

Microstructural and strain analysis of quartz grains on estimation of deformation conditions and origin of thrust sheets in the eastern Alborz

E. Mofidi¹, A. Yassaghi¹, B. Rahimi²

1-Department of Geology, Tarbiat Modares University

2- Department of Geology, Damghan University

E-Mail: yassaghi@modares.ac.ir

(Received:9/4/2006, received in revised form:17/10/2006)

Abstract: In this study, strain and microstructures of quartz grains have been used for deformational analysis of thrust sheets in the eastern Alborz. Structural studies resulted in recognition of eight thrust sheets (Gorgan, Siahkhan, Tazereh, Shahdar, Anbankuh, Shirband, Anjirlu and Sefidkuh) in ascending order from north to south. Microstructural studies and strain analyses on samples across the sheets were carried out for interpretation of deformation conditions. Detail microstructural analysis of quartz grains indicated that the grains are deformed by intracrystalline deformation. Accordingly, it is proposed that the thrust sheets in the southern portion of Tazereh (i.e. Shahdar, Anban-kuh, etc) and the Siahkhan to be generated in shallow depth. However, Tazereh and Gorgan sheets postulated to have deeper origin, presumably from a depth in which the transition from brittle to ductile deformation occurs. The low values of finite strain indicate that emplacement mechanism of the sheets was assumed to be compatible with the model proposed for foreland sheets. That is, the sheets were emplaced on their basal thrust as rigid blocks. Consequently, the area of study is governed by thin skinned tectonics.

Keywords: *Eastern Alborz, North Damghan, microstructural analysis, strain analysis, quartz grains.*



تحلیل کرنش و ریزساختار دانه‌های کوارتز در برآورد خاستگاه و شرایط دگرشکلی برگه‌های راندگی البرز شرقی

الهه مفیدی^۱، علی یساقی^۱، بهنام رحیمی^۲

۱- گروه زمین‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس.

۲- گروه زمین‌شناسی دانشگاه دامغان.

پست الکترونیکی: yassaghi@modares.ac.ir

(دریافت مقاله ۱۳۸۵/۱/۲۰، دریافت نسخه نهایی ۱۳۸۵/۷/۲۵)

چکیده: در این مطالعه، کرنش و ریزساختارهای دانه‌های کوارتز در تحلیل دگرریختی برگه‌های راندگی در البرز شرقی به کار رفته است. مطالعات ساختاری منجر به شناسایی هشت برگه راندگی گرگان، سیاه‌خانی، طزره، شاهداری، انبان‌کوه، شیربند، انجیرلو و سفیدکوه از شمال به جنوب شده است. بررسی‌های ریزساختاری و تحلیل کرنش در نمونه‌های جمع‌آوری شده در عرض ورقه‌های رورانده، تفسیری برای شرایط دگرریختی آنها فراهم آورده است. تحلیل دقیق ریزساختارهای دانه‌های کوارتز بیانگر آن است که دگرریختی در آنها به شکل درون بلوری صورت گرفته است. بر این اساس برگه‌های راندگی که در جنوب برگه طزره واقع شده‌اند (برگه‌های شاهداری، انبانکوه شیربند، انجیرلو و سفیدکوه) و برگه سیاه‌خانی در عمق کم پوسته تشکیل شده‌اند درحالی‌که برگه‌های گرگان و طزره با منشأ عمیقتر، از عمقی که انتقال تغییر شکل شکننده به شکل‌پذیر رخ می‌دهد، منشأ گرفته‌اند. میزان کم کرنش‌نهایی در نمونه‌ها، بیانگر آن است که مکانیزم جایگزینی برگه‌های راندگی احتمالاً با مدل ارائه شده برای برگه‌های پیش بومی سازگار است. لذا برگه‌ها به صورت لغزش بلوکهای سخت بر روی قاعده راندگی خویش جایگزین شده‌اند و بنابراین زمین‌ساخت غالب نازک‌پوسته است.

واژه‌های کلیدی: البرز شرقی، شمال دامغان، تحلیل ریزساختاری، تحلیل کرنش نهایی، دانه‌های کوارتز.

مقدمه

توزیع و هندسه دگرشکلی در پوسته قاره‌ای به‌ویژه در کمربندهای چین‌خورده-رانده مناطق برخوردی، همواره از جالبترین مباحث در زمین‌شناسی ساختاری به‌خصوص در سالهای اخیر بوده است. این مطالعات بیشتر در قالب تحلیل هندسی و جنبشی برگه‌های راندگی و چینهای همراه بوده است. اما اخیراً با بهره‌گیری از مطالعات ریزساختاری و کرنش بلورهای کوارتز سعی شد تا داده‌های ارزشمندی در زمینه نوع و ژرفای دگرشکلی در این کمربندها به دست‌آید.

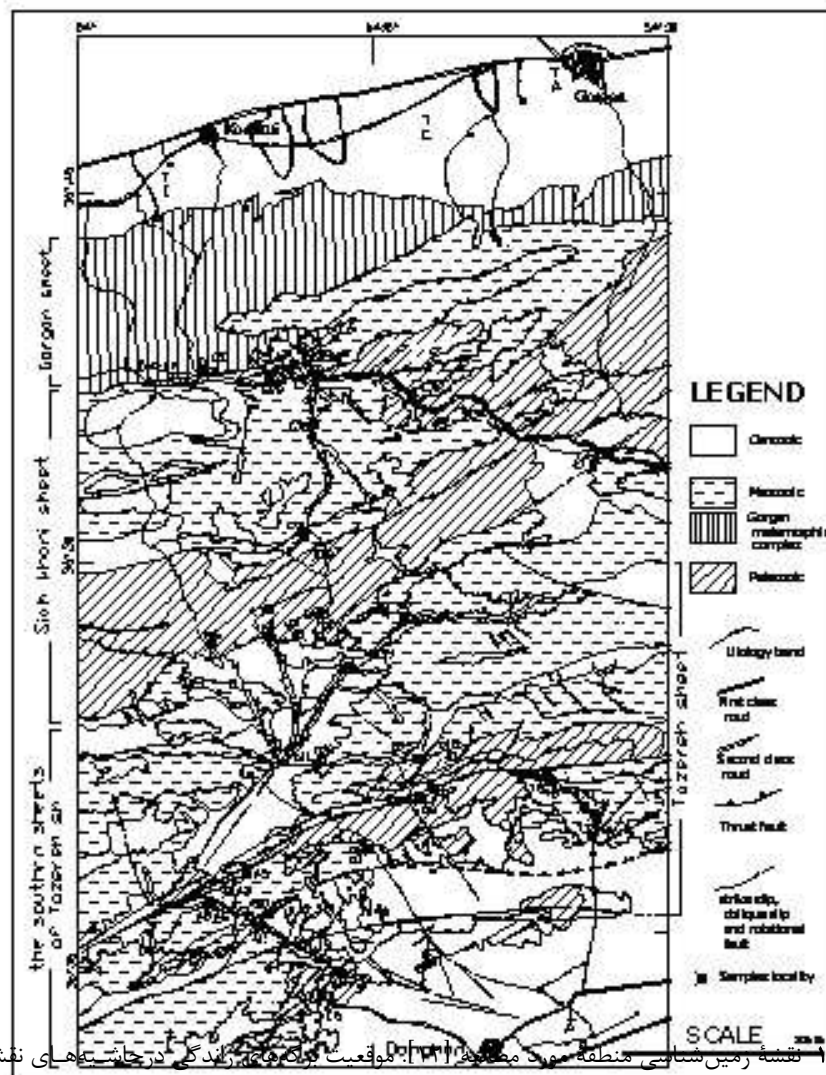
بررسی‌های ریزساختاری، همواره یکی از راههای کیفی تحلیل دگرشکلی بوده است. این‌گونه مطالعات نه تنها مجالی برای بررسی رفتار کانیها در شرایط گوناگون دگرشکلی [۱، ۲] و نیز ارتباط مکانی آنها با ساختارهای موجود از جمله برگه‌های راندگی در منطقه به دست می‌دهد [۳، ۴] بلکه به‌صورتی کیفی از آن برای تعیین درجات و رژیمهای دگرگونی در طول دگرشکلی بهره برده‌اند [۵، ۶، ۷]. به علاوه، مطالعه کرنش و دگرشکلی درونی در برگه‌های راندگی و مناطق برشی قاعده آنها به‌صورت محاسبه میزان و توزیع کرنش، نه تنها شناخت کاملی از سازوکار و فرایند تکامل این گونه ساختارها می‌دهد بلکه بینشی دقیقتر از هندسه و تحول جنبشی آنها فراهم می‌آورد [۸، ۹، ۱۰، ۱۱].

