده می‌شوند. رگه‌های سیلیسی موجود در چرت‌ها دارای دانه‌های بسیار درشت کوارتز بوده که دارای پیوندگاه سه‌گانه^۳ هستند. این پیوندگاه‌های سه‌گانه، نشانه تبلور مجدد استاتیک هستند. گاهی در محل پیوندگاه سه‌گانه، دانه‌های کوچک کوارتز نیز دیده می‌شوند. از خصوصیات دیگر این رگه‌ها، وجود کانی کالکوسیت است که مالاکیت از دگرسانی این کانی حاصل شده است.

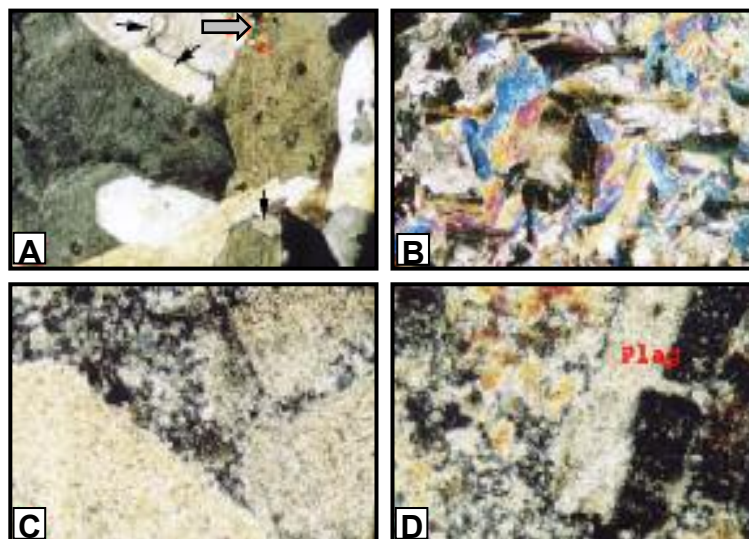
وفور دانه‌های بسیار درشت پره‌نیت و گاه‌ها اپیدوت نیز از دیگر خصوصیات سنگ‌شناسی این رگه‌هاست (شکل ۴A و ۴B).



شکل ۳ تشکیل نئوبلاست‌های کوارتز (پیکانه‌ها) در مرز پورفایروکلاست‌های کوارتز در رگه سیلیسی آمفیبولیت‌ها.

کوارتزیت‌های توده‌ای دارای دانه‌های کوارتز به همراه فلدسپار پتاسیم و پلاژیوکلاز (در مجموع کمتر از ۳-۲ درصد) در زمینه‌ای از کوارتزهای بسیار دانه‌ریز تغییر شکل یافته با خاموشی موجی شدیدند. فلدسپارهای پتاسیم و پلاژیوکلازها تحت تاثیر دگرسانی، شدیداً رسی شده‌اند (شکل ۴D). در رگه‌های کوارتزی در آمفیبولیت‌ها، شواهدی مبنی بر از دست‌دادن حجم (عدم وجود استیلولیت‌ها و تجمع اکسید آهن)، یا کاتاکلازی شدن شدید (عدم وجود شکستگی) و یا سرد شدن آرام (یعنی وجود مرزهای دانه‌ای مستقیم و وفور پیوندگاه سه‌گانه خوب توسعه یافته) دیده نمی‌شود. اما در رگه‌های سیلیسی موجود در چرت‌ها تشکیل مالاکیت و پره‌نیت به ترتیب دلیلی بر از دست دادن و گرفتن ماده است. همچنین تشکیل مرزهای دانه-ای مستقیم همراه با وجود پیوندگاه‌های سه‌گانه بسیار خوب توسعه یافته دلیلی بر سرد شدن آرام است. در کوارتزیت‌های توده‌ای، نئوبلاست‌های کشیده شده و تغییر شکل یافته، اطراف

پورفیروکلاست های کوارتز و گاه فلدسپار را پوشانیده اند (ناحیه β ، [۲]). این امر به سبب تغییر شکل ناهمسانگرد است [۳] (شکل ۴C).



شکل ۴ A: تشکیل نئوبلاست های کوچک (پیکانه های سیاه رنگ) در امتداد پیوندگاه سه گانه پورفیروکلاست های درشت کوارتز در رگه های کوارتزی موجود در چرتها. پیکان ضخیم (سمت راست بالا) اپیدوت را نشان می دهد. B: تشکیل پرهنیت در رگه های کوارتزی موجود در چرتها. C: تشکیل نئوبلاست های بسیار دانه ریز کوارتز در امتداد مرزهای پورفیروکلاست های درشت و نسبتاً دگرسان کوارتز در کوارتزیت های توده ای. D: نئوبلاست های کوارتز در امتداد یک بلور پلاژیوکلاز دگرسان شده و دارای ماکل در کوارتزیت های توده ای که خود ماکل به وسیله یک ریزگسل راستگرد جابجا شده است.

