



بررسی فرکتال مرز دانه‌های کوارتز در گرانیت گنیس آبادچی، شمال شهرکرد

فریبا ریاحی سامانی^{*}، ناهیدشبانیان بروجنی^{*}، علیرضا داودیان دهکردی، بهناز بختیاری

دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

(دریافت مقاله: ۹۷/۳/۵، نسخه نهایی: ۹۷/۷/۱۶)

چکیده: توده گرانیت گنیس آبادچی در شمال دریاچه زاینده‌رود، در پهنه ساختاری سنندج-سیرجان قرار دارد. این توده از نظر کانی‌شناسی، دارای کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپات پتاسیم، آمفیبول، موسکوویت، زیرکن، اسفن و آلانیت است. کوارتز یکی از فراوان‌ترین کانی‌های سازنده‌ی این سنگ‌هاست که از نظر بافتی شرایط متفاوت دگرشکلی دینامیکی وارد بر سنگ‌های مورد بررسی را به خوبی نشان می‌دهد. بلورهای کوارتز شواهدی از باز تبلور کانی (BLG)، چرخش زیردانه‌ای (SGR) و مهاجرت مرزدانه‌ای (GBM) را نشان می‌دهند. تغییر شکل بلورهای کوارتز وابسته به دما و نرخ کرنش است که توسط نمودار دما/نرخ کرنش می‌توان مقدار تغییر شکل را برآورد کرد. بطوری که، مقدار بعد فرکتال در مرز بلورهای کوارتز سنگ‌های مورد بررسی بین ۱/۱۱ تا ۱/۲۲ می‌توان بین ۴۰۰-۴۵۰ تا ۷۵۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است. براساس دما و بعد فرکتال محاسبه شده، نرخ کرنش برای چهار گستره اندازه-گیری شده بین $10^{-11/6}$ - $10^{-6/6}$ است. نتایج بدست آمده از نمودارها با شواهد دگرشکلی بلورهای کوارتز (GBM, SGR, BLG) همخوانی داشتند.

واژه‌های کلیدی: گرانیت گنیس؛ مرز دانه‌های کوارتز؛ فرکتال؛ نرخ کرنش؛ دگرشکلی؛ آبادچی؛ پهنه سنندج-سیرجان.

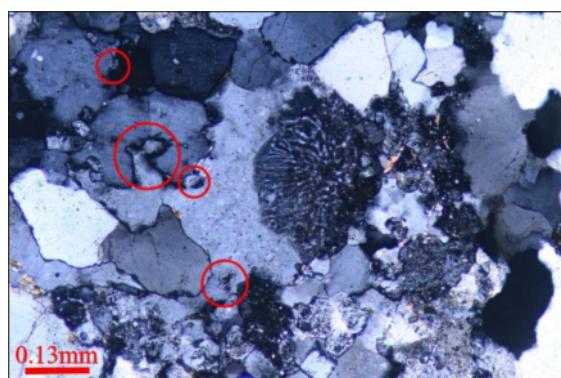
دانه‌های همه کانی‌ها ایجاد شوند. این درزها در بلورهای کوارتز به خوبی شناخته شده‌اند؛ برای مثال، در سنگ‌های رخساره شیست سبز در مرز دانه کوارتز، درزها (حدود $10\text{ }\mu\text{m}$) به خوبی می‌توانند ایجاد شوند [۱].

هندرسون فرکتال روشی برای تعیین کمیت‌هایی مانند شکل-های پیچیده و نامنظم ارائه می‌دهد [۲، ۳]. آزمایش‌های بسیاری در مورد انواع مرزهای بین مایعات مختلف و گسترش فرکتال بین‌انگشتی انجام شده‌است [۵]. به نظر می‌رسد که نوع بین‌انگشتی به چسبندگی نسبی مایعات و مرز تنش مربوط باشد [۶]. اگر مایعات از طریق یک محیط متخلخل مهاجرت کنند مرزهای فرکتال تشکیل می‌شوند. به طور عمده مرز فرکتال‌ها در این ساختارها بی‌نظم هستند [۴]. شکل‌هایی که از نظر آماری یکسان هستند را می‌توان با هندسه فرکتال بررسی کرد. در این صورت یک راه برای بررسی منحنی‌های

مقدمه

مرزهای بین بلورهای یک کانی در سنگ‌های دگرگونی و آذرین در شرایط ویژه‌ای به صورت بین‌انگشتی دیده می‌شوند. هر انگشت یک برآمدگی یا درز از مرزدانه را در مقیاس مختلف نشان می‌دهد (شکل ۱). در طول مرز دانه، اتم یا گروهی از اتم‌ها ساختار بلوری خود را ترک کرده و با جایگیری در آن نزدیکی، و باعث تشکیل این مرزها می‌شوند. این انتشار مربوط به پارامترهای مختلف، به عنوان مثال راستای بلورشناسی نسبی دانه مجاور و یا دما، یعنی ارتعاش اتم‌ها در ساختار بلوری است. تغییر شکل بلورهای مجاور دلیلی برای مهاجرت و ساختار بین-

انگشتی مرز مشترک آن‌ها در نظر گرفته شده است (کرنش ناشی از مهاجرت مرز دانه، [۱، ۲]). با توجه به تحلیل‌های آماری، با افزایش دما طول مرز افزایش می‌یابد اندازه درزها می‌تواند اساس اندازه‌گیری دمای تشکیل باشد درزها می‌توانند در مرز



شکل ۱ نمای میکروسکوپی از درز و مرزهای بین انگشتی دانه‌های کوارتز (مرزها با دایره‌های قرمز مشخص شده‌اند). تصویر در نور XPL ثبت شده است.