بررسی‌های ساختاری در البرز خاوری به‌ویژه مسیر دامغان-گرگان منجر به شناسایی برگه‌های رورانده شده است [۱۲، ۱۳]. این برگه‌های راندگی به دو دسته برگه‌های راندگی حاصل از کوهزایی سیمین به‌عنوان برگه‌های قدیمتر (برگه گرگان)، و برگه‌های جوانتر حاصل از کوهزایی آپی تقسیم شده‌اند [۱۲]. اما داده‌های دقیقی از خاستگاه و ژرفای این برگه‌های راندگی در دسترس نیست. بررسی و تحلیل کرنش و ریزساختاری دانه‌های کوارتز در این برگه‌های راندگی، به‌ویژه از مناطق برشی قاعده آنها، این امکان را به وجود می‌آورد تا دیدگاهی دقیقتر در مورد خاستگاه و نوع دگرشکلی حاکم بر آنها به دست‌آید. بر همین اساس در این مقاله سعی شده است با استفاده از تحلیل کرنش و ریزساختار بلورهای کوارتز، داده‌های تکمیلی برای تعیین الگوی تکامل ساختاری راندگیهای این بخش از البرز شرقی ارائه گردد. در این راستا همچنین سعی خواهد شد تا پهنا و توزیع دگرشکلی در درون و در دنباله برگه‌های راندگی و نیز چگونگی جایگزینی آنها تعیین شود.

زمین‌شناسی ساختاری

منطقه مورد مطالعه گستره‌ای به پهنای ۴۵ کیلومتر و طول ۱۱۰ کیلومتر بین طولهای ۵۴/۰۰ تا ۵۴/۳۰ شرقی و عرضهای ۳۶/۰۰ تا ۳۷/۰۰ شمالی را در بر می‌گیرد. در شمال گستره مورد مطالعه مجموعه دگرگونی گرگان گسترده شده است. روی این مجموعه دنباله‌ای از تهنشستهای کامبرین تا ترشیاری قرار دارند. این واحدهای سنگی قابل تفکیک به سازندهای باروت، لالون،

میلا، جیروود، مبارک، قزل قلعه، درود، روته، الیکا، شمشک، دلیچای، لار، نهشته‌های کرتاسه، فجین، زیارت، کرج و دنباله‌های نتوژن هستند که در منطقه پراکندگی و برونزد دارند (شکل ۱).



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه سرحد منطقه ۱۳۱۱. موقعیت برگ رانده و رانده‌های درج شده در نقشه آمده است. به محل نمونه‌های مطالعه شده توجه کنید. برشهای A، C، و E در شکل ۳ ارائه شده است. این واحدها به وسیله گسلهای متعددی روی هم رانده شده‌اند [۱۲]. این پژوهشگران با مطالعه گسلهای رانده‌ای در این برش از البرز شرقی، هشت برگ رانده را از شمال به جنوب شناسایی و معرفی کرده‌اند (شکل ۱). این برگه‌های رانده‌ای که ضخامتها و وسعتهای متفاوتی داشته و

سمت و سوی حرکت آنها به جنوب-جنوب شرق است، از شمال به جنوب عبارتند از: گرگان، سیاه‌خانی، طزره و برگه‌های جنوبی. برگه طزره شامل برگه‌های شاهداری، انبان‌کوه، شیربند، انجیرلو، و سفیدکوه (شکل ۱) که جزئیاتی از هندسه و سمت و سوی راندگی آنها به شرح زیر ارائه شده است.

برگه راندگی گرگان که شمالی‌ترین برگه راندگی است از سنگهای دگرگونی تا حد رخساره شیبست‌سبز تشکیل شده و روی سازند قزل‌قلعه رانده شده است. جهت شیب سطوح کلیواژ (۱۵-۲۵ درجه به سمت شمال) و هندسه نامتقارن چینها در سنگهای ته‌نشینی قزل‌قلعه، سوی حرکت این برگه را جنوب-جنوب شرق نشان می‌دهد (شکل ۱).

برگه راندگی سیاه‌خانی که پهناورترین برگه راندگی منطقه است، از دنباله از واحدهای سنگی دونین فوقانی تا کرتاسه، مشتمل بر سازندهای قزل‌قلعه، مبارک، درود، روته، و الیکا تشکیل شده است. این برگه که در فرودیواره راندگی گرگان قرار دارد با گسلهای راندگی متعددی، روی واحدهای شیلی و ماسه‌سنگی سازند شمشک، سنگهای آذرآواری ائوسن و نهشته‌های تبخیری و آواری نئوژن، رانده شده است (شکل ۲ الف). چینهای نامتقارن پیشانی برگه راندگی (شکل ۲ ب)، راندگیهای فرعی (شکل ۲ پ) متعدد در درون برگه، ساختارهای S و C تشکیل شده در قاعده این راندگیهای فرعی، شواهدی هستند که موید سمت و سوی حرکت راندگی سیاه‌خانی به جنوب شرق‌اند.

برگه راندگی طزره، مجموعه‌ای از نهشته‌های دونین تا کرتاسه بالایی است، و سازندهای جیروود، مبارک، درود، روته، الیکا، شمشک، دلیچای، لار و تیزکوه را شامل می‌شود. این برگه با راستای شرقی-غربی و شیب ۲۰-۲۵ درجه به سمت شمال، در دره تالو، روی طبقات سازند شمشک رانده شده است. در فرودیواره راندگی در دره تالو، بخشهای خردشده با ضخامت نسبتاً زیاد مشاهده می‌شود که سنگهای گوناگونی را از جنس توف، آتشفشانی بازیک، گچ، شیل، و ماسه‌سنگهای سبز زیتونی، به صورت برگ برگ در کنار هم قرار داده است (شکل ۲ ت). چینهایی نامتقارن با تمایل جنوب-جنوب شرق در آهکهای فرادیواره این برگه راندگی سمت و سوی حرکت برگه را نیز جنوب-جنوب شرق نشان می‌دهند.

برگه راندگی شاهداری که در برگیرنده سازندهای شمشک، دلیچای، لار و فجن است، روی برگه انبان‌کوه رانده شده است. موقعیت ساختارهای C و S و چینهایی از نوع پیشروی گسل در پیشانی این برگه، سوی حرکت آن را همچون دیگر برگه‌های راندگی منطقه جنوب-جنوب شرق، نشان می‌دهد.

برگه راندگی انبان کوه از واحدهای الیکا و شمشک تشکیل شده و روی برگه راندگی شیربند رانده شده است. این برگه تنها برگه راندگی ساختاری در منطقه مورد مطالعه است که شیب اندکی (۵-۱۰ درجه) به سمت جنوب دارد.

برگه راندگی شیربند سنگهای آذرآواری را که تشکیل دهنده عمده پیکره این برگه ساختاری هستند، روی سازند شمشک وابسته به برگه انبان کوه رانده است. موقعیت ساختارهای S و C در قاعده این برگه راندگی، نشان دهنده حرکت آن به سمت جنوب شرق است.