ریز ساختارهای موجود و سازوکار تبلور دوباره

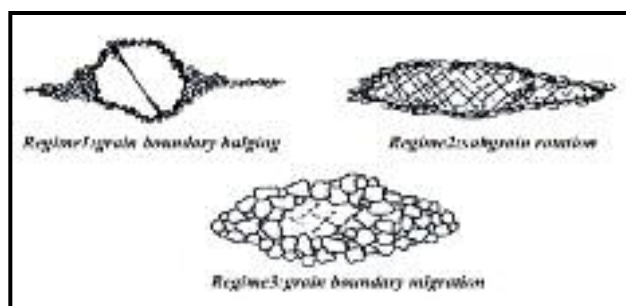
سه سازوکار مهم تبلور دوباره دینامیکی در مطالعات تجربی روی کوارتزیت ها تشخیص داده شده اند [۴]. این سه مکانیزم مربوط به سه رژیم تغییرشکلی یا خزش^۴ هستند [۵].

۱- رژیم I: در این رژیم تغییر شکلی که در دمای پائین روی می دهد، کوارتزیت ها از پورفیروکلاست های تقریباً هم اندازه کوارتز تشکیل می شوند. در امتداد مرزهای پورفیروکلاست ها زون هایی از کوارتزهای بسیار ریزدانه و پیوسته تشکیل شده است (شکل ۵). این کوارتزهای دوباره تبلور یافته در مقابل کرنش ضعیف بوده و سریعاً دچار تغییر شکل می شوند. این رژیم به

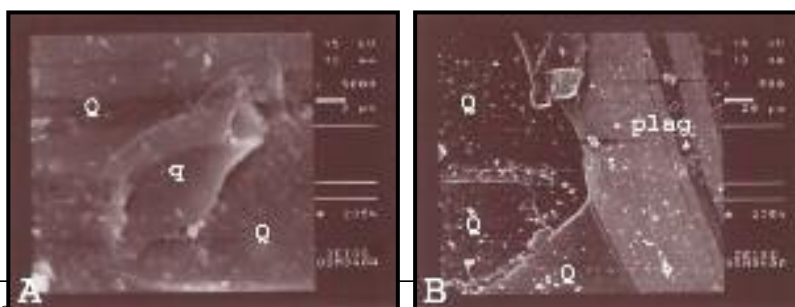
نام تبلور دوباره همراه با تورم^۵ شناخته می‌شود [۴]. این بررسی نشان می‌دهد که کوارتزیت‌های توده‌ای موجود در مجموعه افیولیتی خوی تحت همین رژیم تغییر شکلی متأثر شده و حاوی پورفایروکلاست‌های کوارتز به همراه نئوبلاست‌های بسیار ریزدانه کوارتز هستند (شکل‌های ۴C و ۶A) که اولاً پورفایروکلاست‌ها را به صورت ریون‌های پیوسته احاطه کرده و ثانیاً دچار تغییر شکل شده‌اند. این تغییر شکلها با خاموشی موجی شدید همراه هستند.

۲- رژیم II: این رژیم تغییر شکلی به نام تبلور دوباره با چرخش شبه‌دانه‌ها شناخته می‌شود [۴]. به دلیل اینکه در کوارتزیت‌های منطقه، این نوع رژیم تغییر شکلی دیده نمی‌شود، در مورد آن بیشتر بحث نمی‌شود.

۳- رژیم III: این رژیم تغییر شکلی که به نام تبلور دوباره با جابجایی مرزدانه‌ها نیز شناخته می‌شود [۴]، در دماهای بالا یا کرنش‌های پائین روی می‌دهد. در این رژیم، صعود جابجاییها^۶ آسان و تحرک مرزدانه‌ها نیز زیاد است. همچنین تبلور دوباره دینامیکی در این رژیم با جابجایی مرزدانه‌ها صورت می‌پذیرد (شکل ۵). رگه‌های سیلیسی موجود در آمفیبولیت‌های خوی، این رژیم تغییر شکلی را نشان می‌دهند. مرزدانه‌های کوارتز در این رگه‌ها مضرس بوده و گاهی به درون دانه‌های مجاور تورم پیدا کرده است (شکل ۷C).