است. به این ترتیب، نرخ کرنش بسیار بالا حدود $10^{-7} - 10^{-8}$ در دمای بالا ($> 600^{\circ}\text{C}$), و نرخ کرنش (به عنوان مثال در زمین شناسی عادی) در دمای پایین $10^{-11/4}$ برآورد شده است [۱۴].

هدف اصلی این پژوهش، برآورد نرخ کرنش و بررسی فرکتال مرز دانه‌های کوارتز در گرانیت گنیسی آبادچی است.

زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد بررسی در شمال دریاچه سد زاینده‌رود، حدود ۴۵ کیلومتری شمال شهرکرد در گستره‌ای با مختصات $39^{\circ} 40' \text{N}$ تا $43^{\circ} 25' \text{N}$ و $50^{\circ} 0' \text{E}$ تا $50^{\circ} 32' \text{E}$ شمالی قرار دارد و بخشی از پهنه زمین‌ساختاری سندنج - سیرجان است (شکل ۲). این پهنه با عرض $100-100$ کیلومتر و طول 1500 کیلومتر در راستای شمال غربی ایران تا کمربند مکران در جنوب شرقی بوده و موازی کمربند رانشی زاگرس با روند شمال غربی به جنوب شرق است [۱۵-۱۷]. رانش اصلی زاگرس سندنج - سیرجان را از کمربند رانشی زاگرس جدا می‌کند [۱۸]. بسیاری از گرانیتوئید نفوذی درون پهنه دگرگونی سندنج - NW هستند و به موازات روند ساختاری اصلی زاگرس و روند کلی برگوارگی و محور چین هستند. این گرانیتوئیدها در مقادیر متفاوت خرد شده و میلونیتی‌اند. توده گرانیت گنیس آبادچی دگرشکل شده، چین خورده و دگرگون شده است [۱۹]. در این پژوهش، سنگ‌های گرانیت گنیسی از چهار نقطه برداشت و بررسی شده‌اند. نقاط مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

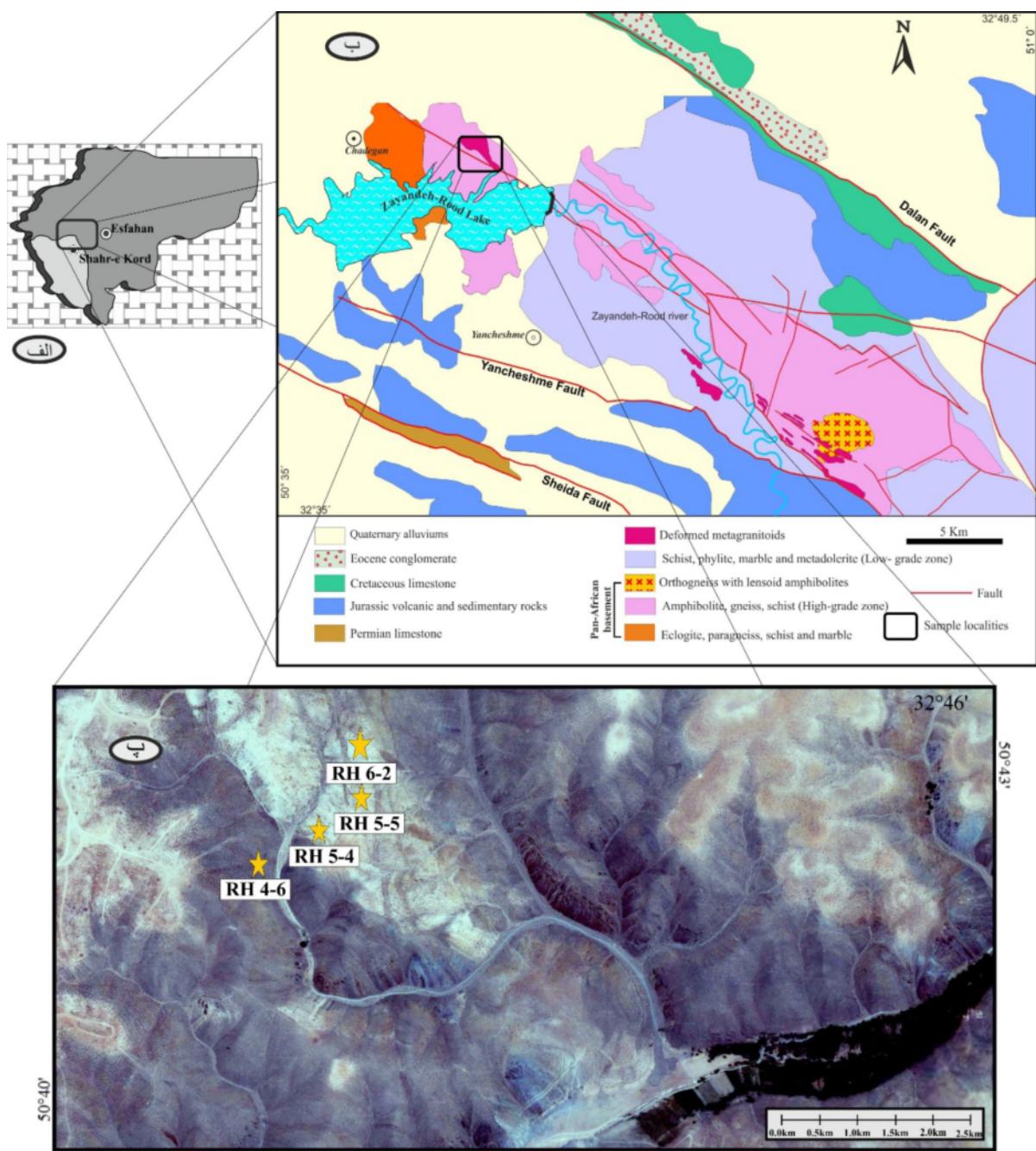
پیچیده، جایگزینی آن‌ها با تعدادی چندضلعی است که از قانون انزی $\text{I}^{1-D} = L^{1-D}$ پیروی می‌کنند که L طول کلی هر چندضلعی، I طول یک طرف از یک چندضلعی (طول گام) و D که بعد فرکتالی نامیده می‌شود بیسکویچ سدروف^۱ بعد منحنی است. میزان پیچیدگی منحنی را نشان می‌دهد و می‌تواند نمایش هندسی برای تعیین یک طرح دو لگاریتمی بواسطه شب منحنی از رابطه خطی $\text{I}-\text{L}$ باشد [۷].