برگه راندگی انجیرلو مجموعه‌ای از سنگهای پالئوزویک و تریاس متشکل از باروت، لالون، میلا، جیرو، مبارک، و الیکا است که روی نهشته‌های آهکی و آذرآواری ائوسن (زیارت و کرج) رانده شده است (شکل ۲ث). خش‌لغزها و چینهای با تمایل ساختاری به سمت جنوب شرق، مؤید سوی حرکت برگه به سمت جنوب - جنوب شرقی‌اند.

برگه راندگی سفیدکوه به دنباله‌ای از واحدهای مزوزویک و پالئوژن (شمشک، دلیچای، لار، تیزکوه، فجین) اطلاق می‌شود. این برگه با یک راندگی کم‌شیب به سمت جنوب و رانش جنوب - جنوب شرقی، روی برگه‌های شیربند و انجیرلو رانده شده است.

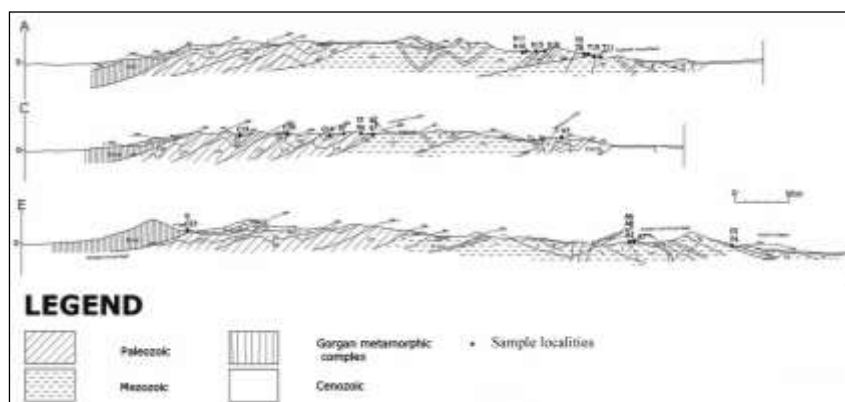
روش بررسی

در اندازه‌گیری کرنش و ریزساختاری بلورهای کوارتز از واحدهای سنگی مناسب که بیشتر از ماسه‌سنگهای غنی از کوارتز سازندهای باروت، لالون، جیرو، درود، شمشک، و حتی در مواردی مبارک، الیکا و واحدهای کرتاسه بوده‌اند استفاده شده است. پراکندگی این سازندها امکان نمونه‌برداری مناسب را فراهم می‌آورد (شکل ۱). نمونه‌برداری جهت‌یافته از این واحدها و در راستای جا به جایی برگه‌های راندگی و در یک برش عرضی از برگه‌های راندگی البرز شرقی، انجام پذیرفته است. "پیشانی برگه راندگی" یا به عبارت دیگر، بهترین محل برونزد قاعده راندگی به‌عنوان مبنایی برای سنجش فاصله از راندگی به سمت فرودیواره و فرادیواره در نظر گرفته شده است. شکل ۱ محل دقیق نمونه‌های برداشت شده را نشان می‌دهد. شکل ۳ نیز ضمن نشان دادن برش‌های عرضی منطقه مورد مطالعه بر اساس نقشه شکل ۱، موقعیت نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

در هر برگه راندگی نمونه‌برداری منظم از پیشانی راندگی و از فرادیواره و فرودیواره آن صورت گرفت. در دو راستای XZ و YZ بیضوی کرنش، بر مبنای راستای راندگی برگه‌ها که از هندسه ساختار S-C موجود در این پهنه‌ها تحلیل شده و به سمت جنوب-جنوب شرق بوده‌اند، مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه شدند.



شکل ۲ الف) قاعده برکه راندگی سیاه‌خانی در شمال روستای تویه‌رودبار، سازند مبارک به سوی جنوب‌شرق روی دنباله‌های نئوژن رانده شده است. دید به سمت شمال. **ب)** چین فرادیواره‌ای برکه راندگی سیاه‌خانی در شمال روستای تویه، دید به سمت شمال‌شرق. **پ)** راندگی فرعی درون برکه راندگی سیاه‌خانی در شمال روستای تویه، دید به سمت غرب. **ت)** بخش خرد شده در فرودیواره برکه طزره، دره تالو در شمال‌شرق دامغان، دید به سمت N005. به جایگزینی به صورت برکه برکه سنگهای آتشفشانی بازیک، گچ، شیل، و ماسه‌سنگهای سبز زیتونی روی هم توجه فرمایید. **ث)** قاعده دوتایی میانی انجیرلو که به وسیله آن طبقات پالئوزویک روی ائوسن شیربند رانده شده است. جاده چشمه‌علی، شمال غرب دامغان، دید به سمت جنوب‌شرق.



شکل ۳ برش‌های زمین‌شناسی از مسیر دامغان-گرگان [۱۲] که روی آنها موقعیت نمونه‌های به‌کار رفته در تحلیل ریزساختاری و کرنش در این بررسی نشان داده شده است. مسیر برشها در شکل ۱ دیده می‌شود. مقیاس افقی و قائم برشها یکسان است.

در مطالعه ریزساختاری و کرنش مقاطع میکروسکوپی، کوارتز به دلیل حساسیت نسبت به تغییرات شرایط دگرشکلی، به‌عنوان یک نشانگر مناسب انتخاب شد و سعی شد تا از بلورهای کوارتزی که ممکن است خاستگاه ثانویه داشته و یا دارای دانه‌هایی با رشد بلوری (Overgrowth) باشند استفاده نشود، گرچه فراوانی این نمونه‌ها نیز قابل ملاحظه نبوده است. در مطالعه کرنش با توجه به بافت سنگها، روش بهنجار Fry [۱۴] انتخاب شده است. در هر نمونه، توزیع دانه‌های کوارتز به عنوان نشانگر مناسب انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار Digitizer و AutoCAD قطرهای بزرگ و کوچک این دانه‌ها اندازه‌گیری شدند تا به‌عنوان داده‌های ورودی به نرم‌افزار In Strain [۱۴] به‌کار گرفته شوند. این نرم‌افزار قادر است مقدار نسبت قطرها (R) را از روش بهنجار Fry [۱۴] به همراه نمودارهای مربوط ارائه دهد.

شکلهای ریزساختاری بلورهای کوارتز در برگه‌های راندگی

فرایند دگرشکلی تا کوچکترین عنصر تشکیل‌دهنده سنگ را متأثر می‌سازد، لذا دگرشکلی سنگها در مقیاسهای متفاوت میکروسکوپی تا مزوسکوپی قابل اندازه‌گیری است. توسعه دگرشکلی در سنگها تابع عوامل داخلی، چون کانی‌شناسی و ترکیب شاره بین دانه‌ای، اندازه و جهت‌یابی ترجیحی دانه و عوامل خارجی همچون فشار، دما، تنش تفریقی، فشار شاره و نرخ کرنش [۱۵]، است. از این رو ریزساختارهای تشکیل‌شده در سنگ از یک سو قابلیت شناساندن این عوامل را خواهند داشت [۱۶]، و از سوی دیگر این پتانسیل را دارند که از آنها برای برآورد و نشان دادن درجه و شرایط دگرشکلی استفاده شود. چنین تغییراتی را می‌توان در سنگهای یک برگه راندگی نیز مشاهده و طی آن به شرایط دگرشکلی برگه راندگی پی برد.

مطالعه ریزساختاری در منطقه مورد مطالعه، جداگانه به ترتیب در سه بخش (۴-۱) برگه‌های راندگی جنوب برگه طزره (شاهدار، انبان کوه، شیربند، انجیرلو، سفیدکوه)، (۴-۲) برگه راندگی طزره، و (۴-۳) برگه راندگی سیاه‌خانی صورت گرفته است.