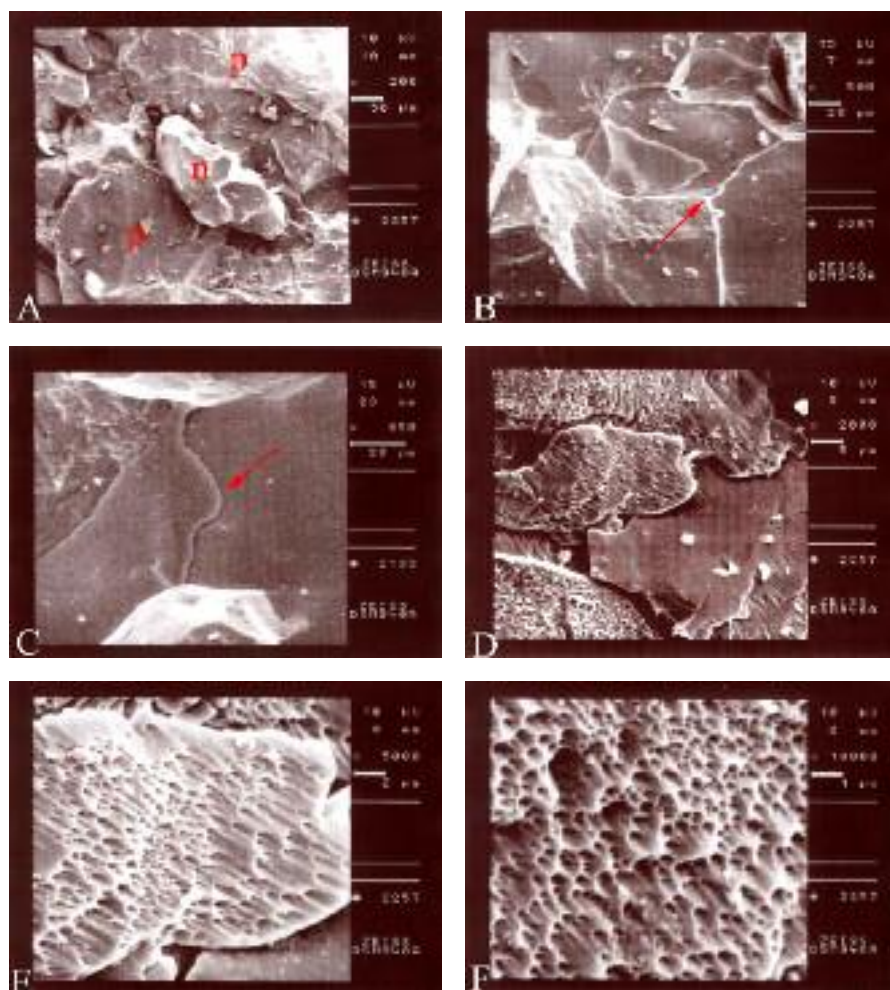
شکل ۵ توصیف نمادین ریزساختارهای نوری ایجاد شده در انبوه‌های کوارتزی تغییر شکل یافته در سه رژیم خزش جابجایی که با سازوکارهای متفاوتی از تبلور دوباره دینامیکی مشخص می‌شود. اندازه دانه‌های تبلور دوباره یافته، که از رژیم ۱ به سمت رژیم ۲ و رژیم ۳ افزایش می‌یابد قابل توجه است (با تغییرات از [۴]).