با وجود پژوهش‌هایی که پیرامون نرخ کرنش و دگرشكلى در آزمایشگاه‌ها صورت گرفته است، بدیهی است که تعیین تغییر شکل سنگ‌ها یک چالش است. فیفرن و همکارش [۸] بر پایه نتایج بررسی گستره کرنش به این نتیجه رسیدند که نرخ تغییرشکل زمین 10^{-13} تا 10^{-15} است. اعتقاد بر این است که نرخ کرنش عادی تغییرشکل زمین بین 10^{-12} تا 10^{-15} در نوسان است [۹، ۱۰]، هر چند که به تازگی برخی برای پدیده‌هایی مانند موضع گرانیت‌ها به نرخ کرنش سریع‌تر اشاره دارند [۱۱، ۱۲]. براساس آزمایش‌های مختلف در مورد تغییر شکل دانه‌های کوارتز در دما و نرخ کرنش متفاوت [۱۳]، مشخص شد که شکل دانه‌های کوارتز به دما (T) و نرخ کرنش وابسته هستند، به طوری که در دمای پایین و نرخ کرنش بالا، شکل‌ها پیچیده‌تر می‌شوند و برعکس. تاکاهاشی و همکاران [۱۳] رابطه‌ای بین بعد فرکتال (D)، دما (T)، (بر حسب K) و نرخ کرنش^۲ ارائه دادند که اگر T از بازبلور کوارتز یا T از تغییر شکل سنگ باشد و اگر D (از دانه‌های کوارتز) محاسبه شود، آنگاه با استفاده از آن (رابطه زیر) می‌توان نرخ کرنش را در یک سنگ عادی برآورد کرد:

$$D = \Phi \log \frac{K}{T} + 1.08 \quad (1)$$

که $\Phi = 6.44 \times 10^{-2}$ (K) و $K = 9.34 \times 10^{-2} \{[\log(s^{-1})]^{-1}\}$

1- (Besicovitch-Hausdorff)



شکل ۲ الف) جایگاه منطقه‌ی مورد بررسی در استان چهارمحال‌بختیاری، ب) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی و توده‌های نفوذی بر نقشه زمین‌شناسی [۲۰] و پ) جایگاه نقاط مورد بررسی بر تصویر ماهواره‌ای (تصویر برگرفته شده از Google Earth).

گردید. برای محاسبه بعد فرکtal (D) دانه‌های کوارتز، مقاطع با بزرگنمایی عدسی شیئی ۴X بررسی شدند. دست کم ۲۰۰ دانه کوارتز از هر مقطع با استفاده از نرم افزار CorelDraw رسم شده و مورد بررسی و اندازه‌گیری شدند. به طور کلی، برای تعیین بعد فرکtal دو روش متداول وجود دارد [۲۱] که عبارتند از روش تقسیم (با استفاده از چندضلعی‌ها) و روش

روش بررسی

پس از نمونه‌برداری و ثبت جایگاه جغرافیایی از چهار منطقه مشخص شده در شکل ۲ با استفاده از دستگاه GPS در منطقه آبادچی، از نمونه‌های سالم مقطع تهیه شد و مقاطع توسط میکروسکوپ قطبشی المپیوس بررسی شدند. از ویژگی‌های بافتی دانه‌های کوارتز عکس‌هایی در نور طبیعی و مقاطع تهیه

رفتار کوارتز طی دگرشکلی می‌تواند به برآورد نسبی دما هنگام تغییرات ساختاری کمک کند. ریزساختارهای مشاهده شده در بلورهای کوارتز شامل خاموشی موجی و انحلال فشاری همراه با ایجاد شکستگی است که در دمای کمتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد دیده می‌شوند [۲۵-۲۷].