در (۴-۱) ریزساختارهای شناسایی شده در بلورهای کوارتز موجود در نمونه‌های سنگی برداشت شده از برگه‌های راندگی جنوب برگه طزره در جدول ۱ آمده‌اند. محل نمونه‌ها نیز در شکل‌های ۱ و ۳ مشخص شده‌اند. قابل ذکر است که به جهت رعایت خلاصه‌نویسی در این نوشتار تنها به تعداد محدودی از نمونه‌ها در جدول اشاره شده است.

این ریزساختارها بیشتر به صورت گسترش خاموشی جارویی تا جارویی شدید در بلورهای کوارتز (شکل ۴) در سنگ دیده می‌شوند. گرچه فرایندهای تبلور دوباره مثل زیردانه‌گی (شکل ۵) و گاهی به صورت زیردانه‌های دوباره تبلور یافته (شکل ۶) دیده می‌شوند. افزایش درصد این ریزساختارها، گواهی بر افزایش دگرشکلی درون بلوری در بلورهای کوارتز است. چنین ریزساختارهایی بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی [۷] نشان از رژیم ۱ دگرشکلی تقریباً درمای دگرشکلی کمتر از 300°C دارد. قابل ذکر است که در این بررسی ریزساختارهای موجود در فلدسپات نیز مورد توجه قرار گرفته است، که بیشتر تنها در حد سرسیتی شدن تغییر کرده‌اند. چنین تغییراتی از بلورهای فلدسپات (همچون کوارتز) مؤید پیدایش دگرشکلی در دماهای پایین تا حد کمتر از 300°C است.

(۴-۲) در جدول ۱ ویژگی‌های سنگ‌شناسی و ریزساختاری شناسایی شده در بلورهای کوارتز نمونه‌های انتخاب شده از برگه راندگی طزره ارائه شده است. مکان نمونه‌ها نیز در شکل ۱ مشخص است. به‌طور کلی با نزدیک شدن به قاعده راندگی در فرودیواره، ریزساختارهای مربوط به درجات بالاتر دگرشکلی چون خاموشی جارویی شدید و تیغه دگرشکلی گسترش یافته و فراوانی بیشتری می‌یابند. چنین ریزساختارهایی جایگزین ریزساختارهای مربوط به درجات دگرریختی پایین‌تر چون خاموشی موجی شده‌اند که در بخش‌های پایین‌تر برگه راندگی در فرودیواره دیده می‌شوند.

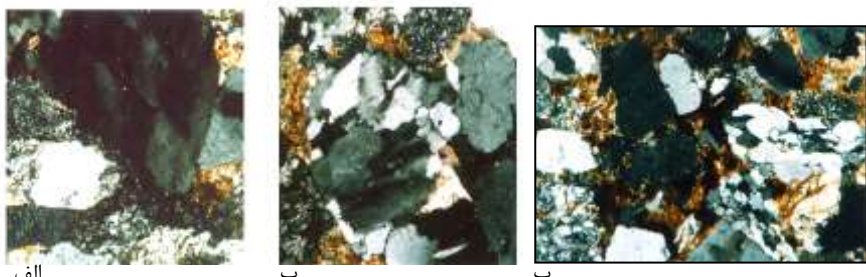
ریزساختارهای تشکیل شده در قاعده راندگی طزره، گواه بر افزایش میزان دگرشکلی به سمت این قاعده است. گسترش خاموشی جارویی شدید درصد بسیار بالایی از دانه‌های کوارتز به همراه تشکیل زیردانه‌های ریز نیز فراهم بوده است (نمونه T8 در جدول ۱) و در کرانه برخی دانه‌های کوارتز، دانه‌های ریز جدید نیز گسترش یافته است که حاکی از افزایش به سمت دگرشکلی در قاعده راندگی است. با حرکت به سمت شمال و فاصله گرفتن از قاعده راندگی، فرادیواره برگه، ریزساختارهای غالب در بلورهای کوارتز مثل خاموشی جارویی شدید، گسترش زیردانه‌های نسبتاً درشت و تشکیل تیغه دگرشکلی است. مقایسه این ریزساختارها با انواع آنها در نمونه‌های فرودیواره برگه راندگی خود گواهی بر توزیع عمده دگرشکلی در فرادیواره برگه راندگی نسبت به فرودیواره آن است.

جدول ۱ ویژگیهای کانی‌شناسی و ریزساختاری نمونه‌های برداشت شده از برگه‌های راندگی منطقه مورد مطالعه (از شمال به جنوب به متر). موقعیت نمونه‌ها نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

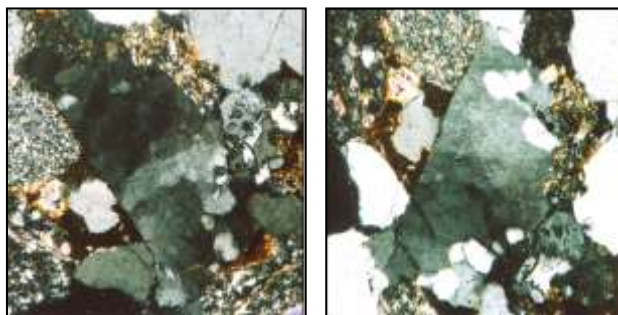
شماره نمونه	کانی شناسی	نام سنگ	فاصله نمونه به پیشانی راندگی (به متر)	ریزساختارها (Microstructures) در بلور کوارتز
C23	کوارتز، فلدسپار، کلریت، زویزیت، اندکی موسکوویت	فیلیت (سازندقل قلع)	۶۰ متر به قاعده گرگان	خاموشی جارویی شدید، کشیدگی و روبان شدگی کوارتز، گسترش solution cleavage
g 7	کوارتز ۹۵٪ >، فلدسپار ~ ۵٪	کوارتز آرنایت (سازند درود)	۶۱۵۷ به قاعده سیاه‌خانی	خاموشی جارویی شدید، برآمدگی مرز بلوری (G.B.B.) Grian Boundary Bulging ضعیف
N6	کوارتز ۹۵٪ ≥، کلسیت ۲٪، لیتیک (چرت) ۷٪	کوارتز آرنایت (سازند مبارک)	۱۱۳۹ به قاعده سیاه‌خانی	خاموشی موجی و جارویی شدید، ساختار زبردانه، G.B.B.، تیغه دگرشکلی
g 1	کوارتز ۹۰٪ ≥، فلدسپار ۸-۷٪، لیتیک (چرت) ۱٪ در زمینه‌ای از سیمان کلسیتی	کوارتز آرنایت (سازند جبرود)	۸۸۸ به قاعده سیاه‌خانی	خاموشی جارویی شدید، تیغه دگرشکلی، ساختار زبردانه و G.B.B. ضعیف
t 5	دانه‌های کوارتز بسیار دانه ریز حدود ۴۴ میکرون ۱۰-۱۵٪، قطعات کلسیتی و فسیلی و آهن	Pack stone (مبارک)	قاعده سیاه‌خانی	خاموشی جارویی و موجی
B16	کوارتز ۹۰٪ >، آلبیت ۳-۴٪، اندکی موسکوویت، کربنات، آهن	کوارتز آرنایت (سازند شمشک)	۳۳۵۴ متر به قاعده طزره	خاموشی جارویی شدید و تیغه دگرشکلی
T8	کوارتز ~ ۷۰٪، آلبیت ۲۰-۲۵٪، آرکوز (واحدهای چرت ۱-۲٪، کلسیت و کربنات و موسکوویت و اوپک ~ ۳٪)	آرکوز (واحدهای خردشده قاعده راندگی)	قاعده طزره	خاموشی جارویی شدید، روبان شدگی، تبلور دوباره و ایجاد ریزبلورهای جدید در حواشی دانه‌ها، گسترش solution cleavage و تشکیل space cleavage
D0	کوارتز ۵۰-۶۰٪، فلدسپار (آنورتیت و آلبیت) ۲۰٪، چرت ۲۰-۲۵٪، موسکوویت، کلسیت و قطعات ولکانیکی ۵٪ <	لیت آرنایت (آذرآواریهای - ائوسن)	۱۶۴ به قاعده طزره	خاموشی جارویی شدید، ساختار زبردانه با مرزهای دندانه‌ای. گسترش مناسب G.B.B. و زیرساختار Sub grain Rotation Recrystallization (S.R.R.)
B7	کوارتز ~ ۷۰٪، فلدسپار، اندکی چرت، موسکوویت و کلسیت	سیلتستون (سازند روته)	۹۸۱ به قاعده طزره	خاموشی جارویی و جارویی شدید
B1	کوارتز ۷۰٪ >، زمینه ۱۵٪ > و اندکی فلدسپار	سیلتستون (سازند شمشک)	۲۹۰ به قاعده شیربند	خاموشی موجی و خاموشی جارویی شدید
A6	کوارتز ۹۰٪ >، فلدسپار ۵٪، موسکوویت، کربنات و اوپک ۵-۱۰٪	کوارتز آرنایت (سازند شمشک)	۹۰ به قاعده شاهد	خاموشی موجی و خاموشی جارویی شدید، ساختار زبردانه و توسعه G.B.B.
A7	کوارتز ~ ۴۰٪، چرت ۳۰-۴۰٪، فلدسپار ۲۰-۳۰٪، کانیهای وپک، موسکوویت و کربنات در زمینه	لیت آرنایت (سازند شمشک)	۲۴۷ به قاعده انبان کوه	خاموشی جارویی شدید، ساختار زبردانه و S.R.R. به‌طور محدود