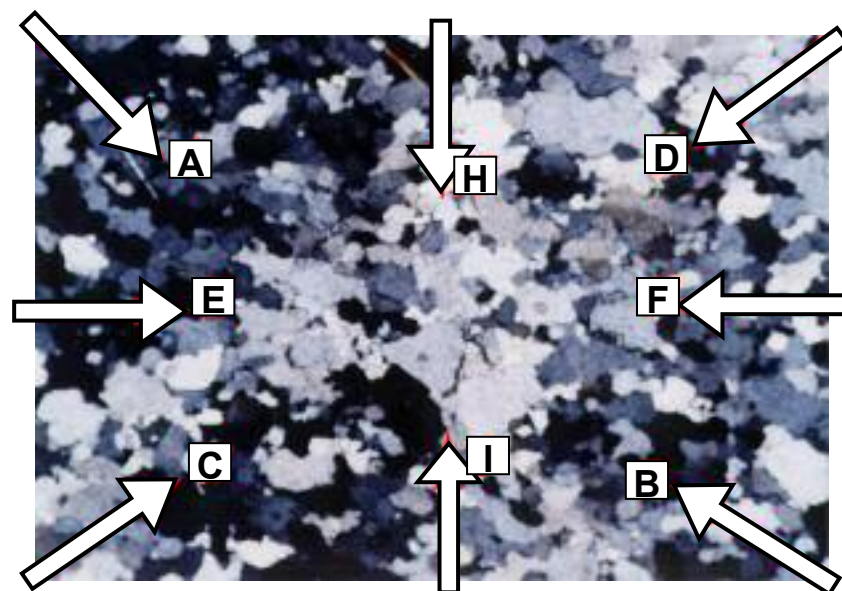
5- Bulging recrystallization

6- Dislocation Glide

شکل ۶ تصاویر SEM مربوط به کوارتزیت های توده ای. A- نئوبلاست ریزدانه کوارتز (q) محصور بین پورفیروکلاست های کوارتز (Q). B- بلور ماکل دار پلاژیوکلاز در برخورد با دانه های کوارتز. در نقاط اتصال پورفیروکلاست های کوارتز، نئوبلاست های ریز دانه کوارتز تشکیل شده است (شکل های ۳ و ۷A). در این رژیم تغییر شکلی اندازه دانه های جدید توسط جابه جایی مرز دانه ها افزایش می یابد. به منظور بررسی جنبشی فرایند تبلور دوباره دینامیکی در این رگه های کوارتزی، از روش Darot [۶] نیز استفاده شده است. در این روش در چندین نقطه از مقطع، تعداد مرز دانه ها به موازات سمتگیری خطی، عمود بر آن و ۴۵ درجه نسبت به آن سنجیده شده است. میانگین این اندازه گیری ها در شکل ۸ آمده است.



شکل ۷ تصاویر SEM مربوط به رگه‌های کوارتزی موجود در آمفیبولیت‌ها، بزرگنمایی و طول میدان دید در کنار تصویر ذکر شده است. A: تشکیل نئوبلاست (n) در فضای بین پورفایروکلاست ها (p). B: پیوندگاه سه‌گانه بین دانه‌های مجاور. C: تورم مرز یک دانه به درون دانه مجاور. D، E و F: ساختارهای انحلالی در بزرگنمایی‌های متفاوت (افزایش بزرگنمایی از D به سمت F).



مقطع	AB	CD	EF	HI
میانگین تعداد مرز دانه ای با بزرگنمایی $\times 10$	۸	۱۵	۱۱	۱۳

شکل ۸ میانگین تعداد مرزهای دانه‌ای به موازات سمتگیری خطی (AB)، عمود بر آن (CD) و ۴۵ درجه نسبت به آن (EF و HI). همانطور که مشاهده می‌شود تعداد مرزهای در جهت عمود بر سمتگیری خطی بیشتر بوده و نشان دهنده تشکیل نئوبلاست‌ها در این جهت است. در جهت سمتگیری خطی، تعداد مرزهای دانه ای کمتر بوده و نشان دهنده رشد و کشیدگی دانه‌ها در این جهت است. این آنالیز برای دانه‌های کوارتز موجود در رگه‌های سیلیسی آمفیبولیت‌ها صورت پذیرفت.

جهت‌یابی ترجیحی محور c دانه‌های کوارتز

به طور کلی جهت‌یابی ترجیحی کوارتز در اکثر سنگ‌های تغییرشکل یافته معمول بوده و شامل جهت‌یابی ترجیحی شکلی^۷ و بدون جهت‌یابی ترجیحی شبکه‌ای^۸ در اسلیت‌ها، LPO شدید و

7- Shape Preferred Orientation (SPO)

8- Lattice Preferred Orientation (LPO)

SPO ضعیف در کوارتزیت ها و شیست ها ، SPO و LPO قوی در میلونیت ها متغیر است [۷]. رفتار تغییر شکلی کوارتز به سبب تقارن بالای آن و تعداد زیاد سیستم های لغزشی، پیچیده است. مطالعات تجربی به همراه داده های حاصله از LPO های کوارتزیت های تغییر شکل یافته طبیعی نشان می دهد که لغزش قاعده ای در راستای محور a^9 سیستم لغزشی در دماهای پائین است. لغزش منشوری در راستای محور a^{10} و لغزش لوزی رخ در راستای محور a^{11} به ترتیب با افزایش درجه حرارت فعال شده و سیستم لغزشی منشوری در راستای محور c^{12} در دماهای بسیار بالا فعال است [۳، ۴ و ۸ تا ۱۵]. عموماً نوع جهت یابی ترجیحی محور c در کوارتزیت ها، بدون فاز ثانویه، به عوامل زیر بستگی دارد: ۱- سازوکار تغییر شکل درون کریستالی (سیستم لغزشی عمل کننده). ۲- رژیم تغییر شکلی [۵]. ۳- شدت تغییر شکل [۱۶].

الگوی پراکندگی قطب های محور c دانه های کوارتز در رگه های سیلیسی موجود در آمفیبولیت ها و چرت ها در شکل ۹ نشان داده شده اند. کوارتزهای موجود در رگه های سیلیسی موجود در آمفیبولها، بیشینه ای نزدیک به Y دارند. این امر به لغزش در سیستم $\langle a \rangle^{1010}$ (یعنی لغزش منشوری در راستای محور a) همراه با فعالیت اندک سیستم $\langle a \rangle^{0001}$ (یعنی لغزش قاعده ای در راستای محور a) نسبت داده می شود [۱۷ و ۱۸].