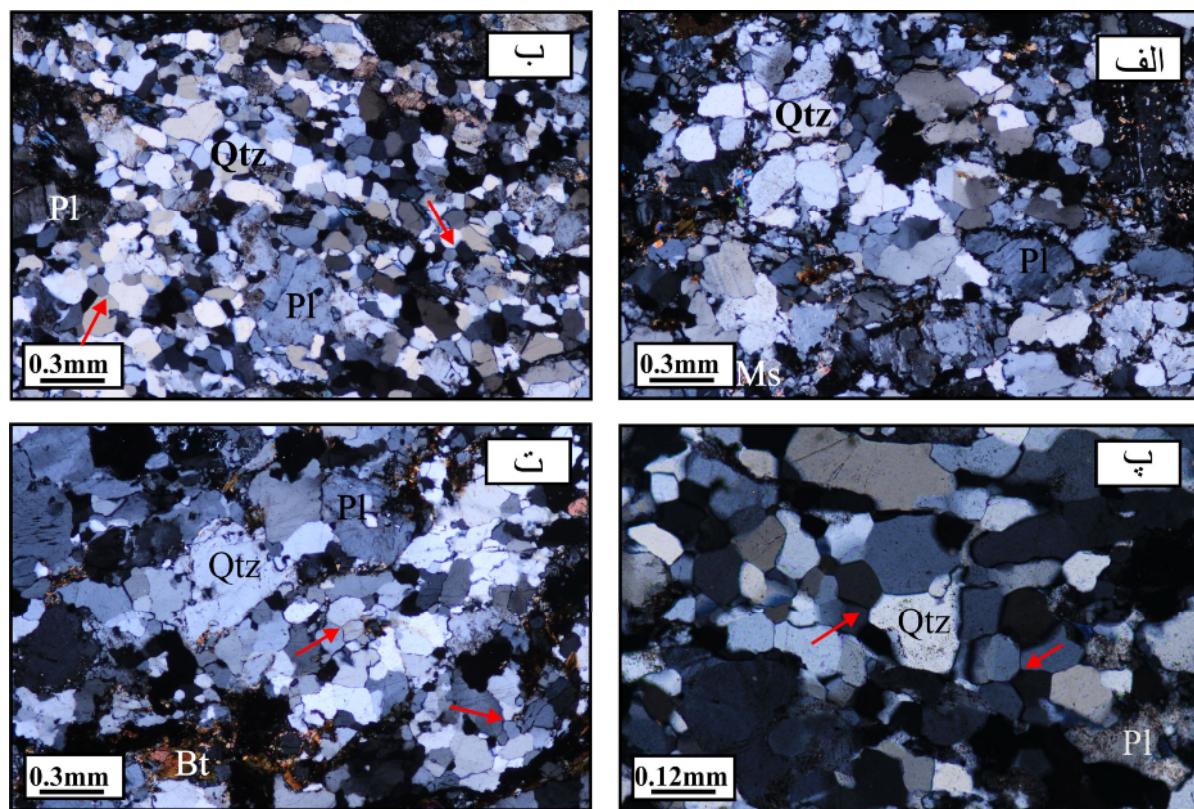
بلورها در دمای پایین بصورت دانه‌های بازتلور یافته کوچک و محدب در طول مرز دانه دیده می‌شوند. با افزایش دما طی دگرشکلی، بازتلور و نمایش ریزساختارهایی مانند برآمدگی (BLG) و مرز دندانه‌دار بلورها در شرایط دمای ۴۰۰-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد و بافت غالب به صورت ریزدانه در اطراف بلورهای درشت مشخص می‌شود (شکل ۳ الف). با افزایش دما، دانه‌های بازتلور یافته، مرزهای نسبتاً مستقیم‌تری را نشان می‌دهند و زیردانه‌ها شروع به چرخش می‌کنند که به این فرایند چرخش زیر دانه‌ای (SGR) گفته می‌شود [۲۸].

شمارش جعبه‌ای. در این پژوهش، با کمک روش جعبه‌ای بعد فرکتال مرز دانه‌های کوارتز تعیین شده و سپس با استفاده از نرم‌افزارهای Imagej و CorelDraw نمودارهای لازم تهیه شدند.

بررسی سنگ نگاری نمونه‌ها

براساس بررسی‌های میکروسکوپی انجام شده، بافت اصلی توده ورقه دانه شکفتی است که از نظر مرز دانه‌ای از اینترلویت تا آمیبی‌شکل تغییر می‌کنند. ترکیب کانی‌شناسی اصلی گرانیت گنیسی آبادچی شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپات قلیابی، بیوتیت و موسکویت و کانی‌های فرعی مگنتیت، زیرکن، آمفیبول و آلاتیت هستند [۲۲-۲۴].

کوارتز از فراوان ترین کانی‌های سازنده‌ی این سنگ‌هاست که دارای اندازه متغیر، شکل‌دار تا نیمه‌شکل دار است و از نظر بافتی شرایط متفاوت دگرشکلی دینامیکی وارد شده را بر گرانیت گنیسی مورد بررسی نشان می‌دهند.



شکل ۳ نمایی میکروسکوپی از بلورهای کوارتز (الف) ظهرور دانه‌های جدید و کوچک در اطراف هسته‌های قدیمی کوارتز، BLG، در مقطع RH 4-6 (نور XPL)، (ب) مرز بخیه‌ای دانه‌های کوارتز و مهاجرت مرز دانه‌ای در کوارتزها (SGR) در مقطع RH5-4 (نور XPL)، (پ و ت) دانه‌های کوارتز با زاویه‌ی ۱۲۰ درجه، یا زاویه‌ی دوسرطحی و از نوع GBM به ترتیب در مقطع‌های ۵-۵ و ۶-۲ RH، (نور XPL) (پیکان‌های قرمز دانه‌های کوارتز با زاویه‌ی ۱۲۰ درجه را نشان می‌دهند). علامت‌های اختصاری برگرفته از مرجع [۲۹] هستند.