شکل ۴ خاموشی جارویی شدید، از چپ به راست نحوه تغییر خاموشی به خوبی دیده می شود،
10x, XPL



شکل ۵ الف وب) Subgrain و پ) New grain ، 6.3x ، XPL ، این سه تصویر به ترتیب مراحل رشد
و تکامل Sub grain را تا New grain نشان می دهند.



شکل ۶ ریزساختار Sub grain rotation recrystallization که به ترتیب با چرخش میز میکروسکوپ
sub grain هایی که در حال تبدیل به یک دانه مجزا هستند به گونه ای واضحتر نمایان می شوند،
6.3x , XPL

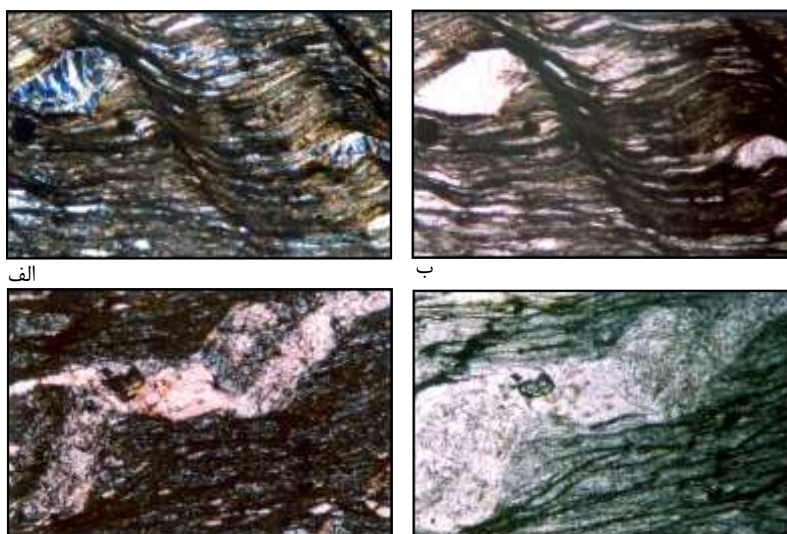
ریزساختارهای مطالعه شده، بر مبنای مطالعات آزمایشات تجربی [۷] بیانگر گسترش رژیم
۱ دگرشکلی در فرادیواره یا فرودیواره برگه راندگی طزره و پیشرفت رژیم ۲ دگرشکلی (معادل
۳۰۰°C در قاعده برگه راندگی طزره است. این وضعیت از آماده شدن شرایط مطلوب برای

فرایندهای بهبود دگرشکلی در قاعده و کاهش چگالی نقص بلوری به سمت قاعده برگه حکایت دارد.

(۳-۴) ویژگیهای سنگ شناسی و شناسایی ریزساختاری در بلورهای کوارتز نمونه‌های انتخابی از برگه سیاه‌خانی در جدول ۱ آمده است. شکل ۱ نیز محل برداشت این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

بررسی ریزساختارهای کوارتز نمونه‌های این برگه راندگی نشان داد که با حرکت به سمت شمال (بخشهای بالایی برگه)، از درصد ریزساختارهای مربوط به دماهای بالاتر-که مربوط به اعماق بیشتر دگرشکلی است- مثل خاموشی جارویی شدید به اندازه قابل توجهی کاسته می‌شود. این کاهش در دیگر ریزساختارها مانند تیغه دگرشکلی نیز قابل مشاهده است. بنابراین در برگه راندگی سیاه‌خانی فرایندهای دگرشکلی در اکثر موارد در حد رژیم ۱ دگرشکلی کوارتز [۷] (معادل کمتر از 300°C)، پیش رفته‌اند.

ریزساختارهای موجود در نمونه‌های برداشت شده از بخشهای شمالی‌تر برگه سیاه‌خانی که در فرودیواره برگه گرگان قرار دارد افزایش دگرشکلی بلورهای کوارتز را تا حد نواری شدن آنها نشان می‌دهد. حتی در مواردی می‌توان به صورت پراکنده مقدمات تشکیل کلیواژ فاصله‌دار و نیز کلیواژ برگوار (شکل ۷) را نیز مشاهده کرد. بنابراین می‌توان گفت دگرشکلی در این بخش که متأثر از دگرشکلی برگه راندگی گرگان است، تا حد درجات بالاتری نیز عمل نموده است.



شکل ۷ الف) crenulation cleavage در بافت سنگ. XPL. 6.3x (ب) همین ریزساختار PPL. پ) کشیدگی و نوارشدگی کوارتز XPL. 6.3x. ت) همین ریزساختار PPL.

اندازه‌گیری میزان کرنش نهایی برگه‌های راندگی

برگه‌های راندگی حین جا به جایی و جایگزینی، دستخوش کرنش می‌شوند. مطالعه این کرنش که نشان دهنده دگرشکلی درونی برگه‌های راندگی است و به دست آوردن نیمرخ از آنها برای بررسی، بینشی در آگاهی از ساز و کار حرکت و جایگزینی راندگیها فراهم می‌آورد.

توزیع کرنش در یک برگه راندگی ناهمگن است و نوع واحد سنگی و ساختارهای همراه و درجه دگرگونی، بر این ناهمگنی موثر است. با این حال اندازه‌گیری میزان کرنش نهایی نمونه‌هایی از برگه‌های راندگی یک منطقه، نه تنها می‌تواند در آگاهی از هندسه و تحول جنبشی سیستم برگه‌های راندگی به کار رود، بلکه می‌تواند در برآورد خاستگاه آنها نیز مفید واقع شود [۱۱]. لذا در این مقاله علاوه بر داده‌های ریزساختاری، اندازه‌گیری کرنش نهایی برای تعیین شرایط دگرشکلی حاکم بر برگه‌های راندگی از طریق اندازه‌گیری کرنش نهایی بلورهای کوارتز در سنگهای غنی از کوارتز، صورت گرفته است.

مطالعه کرنش نهایی نیز روی همان نمونه‌هایی که بررسی ریزساختاری آنها در جدول ۱ ارائه شده‌اند صورت گرفته است. این نمونه‌ها نیز از ۱) برگه‌های راندگی جنوب برگه طزره ۲) برگه راندگی طزره ۳) برگه راندگی سیاه‌خانی هستند. مقادیر کرنش نهایی اندازه‌گیری شده از نمونه‌های این برگه‌های راندگی در جدول ۲، و مکان نمونه‌ها نیز در شکل ۱ آمده است.