مطالعات تجربی بر روی کوارتزیت ها [۱۹] نشان داد که در کرنشهای برشی (۲) بالا (بالتر از ۴) الگوی LPO به دو کمر بند 13 بخشی مجزا شده و بیشینه ای را حول محور کرنش حد واسط یعنی Y یا نزدیک به آن تشکیل می دهند. این الگوی پراکندگی محورهای C انتقالی از لغزش قاعده ای (به اضافه لوزی رخ) در راستای محور $\langle a \rangle$ را به لغزش منشوری و لوزی رخ در راستای محور $\langle a \rangle$ را نشان می دهد [۴]. این الگو با مدل تغییر شکل لغزشی ساده 14 سازگار است (شکل ۱۰)، (جدای از نظریه لغزش مضاعف 15 بر اساس آنالیز Taylor-Bishop-Hill [۱۶]) [۸]. این مدل در مورد یک برش ساده پیشرونده 16 امکان پذیر است، زیرا دانه ها دارای یک صفحه و جهت لغزشی سازگار با جهت صفحه برشی کل هستند. بنابر این قادرند تنها با یک سیستم لغزشی تغییر شکل یابند [۳].

الگوی پراکندگی محورهای c کوارتز در رگه های سیلیسی موجود در چرت های خوی هیچ گونه نظم خاصی نداشته و نشان دهنده توزیع کتره های محورهای c کوارتز است. پدیده های

9- Basal $\langle a \rangle$ Slip10- Prism $\langle a \rangle$ Slip11- Rhomb $\langle a \rangle$ Slip12- Prism $[c]$ Slip

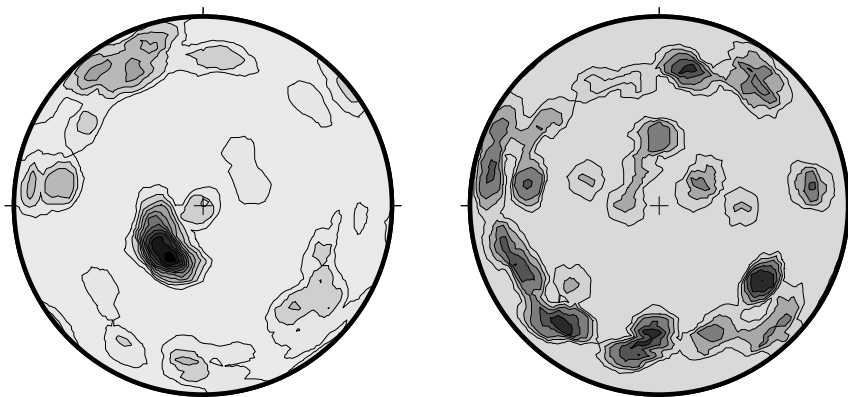
13- Girdle

14- Single-Slip Deformation Model

15- Multiple Slip

16- Progressive Simple Shear

درگیر در مورد این کوارتزیت‌ها، تبلور مجدد استاتیک و بازیافت استاتیک^{۱۷} و یا به طور کلی پدیده سرد شدن آرام هستند. این امر با وجود مرزهای دانه‌ای کاملاً مستقیم، پیوندگاه‌های سه-گانه، اندازه درشت دانه‌های کوارتز و نبود جهت‌یافتگی خاص در الگوی محورهای C تأیید می‌شود.



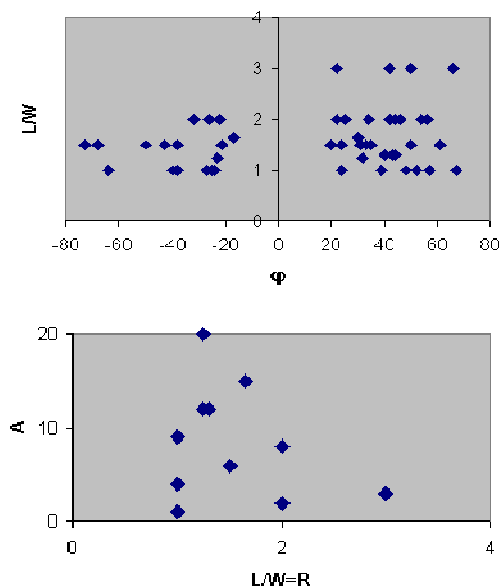
شکل ۹ الگوی پراکندگی محورهای C کوارتز در رگه‌های کوارتزی موجود در آمفیبولیت‌ها (سمت چپ) و در داخل رگه‌های سیلیسی موجود در چرت‌ها (سمت راست). در سمت راست تعداد قطب‌های اندازه‌گیری شده ۴۹ عدد، چگالی بیشینه ۶/۰۱ و شمارش شده در فواصل ۱ تا ۶ درصد. در سمت چپ تعداد قطب‌های اندازه‌گیری شده ۱۰۵ عدد، چگالی بیشینه ۱۱/۹۶ و شمارش شده در فواصل ۱ تا ۱۱ درصد.