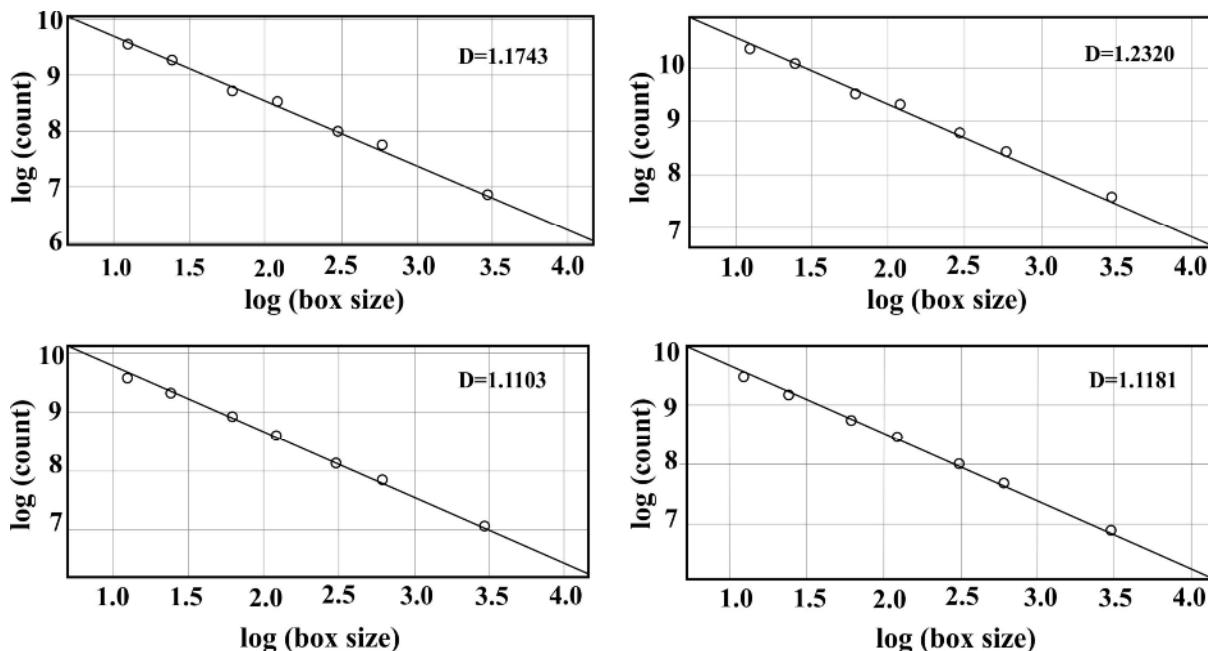
توسط تاکاهاشی و همکاران [۱۳] ارائه داده شده است برای محاسبه کرنش در کوارتزها استفاده می‌شود. کوارتزهای نمونه ۴-۶ RH ۴ در گستره دمای ۴۰۰-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد گسترش یافته‌اند. با استفاده از مقدار بعد فرکtal ($D=1.23$)، نرخ کرنش در دماهای ۲۵۰ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب $10^{-11/6}$ و $10^{-8/6}$ است. در نمونه ۵-۴ RH ۵-۶ گستره اندازه دانه‌های کوارتز از ۰.۷۹ تا ۰.۱۲ میلی‌متر و مقدار D ثبت شده ۱/۱۷ است. نرخ کرنش با استفاده از رابطه (۱) در دماهای ۴۲۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب 10^{-9} و $10^{-6/8}$ به دست می‌آید. مقدار D برای نمونه‌های ۵-۵ RH ۶-۲ به ترتیب ۱/۱۲ و ۱/۱۱ است. نرخ کرنش با استفاده از این مقادیر در دماهای ۵۰۰ و ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد در جدول ۱ آورده شده است. کمترین مقدار کرنش (۱۰ $^{-6/6}$) کوارتزها برای نمونه ۶-۲ در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است.

اعتقاد بر این است که نرخ کرنش طبیعی زمین‌شناسی بین 10^{-12} تا 10^{-15} در تغییر است [۲۰، ۲۷] که نرخ کرنش همه نمونه‌ها بالاتر از این گستره است. تاکاهاشی و همکاران [۱۳] نمودار دما (T) نسبت به نرخ کرنش را ارائه دادند که در آن منحنی‌های تراز D بر اساس نتایج برآمده از آزمایش دانه‌های کوارتز هستند. این نمودار بر اساس آزمایش‌های انجام شده با نرخ کرنش 10^{-4} تا 10^{-4} در دمای ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد یعنی در دمای بالا و نرخ کرنش بسیار بالا رسم شده است.

چرخش زیردانه‌ای و بازتابلور در دمای ۴۰۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد دیده می‌شوند و بلورهای کوارتز تقریباً به یک اندازه رشد کرده‌اند (شکل ۳ ب). با افزایش دما، اندازه دانه‌های بازتابلور یافته بزرگتر شده و مهاجرت مرز دانه‌ها (GBM) پدیده غالب می‌شود. GBM در دمای بالاتر از 500°C رخ می‌دهد و توسط مرزهای موج‌دار و آمیبی کانی‌ها مشخص شده‌اند و مهاجرت مرز دانه‌ای در کوارتزها رخ می‌دهد (شکل‌های ۳ پ و ت). در مرحله‌ی نهایی تغییرشکل کانی‌های قدیمی، دانه‌های کوچک با مرزهای کمی موج‌دار با نقاط سه‌گانه جایگزین هسته‌ی قدیمی کانی می‌شوند که شرایط دمایی بالاتر که بین ۵۰۰-۸۵۰ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است را نشان می‌دهد و SGR نامیده می‌شوند [۲۵، ۲۶] (شکل‌های ۳ پ و ت).