چنانکه جدول ۲ نشان می‌دهد کرنش نهایی اندازه‌گیری شده به روش Fry، مقادیر اندکی را در هر برگه راندگی نشان می‌دهد که بین ۱،۱ تا ۱،۵ متغیر است. هرچند می‌توان گفت کرنش نهایی تغییرات تقریباً یکنواختی را در این بخش از کوهزاد البرز داراست. شکل ۸ نمونه‌ای از شکل بیضویهای کرنش نهایی اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

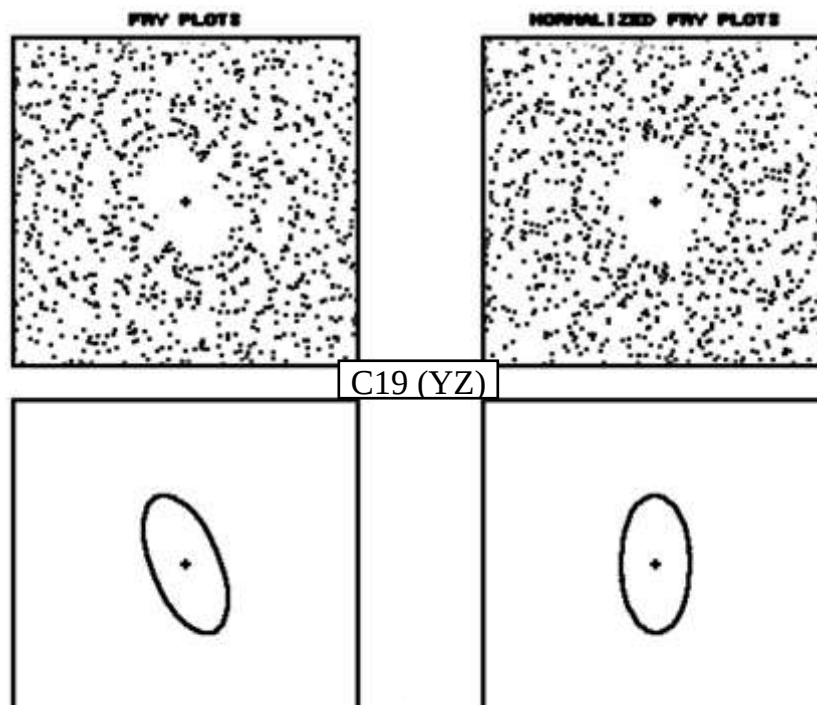
مطالعه کرنش نهایی به روش Fry بر روی نمونه‌هایی از برگه طزره در برشی از فرادیواره تا قاعده راندگی و از آنجا تا فرادیواره برگه راندگی انجام شده است. این برگه نیز همچون برگه‌های جنوبی آن، میزان پایینی از کرنش نهایی را نشان می‌دهد (از ۱،۱ تا ۱،۳). کرنش اندازه‌گیری شده با استفاده از دیگر نشانگرهای کرنش در این برگه راندگی، مثل لکه‌های احیایی تشکیل شده در سازند لالون و یا آمونیت‌های فراوان موجود در سازند دلیچای نیز کم و بیش همین مقدار را نشان داده‌اند (به ترتیب ۱،۲۷۳ و ۰،۹۹۲).

به‌طور کلی توزیع کرنش نهایی اندازه‌گیری شده در این برگه به‌گونه‌ای است که می‌توان به‌طور نسبی افزایش منظمی را در مقادیر کرنش نهایی به سمت قاعده راندگی طزره مشاهده کرد. در فرادیواره این برگه میزان کرنش نهایی نمونه‌ها نسبتاً یکنواخت و پایین است (جدول ۲).

الگوی کرنش نهایی اندازه‌گیری شده روی نمونه‌هایی از برگه راندگی سیاه‌خانی به روش Fry نیز به گونه‌ای نیست که بتوان توزیع کرنش مشخصی را به صورت کاهش یا افزایش منظم میزان آن به سمت قاعده برگه تشخیص داد. چرا که مقادیر اندازه‌گیری شده به طور کلی پایین است و کمتر از ۱/۴ را نشان می‌دهند. گرچه میزان کرنش نهایی در برخی نمونه‌های بخشهای میانی برگه و حتی در فاصله تقریبی ۱۱۰۰ متر از قاعده برگه، مقدار بالاتری از کرنش نهایی را معادل ۱/۳۹۶ در نمونه N6 نسبت به نمونه‌های نزدیکتر به قاعده برگه معادل ۱/۱۵ در نمونه t5 نشان می‌دهند. چنین توزیعی از کرنش را می‌توان به وجود زبانه‌های راندگی در فرادیواره برگه راندگی نسبت داد. از آنجا که نمونه N6 علاوه بر دارا بودن میزان بالاتری از کرنش نهایی از نظر ریزساختاری نیز حد بالاتری از دگرشکلی را نشان می‌دهد (جدول ۱) شاید بتوان گفت قاعده برگه راندگی سیاه‌خانی در حقیقت در این محل واقع شده است و آنچه که [۱۲] شناسایی کرد یکی از زبانه‌های فرودیواره‌ای این راندگی است.

جدول ۲ مقادیر تنش نهایی اندازه‌گیری شده در برگه‌های راندگی منطقه مورد مطالعه. روند تغییرات XZ به موازات سمت حرکت اندازه‌گیری شده است. بعد سوم تنش یعنی میزان تنش نهایی در صفحه XY نیز از رابطه $R_{XZ} = R_{XY}R_{YZ}$ به دست آمد.

شماره نمونه	Normalized Fry			فاصله نمونه از پیشانی راندگی بر روی زمین (متر)
	XZ	YZ	XY	
C18	۱,۴۱۱	۱,۲۸۶	۱,۰۹۷	از قاعده سیاه‌خانی ۱۳۲۶
g2	۱,۱۵۲	۱,۲۵۴	۰,۹۱۸	۱۷۳۶
N6	۱,۳۹۶	۱,۴۲۹	۰,۹۷۶	۱۱۳۹
g1	۱,۱۳	-	-	۸۸۸
B16	۱,۱۸۱	۱,۳۵۸	۰,۸۶۹	از قاعده طوزه ۳۳۵۴
D0	۱,۳۱۵	۱,۳۲۶	۰,۹۹۱	از قاعده طوزه ۱۶۴
B7	۱,۲۵۶	۱,۴۵۳	۰,۸۶۴	۹۸۱
T10	۱,۳۶۷	۰,۹۲۷	۱,۴۷۴	۱۸۳۳
T11	۱,۱۱۴	۱,۱۲	۰,۹۸۹	۲۴۱۲
B1	۱,۱۷۶	-	-	از قاعده شیربند ۲۹۰
B2	۱,۵۸۲	۱,۴۷۳	۱,۰۷۳	از قاعده شیربند ۳۱۳
A8	۱,۲۶۳	۱,۲۱۶	۱,۰۳۸	از قاعده انبان کوه ۵۱۴
E5	۱,۲۶۷	۱,۳۹۵	۰,۹۰۸	قاعده انجیلو



شکل ۸. نمونه‌هایی از محاسبه بیضویتهای تنش پلاستیکی با روش Fry و بهنجار Fry با نرم افزار Instron (Erslev, 1988).