شکل ۱۰ شکل نمادین نشان دهنده افزایش پیشرونده در ابعاد یک دانه کوارتز با جهت محور C ثابت، زمانی که صفحه لغزشی (قاعده ای یا منشوری به ترتیب) به موازات صفحه برش است (با تغییرات از [۳]).

سمت‌یابی شکلی دانه‌ها

به طور کلی سمت‌یابی شکلی دانه‌ها عبارت است از آرایش ظاهری دانه‌های غیر هم بعد. بدین منظور محورهای بلند (L) و کوتاه (W) دانه‌ها توسط میکروسکوپ اندازه‌گیری شده و نسبت آنها (L/W) با R نشان داده می‌شود. همچنین زاویه‌ای که محور بلند دانه با بریدگی و یا سمتگیری خطی می‌سازد (زاویه ϕ) نیز اندازه‌گیری می‌شود. روش R/ϕ برای آنالیز کرنش اولین بار توسط Ramsay [۲۰]، Dunnet [۲۱] و Lisle [۲۲] توصیف شده است. سمت‌یابی شکلی دانه‌ها در رگه‌های کوارتزی موجود در آمفیبولیت‌های خوی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. جهت برش^{۱۸} قابل مشاهده در این مورد یک برش چپ‌گرد است. همچنین نمودار A در مقابل R نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این نمودار بر خلاف نمودار پیشنهاد شده توسط Means [۲۳] (یعنی نمودار با پلات حلقه‌ای شکل) نشان می‌دهد که از رشد دانه‌ها، به سبب انرژی کم مرزهای دانه‌ای و نیز تحرک اندک بین دانه‌های مجاور جلوگیری شده است (تحرک اندک به سبب جهت‌یابی کریستالی تقریباً همسان دانه‌های مجاور است که سمت‌یابی قوی محورهای C کوارتز دلالت بر این امر دارد) [۳].



شکل ۱۱ آنالیز R/ϕ یا سمت‌یابی شکلی دانه‌های کوارتز موجود در رگه‌های سیلیسی آمفیبولیت‌ها. چنانکه در شکل بالایی دیده می‌شود جهت برش چپ‌گرد است. در شکل پائینی نسبت A در مقابل R رسم شده است. به سبب یکسان بودن مقادیر A و R بیشتر دانه‌های کوارتز، نقاط هم‌پوشانی داشته و تعداد آنها در نمودار کمتر شده است.

ژئوشیمی کانیهای تشکیل دهنده کوارتزیت‌ها

آنالیز ژئوشیمیایی کانی‌های موجود در کوارتزیت‌ها و رگه‌های کوارتزی به‌صورت نیمه‌کمی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) نوع ZEISS Leo آلمان، مدل DSM940A در دانشکده علوم پزشکی دانشگاه شهید بهشتی صورت پذیرفته است. در این مورد سعی شد تا در آنالیز از بزرگنمایی بالا استفاده شود تا مساحتی که مورد آنالیز قرار می‌گیرد کوچک باشد. در رگه‌های کوارتزی موجود در آمفیبولیت‌ها، مقادیری اپیدوت وجود دارد که آنالیز آنها نشان‌دهنده اپیدوت‌هایی با منیزیم بالاست. همچنین آنالیز حفره‌های انحلالی موجود در دانه‌های کوارتز (شکل VD-F)، مقادیر بالایی از آب و نیز در برخی موارد انبوهه‌هایی از عناصر موجود در ترکیب کانی‌های رسی را نشان می‌دهد. این امر نشانگر تشکیل کانی‌های رسی کریپتوکریستالین در سطح این حفره‌هاست. دانه‌های مگنتیت موجود در این رگه‌ها نیز مورد آنالیز قرار گرفته و به دلیل اینکه دارای انکلوژیون‌هایی از کوارتز ریزدانه است، آنالیز آنها نشان‌دهنده مقادیر بالایی از سیلیس (به همراه مقادیری کلر و آلومینیوم) است (جدول ۱). آنالیز انجام شده روی دانه‌های پره‌نیت موجود در رگه‌های کوارتزی چرت‌ها نشان‌دهنده مقادیر بالایی از مس است. در برخی موارد نیز پره‌نیت‌ها دارای انکلوژیون‌هایی از کالکوسیت هستند که در آنالیز دارای بی‌هنجاری سولفور به همراه مقادیر بالاتر مس و آهن هستند.