بحث و بررسی

شکل ۴ نشان دهنده جایگاه نمونه‌های نمونه‌های مورد بررسی در نمودارهای $\log d$ نسبت به $\log N_d$ و نمایش بعد فرکtal (D) در سنگ‌های مورد بررسی است. بعد فرکtal برای هر نمونه بصورت شیب خط مستقیم در هر نمودار نمایش داده شده است. نتایج تجزیه و تحلیل فرکtal در ۴ منطقه مورد بررسی است. در جدول ۱ ارائه شده‌است. نمونه ۶-۶ RH ۴-۶ در لبه گرانیت آبادچی قرار داشته و نسبت به بقیه نمونه‌ها بزرگترین دانه‌های کوارتز را دارد (۱۵/۵ میلی‌متر). گستره بعد فرکtalی این نمونه نیز بالاست ($D=1.23$) در حالی که بقیه نمونه‌ها دارای مقادیر D پایین‌تری هستند. چنان که پیشتر بیان شد، رابطه (۱) که



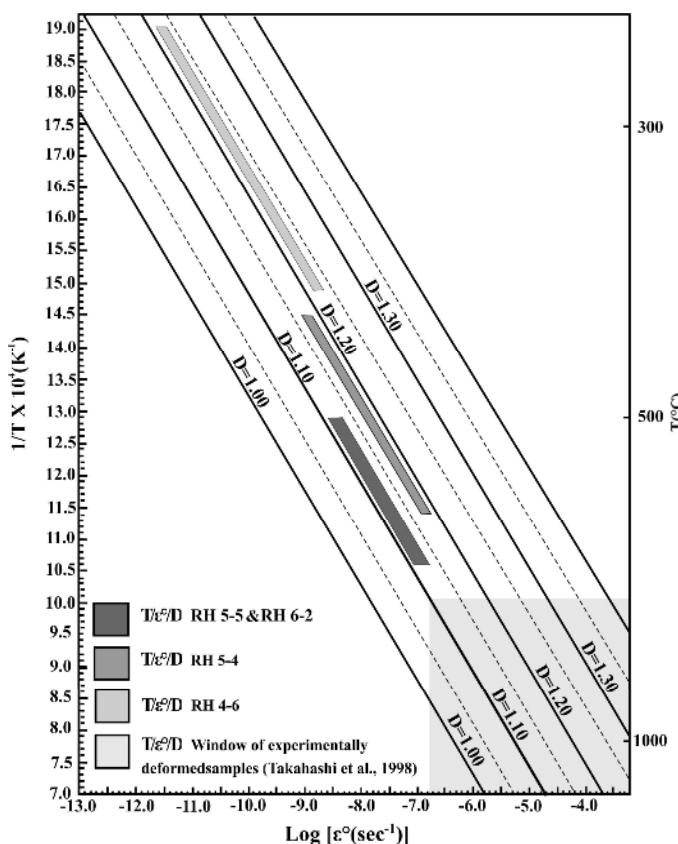
شکل ۴ جایگاه نمونه‌های مورد بررسی در نمودارهای $\log d$ نسبت به $\log N_d$ و نمایش بعد فرکtal (D) در سنگ‌های مورد بررسی.

جدول ۱ محاسبه بعد فرکتال (D) داده‌های کوارتز محاسبه شده از بررسی نمونه‌های منطقه آبادچی. (n: تعداد داده‌های کوارتز مورد بررسی در هر نمونه، d: اندازه دانه، ε: نرخ کرنش و T: دمای مورد استفاده برای محاسبه نرخ کرنش).

| Sample | n | d range (mm) | D | Strain-rate (s-1) with T |
|--------|-----|--------------|------|--|
| RH 4-6 | ۴۹۶ | ۰.۳۲ - ۱۵.۵ | ۱/۲۳ | $10^{-11.۶}$ (250°C) - $10^{-8.۶}$ (400°C) |
| RH 5-4 | ۲۵۵ | ۰.۷۹ - ۷.۱۲ | ۱/۱۷ | 10^{-9} (420°C) - $10^{-8.۶}$ (600°C) |
| RH 5-5 | ۲۱۴ | ۰.۵۹ - ۸.۵۸ | ۱/۱۲ | $10^{-8.۷}$ (500°C) - $10^{-7.۱}$ (750°C) |
| RH-6-2 | ۲۲۷ | ۰.۸۱ - ۷.۱۳ | ۱/۱۱ | $10^{-8.۴}$ (500°C) - $10^{-6.۶}$ (750°C) |

شیست سبز بالایی، آمفیبولیت و گرانولیت‌ها برای تغییرشکل و شکل‌پذیری طبیعی به دمای بیش از 345°C درجه سانتی‌گراد نیاز دارند (به طور کلی تا 600°C درجه سانتی‌گراد یا بیشتر). با این حال، با استفاده از شکل ارائه شده توسط [۱۳]، در دمای بیش از 345°C درجه سانتی‌گراد نرخ کرنش بالا برآورده می‌شود. چنان‌که در شکل ۵ دیده می‌شود، در دمای 600°C درجه سانتی‌گراد، $D > 1$ و نرخ کرنش بیش از $10^{-8.۸}$ خواهد بود. برای گرانیت‌ها، نرخ کرنش بیش از این نیز برآورده شده است [۱۲، ۱۱].