تحلیل نتایج

تحلیل ریزساختاری

همه ریزساختارهای مشاهده شده در مقاطع نازک نمونه‌های مورد مطالعه از برگه‌های راندگی البرز شرقی دال بر فعال بودن فرایندهای دگرشکلی پلاستیک در کوارتزند. بررسی نتایج حاصل از مطالعات ریزساختاری نشان می‌دهد که به‌طور کلی درجات پایینی از دگرشکلی، حداکثر تا رژیم ۱ دگرشکلی کوارتز، (البته به استثنای گرگان و طزره) بر این برگه‌های راندگی حاکم بوده است. این در حالیست که شواهد گویای برقراری درجات بالاتری از دگرشکلی در قاعده برگه طزره و برگه راندگی گرگان است. بر اساس آنچه که در مطالعه ریزساختارها مشاهده می‌شود، می‌توان چنین استنباط کرد که برگه راندگی سیاه‌خانی در شرایط شکننده جایگزین شده است، در حالیکه بر اساس همین شواهد، شرایط شکل‌پذیرتری در طول دگرشکلی و جایگزینی برگه‌های راندگی طزره و گرگان، برقرار بوده است.

بدیهی است که ایجاد چنین شرایطی از دگرشکلی مرهون خاستگاه برگه‌های راندگی است. بر این مبنا برگه‌راندگی سیاه‌خانی خاستگاه کم‌عمق‌تری نسبت به برگه‌های راندگی طزره و گرگان دارد. از این‌رو برگه‌راندگی طزره و گرگان احتمالاً از جایی که انتقال از تغییر شکل شکننده به شکل‌پذیر رخ می‌دهد ریشه گرفته باشند. بنابراین، خاستگاهی عمیق‌تر نسبت به دیگر برگه‌های راندگی پیش بومی البرز شرقی در برش ساختاری دامغان-گرگان دارند.

مطالعات فراوان انجام شده ریزساختاری برگه‌های راندگی در بخش‌های مختلف مناطق کوهزادی، نشان از کاهش میزان دگرشکلی به سمت برگه‌های پیش بومی دارد [۸، ۹، ۱۰]. الگوی ریزساختاری موجود در این برش ساختاری نیز منطبق بر این مناطق بوده و جایگاه زمین‌ساختی پیش‌بومی را برای برگه‌های راندگی البرز شرقی نشان می‌دهد.

تحلیل کرنش نهایی

کرنش نهایی برگه‌های راندگی در برش دامغان-گرگان، ناسازگاریهایی را بین مقادیر اندازه‌گیری شده با موقعیت‌هایی که نمونه‌ها از آنها برداشت شده‌اند، نشان می‌دهد. به عنوان یک عامل اولیه نمی‌توان نقش واحدهای سنگی را به عنوان پارامتری موثر بر میزان پذیرش کرنش نادیده انگاشت. تاثیر ساختارهای زمین‌شناسی جزئی که به دلیل خطای انسانی از نظر دور مانده‌اند نیز خود عاملی دیگر بر این ناسازگاریهاست.

از سوی دیگر، برخی از برگه‌های راندگی این برش ساختاری همچون طزره، خود به وسیله گسل‌های متعدد و یا عرضی همچون گسل آستانه قطع شده‌اند. برخی دیگر نیز مانند انجیرلو و سیاه‌خانی، از گسل‌های همپوشانی متعدد درون برگه‌ای تشکیل شده‌اند [۱۲]. وجود زبانه‌های فلسی متعدد در پیکره این برگه‌ها، از دیگر کنترل‌کننده‌های توزیع کرنش در برگه‌هاست، زیرا در سطوح بالایی پوسته، دگرشکلی و کرنش به شدت تحت تاثیر شبکه شکستگیها و گسل‌هاست [۹]. در شکل ۹ الگوی تغییرات روند کرنش نهایی طرحدار نشان داده شده است. الگوی زیگزاگی مشاهده شده، از تغییرات میزان کرنش نهایی در برگه‌های راندگی سیاه‌خانی (شکل ۹ الف) و طزره (شکل ۹ ب) بیانگر وجود تجمعی از زبانه‌های راندگی بوده و مستقل از چین‌های درون برگه‌ای و یا تنوع واحد سنگی است و خود ابزار ارزشمندی در تعیین موقعیت راندگی‌های درون برگه‌ای به شمار می‌آید.

مقدار ثبت شده کرنش نهایی اندازه‌گیری شده از برش‌های YZ در برخی نمونه‌های برگه راندگی طزره از مقدار به دست آمده برای XZ آن نمونه‌ها بالاتر است (جدول ۲). به نظر می‌رسد عبور گسل‌های عرضی از منطقه، مانند گسل آستانه که به طور عرضی برگه طزره را قطع می‌کند، دلیلی برای آن باشد، زیرا بیانگر چرخش بیضوی کرنش در این مناطق و قرار گرفتن

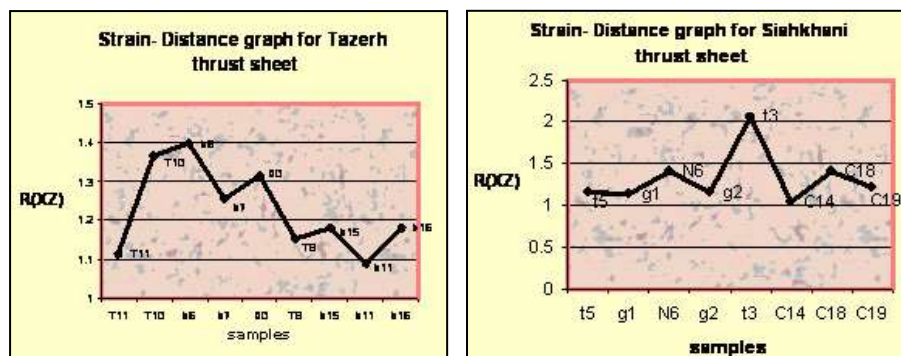
صفحه XZ آن به موازات صفحه YZ گسل عرضی با ساز و کار غالب امتداد لغزش است. در نمونه‌های B7, B16, E5 و g2 این حالت نمود بارزتری دارد (جدول ۲).

از دیگر نکاتی که از اندازه‌گیری کرنش نهایی نمونه‌های برگه‌های راندگی به دست آمده، میزان پایین کرنش نهایی آنهاست. این ویژگی را می‌توان با پایین بودن مقدار کوتاه‌شدگی به موازات لایه‌بندی (LPS) در منطقه توجیه کرد. ازسوی دیگر نمودارهای فلین تهیه شده برای نمونه‌های هر برگه راندگی (شکل ۱۰) نیز نشان می‌دهند که بیشتر این نمونه‌ها در گستره $0 \leq K < 1$ یعنی پهن‌شدگی ظاهری واقع می‌شوند که با موقعیت بیضویهای کرنش برگه‌های راندگی در مناطق پیش‌بومی کوهزادی مطابقت دارند.

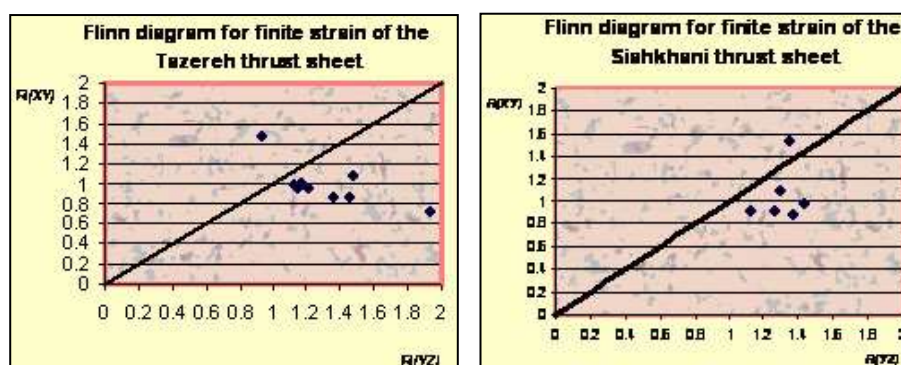
براین اساس و نیز بر مبنای شواهد ریزساختاری، به نظر می‌رسد در منطقه مورد مطالعه، گسلش راندگی به عنوان مهمترین عامل دگرشکلی عمل کرده است. این گسله‌های راندگی با توجه به میزان کرنش پایین و ریزساختارهای با درجه دگرریختی پایین از نوع برگه‌های راندگی پیش‌بومی بوده که متأثر از کوهزاد آلی است. لذا این کوهزاد اصلی‌ترین نقش را در شکل‌دهی این برگه‌های راندگی پیش‌بومی در این بخش از البرز شرقی داشته و هندسه ساختاری کنونی آن را به صورت یک کمر بند چین‌خورده-رانده درآورده است.