جدول ۱ میانگین آنالیز ژئوشیمیایی برخی از کانی‌های تشکیل‌دهنده کوارتزیت‌های خوی.

چرت	چرت	چرت	چرت	چرت	سنگ
پره‌نیت	کوارتز	پره‌نیت	پره‌نیت	پره‌نیت	کانی
41/27	73/28	60/87	51/4	74/59	O
13/75	20/03	14/97	19/88	10/85	Si
7/39	0/42	8/03	10/18	5/19	Al
2/56	4/73				Na
8/6					S
2/02	1/29				Cl
0/39					K
9/32		14/11	15/1	9/01	Ca
3/96					Fe
10/73		2/02	3/44		Cu
	0/25				Mg
99/99	99/75	100	100	99/64	Total
توده ای	توده ای	توده ای	آمفیبولیت	آمفیبولیت	سنگ
کوارتز	کوارتز	کوارتز	مگنتیت	کوارتز	کانی

O	77,54	64,2	46,93	47,25	52
Si	21,68	4,09	53,07	52,75	48
Al		0,97			
S					
Cl	1,78	2,9			
K	0,35	0,31			
Ca		0,97			
Fe		27,15			
Cu					
Cr		0,02			
Total	101,35	100,61	100	100	100

اثر آب بر کوارتزیت‌ها

به طور کلی آب باعث سستی ساختار کوارتز می‌شود. همچنین قدرت خزش جابه‌جایی کوارتزیت‌ها به‌طور خطی با فوگاسیته آب رابطه دارد [۲۴ و ۲۵]. در رگه‌های سیلیسی موجود در آمفیبولیت‌های مورد مطالعه حضور آب را می‌توان تشخیص داد. این آب به صورت بین‌دانه‌ای در درون خلل و فرج موئینه سنگ حضور داشته و باعث شکل‌گیری ساختارهای انحلالی در سطح دانه‌ها و همچنین تشکیل کانی‌های رسی کریپتوکریستالین شده است (شکل VD-F).

بحث و برداشت

۱- شرایط تغییر شکل کوارتزیت‌های توده‌ای در حد رخساره شیست‌سبز بوده که با سازوکار تبلور دوباره دخیل در آن، یعنی با تبلور دوباره همراه با تورم سازگاری دارد. نئوبلاست‌های تشکیل‌شده بسیار ریزدانه بوده و پدیده کاتاکلازی شدن و از دست دادن ماده (دگرسانی رسی) در این نوع کوارتزیت‌ها به چشم می‌خورد.

۲- رگه‌های سیلیسی موجود در چرت‌ها نیز در حد رخساره شیست سبز تغییر شکل یافته‌اند و با از دست‌دادن و گرفتن ماده بر اثر دگرسانی و تشکیل پره‌نیت و اپیدوت همراهند. پدیده گرمادهی در این کوارتزها کاملاً مشهود بوده و الگوی پراکندگی محور c کوارتزها این خصوصیت را تأیید می‌کند. پره‌نیت‌های موجود در این رگه‌ها احتمالاً از دگرسانی کالکوسیت به‌وجود آمده و بدین سبب دارای مقادیر بالایی از مس (و گاهی انکلوزیون‌هایی از کالکوسیت) هستند.

۳- رگه‌های سیلیسی موجود در آمفیبولیت‌ها دارای کوارتزهایی هستند که به دلیل عملکرد آب دارای ساختارهای انحلالی شده و کانی‌های رسی در این ساختارها نیز تشکیل شده‌اند. اپیدوت موجود در این رگه‌ها دارای منیزیم بالایی است که این امر احتمالاً به دلیل مجاورت با هورنبلند آمفیبولیت‌ها و پدیده نشر یونی است. الگوی پراکندگی محورهای c دانه‌های کوارتز با لغزش رومبوند و منشوری در راستای محور <a> همخوانی داشته که حاصل یک برش ساده پیشرونده است. این الگوی پراکندگی مربوط به دمای بالا (و میزان کرنش کمتر) بوده و با تغییر شکل در حد رخساره آمفیبولیت مطابقت دارد.