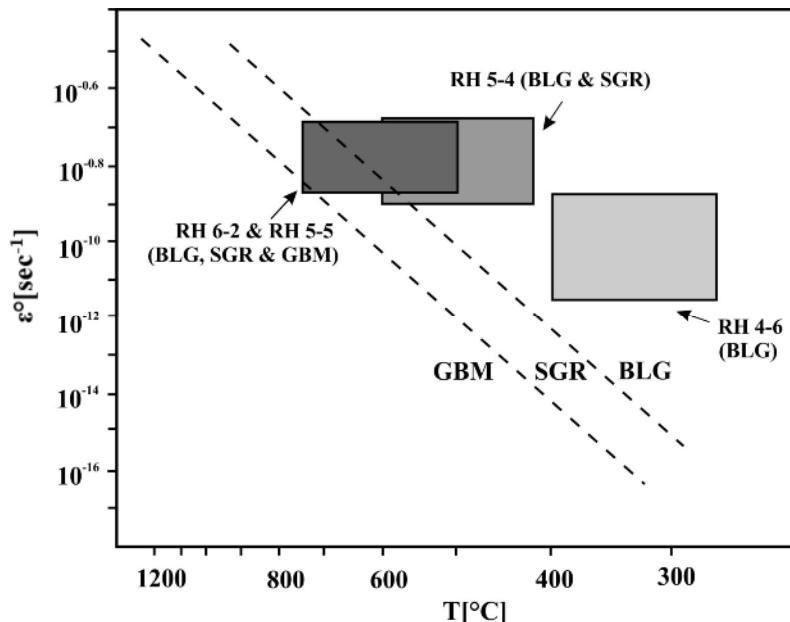
جایگاه نمونه‌های مورد بررسی در نمودار $1/T \times 10^4 (\text{K}^{-1})$ نسبت به $\log [\varepsilon^{\circ}(\text{sec}^{-1})]$ در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند. منطقه بسیار کوچک (مستطیل خاکستری) در شکل ۵ نشان-دهنده داده‌های اصلی مرجع [۱۳] است گفتنی است که D باید بین خطوط ۱ تا ۲ باشد، زیرا همه بررسی‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های دوبعدی انجام شده‌است [۱۳]. با توجه به شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که در نرخ کرنش طبیعی (10^{-12}) کمترین دمای مورد نیاز برای $D = 1$ ، برابر با 345°C درجه سانتی‌گراد است. بنابراین، دمای بیش از 345°C درجه سانتی‌گراد و $D > 1$ مربوط به نرخ کرنش کمتر از 10^{-12} است. رخساره‌های



شکل ۵ نمودار $1/T \times 10^4 (\text{K}^{-1})$ نسبت به $\log [\varepsilon^{\circ}(\text{sec}^{-1})]$ که نمایشگر رابطه بین ابعاد فرکتال (D) و شرایط کرنش است. (برگرفته از شکل ۴ از مرجع [۱۲] با اصلاحات).

دما/نرخ کرنش در مرجع [۳۴] برای آزمودن و تایید نرخ کرنش برآورده از مقادیر D (شکل ۶) استفاده می‌شود [۱۴]. برای کوارتزهای سنگ‌های مورد بررسی، دما و نرخ کرنش با استفاده از مقادیر D محاسبه و نمایش داده شده در نمودار دما/نرخ کرنش (شکل ۶) و در جدول ۱ آورده شده‌اند. در منطقه RH 4-6، کوارتزها در شرایط دمای ۴۰۰-۲۵۰ درجه سانتی-گراد قرار گرفته‌اند و انتظار می‌رود که این کوارتزها در گستره BLG قرار گیرند (شکل ۳ الف). به طور عمدۀ مستطیل خاکستری در شکل ۶ برای کوارتزهای منطقه RH 4-6 گستره BLG قرار گرفته است. پیش‌تر گفته شد که بافت کوارتزها در دمای ۶۰۰-۴۲۰ درجه سانتی-گراد گسترش می‌یابد، با این حال چنان که بیان شد، انتظار می‌رود که این کوارتزها در گستره BLG و SGR قرار گیرند (شکل ۳ ب). چنان که دیده می‌شود، مستطیل خاکستری در شکل ۶ (منطقه ۵-۴) در قسمت SGR و BLG واقع است. در دو منطقه ۵-۵ و ۶-۲ RH در دمای ۵۰۰-۷۵۰ درجه سانتی-گراد قرار داشته‌اند. این کوارتزها باید در گستره GBM و SGR و دیده شوند (شکل‌های ۳ پ و ت). جایگاه این دو منطقه در نمودار $\dot{\varepsilon}^0 \text{[sec}^{-1}]$ ، $T(\text{°C})$ ، در گستره‌های BLG و SGR نمایش داده شده است.

مشخص شده است که ریزساختارهای موجود در سنگ‌ها به فرآیندهای تغییرشکل، نرخ کرنش و دما وابسته‌اند (برای مثال، [۳۴-۳۱]). هرث و همکارش [۳۱]، با روش خزش، ریزساختار مربوط به کوارتز را بهطور تجربی با روش‌های ۱) دما پایین / نرخ کرنش بالا، ۲) دما متوسط / نرخ کرنش متوسط، ۳) دما بالا / نرخ کرنش پایین مشخص کردند. استیپ و همکاران [۳۳] با استفاده از ریزساختارها در کوارتز سه منطقه با بازتابلور را در ناحیه گسل تونال (آلپ ایتالیا) مشاهده کردند، که عبارتند از: بازتابلور (BLG) در دمای ۲۵۰-۴۰۰ درجه سانتی-گراد، چرخش ریزدانه (SGR) در ۴۰۰-۵۰۰ درجه سانتی-گراد، و مهاجرت مرز دانه (GBM) در ۵۰۰-۷۰۰ درجه سانتی-گراد. افزون بر این، استیپ و همکاران [۳۴] ریزساختارهای بازتابلور دینامیکی در کوارتز که در شرایط طبیعی و همچنین شرایط آزمایشگاهی ایجاد شده است، را بررسی و بر اساس آن نمودار دما/نرخ کرنش را پیشنهاد کردند. از این نمودار می‌توان به صورت‌های مختلف استفاده نمود؛ در صورت معلوم بودن دما و نرخ کرنش، می‌توان مشخصه‌های بافتی (سازوکارهای بازتابلور) که ممکن است در سنگ باشد را تعیین نمود. افزون بر این، اگر دما و سازوکار بازتابلور مشخص باشد، با کمک نمودار می‌توان نرخ کرنش را برآورد کرد (برای مثال، [۳۵]). بنابراین، نمودار