میدان بردار جا به جایی به عنوان ابزاری برای به دست آوردن نیمرخ دگرشکلی در یک برگه راندگی است. بر پایه بررسی‌های [۱۰]، میزان جا به جایی کلی، قابل تقسیم به دو مولفه است. مولفه انتقال کپه‌ای در امتداد گسل راندگی، که می‌تواند به صورت میانگین لغزش متوسط برگه راندگی (در برشی درجهت جا به جایی راندگی) اندازه‌گیری شود. مولفه دیگر دگرشکلی درونی برگه راندگی است که با استفاده از میزان کرنش نهایی-که شامل پیش قبل از رانده شدن و نیز دگرشکلی در طول رانده شدن است-اندازه‌گیری می‌شود.

به نظر می‌رسد در منطقه مورد مطالعه، مولفه انتقال کلی در میدان بردار جا به جایی کل، بزرگتر از مولفه دگرشکلی درونی برگه راندگی عمل کرده است. به این ترتیب می‌توان گفت ساز و کار جایگزینی برگه‌های راندگی معرفی شده در پیش بوم البرز شرقی در منطقه مورد مطالعه، با مدل [۱۰] سازگاری بیشتری دارد که بر آن اساس، جایگزینی برگه‌های راندگی به صورت لغزش و انتقال بلوکهای سنگی روی سطوح گسلی انجام شده و در نتیجه با میزان بسیار پایین دگرشکلی درونی در بلوک سنگی همراه بوده است.



شکل ۹ نمودار تنش نهایی - فاصله برای دو برگه راندگی الف) سیاه‌خانی ب) طزره.



شکل ۱۰ نمودار فلین برای دو برگه راندگی الف) سیاه‌خانی ب) طزره.

برداشت

- ریزساختارهای تشکیل شده در بلورهای کوارتز در غالب برگه‌های راندگی، نشان‌دهنده پیدایش دگرشکلی در درجات پایین ($300^{\circ}\text{C} \leq$) هستند. نمونه‌های برگه‌های راندگی طزره و گرگان درجات بالاتری را نشان می‌دهند.
- توزیع کرنش درون هر برگه راندگی نظم مورد انتظار برگه‌های راندگی پیش‌بومی را ندارد و نمی‌توان گردایان کرنش روشنی را برای آن در نظر گرفت. علل تاثیرگذار را می‌توان قطع شدن برگه به وسیله گسل‌های عرضی (چون گسل آستانه)، گسل‌های همپوشانی متعدد درون برگه‌ای و یا حتی عامل لیتولوژی-که موجب توزیع کرنش می‌شود دانست. اما تغییرات ریزساختاری در هر برگه راندگی به گونه‌ایست که می‌توان گفت دگرشکلی بیشتر به صورت افزایش دگرشکلی درون بلوری به سمت قاعده راندگی افزایش می‌یابد.

- اشکال ریزساختاری در برگه سیاه‌خانی و برگه‌های جنوبی برگه طزره بیانگر عمق کم خاستگاه این برگه‌هاست، از این‌رو دگرشکلی حاکم بر آنها شکننده است. در حالیکه اشکال ریزساختاری برگه راندگی طزره به‌ویژه در قاعده آن و برگه گرگان، مبین آن است که این برگه‌ها خاستگاهی عمیقتر داشته و احتمالاً ازجاییکه انتقال از تغییرشکل شکننده به شکل‌پذیر رخ می‌دهد سرچشمه گرفته باشند.
- پایین بودن میزان کرنش نهایی نمونه‌های برگه‌های راندگی بیان از آن دارد که دگرشکلی درونی نمونه‌ها که بیشتر به‌صورت کوتاه‌شدگی به موازات لایه‌بندی به وجود می‌آید، مقدار ناچیزی است. این مسئله بیانگر آن است که، برگه‌های راندگی به صورت لغزش و انتقال بلوکهای سنگی روی سطوح گسلی قاعده راندگی جایگزین شده‌اند. لذا برگه‌های راندگی از نوع پیش‌بومی مناطق کوهزایی هستند که البرز شرقی را به صورت یک کمربند چین‌خورده-رانده درآورده‌اند. برگه راندگی گرگان با درجه بالاتر دگرشکلی از نوع برگه‌هایی است که در انتقال از بخش پیش‌بوم به پشت کران کوهزاد به‌وجود آمده‌اند، بنابراین زمین‌ساخت غالب بر دگرشکلی برگه‌های راندگی البرز شرقی از نوع نازک‌پوسته است.

مراجع

- [1] Burkhard M., "Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonics regimes: a review", J. Structural Geology 15(1993), 351-368.
- [2] Tullis J., Yund R., "Diffusion creep in feldspar aggregates: experimental evidence", J. Struct. Geol. 13(1991), 987-1000.
- [3] Yassaghi A., James P. R., Flottmann T., "Geometric and kinematic evolution of asymmetric ductile shear zones in thrust sheets southern Adelaide fold – thrust belt, South Australia", J. Struct. Geol. 22(2000), 889-912.
- [4] Evans D. J., White S. H., "Micro structural and fabric studies from the rocks of the Moine Nappe, Eriboll, NW Scotland", J. Struct. Geol. 6(1984), 369-389.
- [5] Ferrill D. A., "Calcite twin morphology: a low-temperature deformation geothermometer", J. Struct. Geol. 26(2004) 1521-1529.
- [6] Lloyd G. E., Freeman B., "Dynamic recrystallization of Quartz under Greenschist condition", J. Struct. Geol. 16(1994), 867-881.
- [7] Hirth G., Tullis J., "Dislocation creep regimes in Quartz aggregates", J. Struct. Geol. 14(1992), 145-159.
- [8] Mukul M., Mitra G., "Finite strain and strain variation analysis in the Sheeprock thrust sheet: an internal thrust sheet in the Provo salient of the

- Sevier fold-and-thrust belt, Central Utah", J. Struct. Geol. 20 (1998), 385-405.
- [9] Dittmar D., "Strain partitioning across a fold and thrust belt: the Rhenish Massif, Mid-European Variscides", J. Struct. Geol. 16(1994), 1335-1352.
- [10] Mitra G., "Strain variation in thrust sheets across the Sevier fold-and-thrust belt (Idaho-Utah-Wyoming): implications for section restoration and wedge taper evolution", J. Struct. Geol. 16(1994), 585-602.
- [11] Gray D. R., Willman C. E., "Thrust-related strain gradients and thrusting mechanisms in a chevron-folded sequence, southeastern Australia", J. Struct. Geol. 13(1991), 691-710.
- [۱۲] رحیمی بهنام، "مطالعات ساختاری رشته کوه البرز در شمال دامغان"، پایان نامه دکتری دانشگاه شهید بهشتی، (۱۳۸۱).
- [۱۳] قاسمی محمد رضا، "زمین شناسی، چینه شناسی و زمین شناسی ساختمانی ناحیه چهارده (البرز خاوری)"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران، (۱۳۶۹).
- [14] Erslev E. A., "Normalized center-to-center strain analysis of packed aggregates", J. Struct. Geol. 10(1988), 201-209.
- [15] Passchier C. W., Trouw R. A., "Microtectonics", 1998, Springer Press, Germany.
- [16] White J. C., White S. H., "Semi- brittle deformation within the Alpine fault zone, New Zealand", J. Struct. Geol. 5(1983), 579-589.