۴- مطالعه تغییر شکل پلاستیکی کانی‌های تشکیل دهنده پریدوتیت‌های این منطقه به موازات این مطالعه می‌تواند یافته‌های جامعی در مورد تغییر شکل و شرایط پوسته‌ای- گوشته‌ای و نحوه جایگیری افیولیت‌ها ارائه کند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از داوران محترم مجله بلور شناسی و کانی‌شناسی ایران به‌خاطر راهنمایی‌های بالارزش و موثرشان سپاسگزاری می‌شود. از آقای مهندس الماسیه، آقای زارع و خانم مهندس ترکمانی به‌خاطر همکاری‌ها و ارائه تسهیلات آزمایشگاهی تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] FitzGerald J. D., Stunitz H., "Deformation of granitoids at low metamorphic grade I: reactions and grain size reduction", Tectonophysics 221 (1993) pp. 299-324.
- [2] Lister G. S., Price G. P., "Fabric development in a quartz- feldspar mylonite", Tectonophysics 49 (1978) pp. 37-78.
- [3] Burg J. P., "Quartz shape fabric variations and C-axis fabrics in a ribbon-mylonite: arguments for an oscillating foliation", J. of Structural Geology 82 (1986) pp. 123-131.
- [4] Tullis J., "Deformation of granitic rocks: Experimental studies and natural examples, Plastic Deformation of Minerals and Rocks, ed. by: Karato S. I., Wenk H. R., Reviews in mineralogy and geochemistry 51 (2002) pp. 51-95.
- [5] Hirth G., Tullis J., "Dislocation creep regimes in quartz aggregates", J. of Structural Geology 14 (1992) pp. 145-159.

- [6] Darot M., *"Cinematique de l'extrusion a partir du manteau, des peridotites de la Sierra Bermeja (Serrania de Ronda, Espagne)"*, Comptes Rendus Academic de Sciences du Paris 278 (1973) pp. 1673-1676.
- [7] Shelley D., *"Igneous and metamorphic rocks under the microscope"*, Chapman & Hall (1995) 415.
- [8] Twiss R., Moores E., *"Structural Geology"*, W. H. Freeman & Company New York (1992) 532.
- [9] Baeta R. D., Ashbee K. H. G., *"Slip systems in quartz: I- Experiments; II- Interpretation"*, American Mineralogist 54 (1969) pp. 1551-1582.
- [10] Behrmann G. H. E. E., *"Crystal plasticity and super-Plasticity in quartzite: A natural example"*, Tectonophysics 115 (1985) pp. 101-129.
- [11] Dell Angelo L. N., Tullis J., *"A comparison of quartz C-axis preferred orientations in experimentally deformed aplites and quartzites"*, J. of Structural Geology 8 (1986) pp. 683-692.
- [12] Dell Angelo L. N., Tullis J., *"Fabric development in experimentally sheared quartzites"*, Tectonophysics 169 (1989) pp. 1-21.
- [13] Tullis J., Wenk H. R., *"Effect of muscovite on strength and lattice preferred orientations of experimentally deformed quartzite aggregates"*, Material Sciences Engineering A175 (1994) pp. 209-220.
- [14] Lagoeiro L., Hippertt J., Lana C., *"Deformation partitioning during folding and transposition of quartz layers"*, Tectonophysics 361 (2003) pp. 171-186.
- [15] Hongn F. D., Hippertt J. F., *"Quartz crystallographic and morphologic fabrics during folding / Transposition in mylonites"*, J. of Structural Geology 23 (2001) pp. 81-92.
- [16] Lister G. S., Hobbs B. E., *"The simulation of fabric development during plastic deformation and its application to quartzite: the influence of deformation history"*, J. of Structural Geology 2 (1980) pp. 355-370.
- [17] White S. H., *"The effects of strain on the microstructures, fabrics and deformation mechanisms in quartzites"*, Philosophy Transition Royal Society of London, A283 (1976) pp. 69-86.
- [18] Nicolas A., Poirier J. P., *"Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks"*, John Wiley (1976) 444.
- [19] Heilbronner R., Tullis J., *"The effect of static annealing on microstructures and crystallographic preferred orientations of quartzites"*

experimentally deformed in axial compression and shear", Geological Society of London Special Publication 200 (2002) pp. 191-218.

[20] Ramsay J. G., *"Folding and fracturing of rocks"*, McGraw-Hill, New York (1967) 531.

[21] Dunnet D., *"A technique of finite strain analysis using elliptical particles"*, Tectonophysics 7 (1969) pp. 117-136.

[22] Lisle R. J., *"Clastic grain shape and orientation in relation to cleavage from the Aberystwyth Grits, Wales"*, Tectonophysics 39 (1977) pp. 381-385.

[23] Means W. D., *"The concept of steady-state foliation"*, Tectonophysics 78 (1981) pp. 179-199.

[24] Kohlstedt D. L., Evans B., Mackwell S. J., *"Strength of the lithosphere: constraints imposed by laboratory experiments"*, J. of Geophysical Researches 100 (1995) 17587-17602.

[25] Post A. D., Tullis J., Yund R. A., *"Effects of chemical environment on dislocation creep of quartzite"*, J. of Geophysical Researches 101 (1996) 22143-22155.