شکل ۶ نمودار $\dot{\varepsilon}^0 \text{[sec}^{-1}]$ ، $T(\text{°C})$ برای برآورد شرایط تغییرشکل در نمونه‌های مورد بررسی با استفاده از سازوکار بازتابلور دانه‌های کوارتز در مناطق مورد بررسی (RH 4-6، RH 5-4، RH 5-5 و RH 6-2) [۳۴] پیشنهاد شده است. نرخ کرنش ($\dot{\varepsilon}$) بر اساس تجزیه و تحلیل بعد فرکتال محاسبه شده است. GBM، SGR و BLG به ترتیب بازتابلور، چرخش زیردانه و مهاجرت مرزدانه هستند.

نظر شکل مرزدانه‌ای از اینترلوبیت تا آمیبی شکل تغییر می‌کند. کانی‌های اصلی این توده شامل کوارتز، پلازیوکلاز، فلدسپات پتاسیم، بیوتیت، آمفیبول و موسکویت و کانی‌های فرعی شامل زیرکن، تیتانیت و آلانیت هستند. سنگ‌های مورد بررسی دستخوش دگرشکلی دینامیک شده‌اند، بطوری که کانی‌های مختلف شواهد متفاوتی از دگرشکلی را نشان می‌دهند. از شواهد دگرشکلی در بلورهای کوارتز شکل‌دار تا نیمه-شکل‌دار می‌توان به بازبلور دینامیکی (از نوع GBM, SGR, BLG)، شکل‌گیری زیر دانه‌ها، تغییر شکل مرزدانه‌ها و ایجاد نودانه‌ها اشاره نمود. نتایج آزمایش‌ها در مورد تغییر شکل بلورهای کوارتز در دما و نرخ کرنش‌های متفاوت نشان‌دهنده این است که شکل دانه‌های کوارتز به دما و نرخ کرنش وابسته هستند. با استفاده از محاسبه بعد فرکتال و دما، نرخ کرنش برای چهار گستره مورد نظر اندازه‌گیری شد. کوارترها بیشترین مقدار کرنش ($10^{-11/6}$) در نمونه RH 4-6 با بعد فرکتال $1/23$ در دمای 250°C در جهان‌سانتی‌گراد و کمترین مقدار کرنش ($10^{-6/6}$) برای نمونه RH 6-2 با بعد فرکتال $1/11$ در دمای 800°C درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. با کمک نمودار دما/ نرخ کرنش، شرایط تغییرشکل در نمونه‌های مورد بررسی با استفاده از سازوکار بازبلور برآورد شد که نتایج بدست آمده از نمودارها با شواهد دگرشکلی بلورهای کوارتز کوارتز (SGR, BLG, GBM) همخوانی داشتند. از آنجا که این منطقه دستخوش یک رویداد زمین‌ساختی شده است، طی سردن شدن و کاهش اثر رویداد زمین‌ساختی ریزساختارهای بازبلور دمای پایین بطور پیوسته در لبه توده دیده می‌شود.

قدرتانی

نویسنده‌گان مقاله از حمایت دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه شهرکرد در به ثمر رساندن این پژوهش قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- [1] Voll G., "Klastische Mineralien aus den Sedimentserien der Schottischen Highlands und ihr Schicksal bei aufsteigender Regional- und Kontaktmetamorphose", Habilitationsschrift Fak. f.Bergb.u.Httttenw., TU Berlin, (1969) D83:360.
- [2] Poirier J.P., "Creep of crystals", Cambridge University Press London, (1985).
- [3] Mandelbrot B.B., "The fractal geometry of nature", 2nd edn Freeman, New York, (1983).

تأثیر زمین‌ساخت منطقه‌ای بر مرزهای کوارتز

پژوهش حاضر نشان می‌دهد که بدون شک گرانیت گنیسی آبادچی به طور قابل توجهی دستخوش رخدادهای زمین ساختی منطقه‌ای شده است. همانگی مشابه بین جایگزینی گرانیت و زمین‌ساخت منطقه برای گرانیت‌های مختلفی از سراسر جهان گزارش شده است [۴۰-۳۶].

گسترش ریزساختارهای دمای بالا باعث کاهش دندانه دار شدن مرز دانه‌های کوارتز می‌شود [۴۱]. افزایش دندانه دار شدن مرزهای بلور کوارتز از مرکز بسوی لبه را می‌توان براساس دو نظریه توضیح داد: ۱) ریزساختارهای دمای پایین بسوی دمای بالا در اثر یک رخداد زمین‌ساختی: پس از جایگزینی همزمان با زمین‌ساخت، گسترش ریزساختارهای دمای بالا که تکامل تغییرشکل اولیه منطقه بوده است قابل مشاهده است. طی سرد شدن و کاهش اثر رویداد زمین‌ساختی، ریزساختارهای دمای پایین بطور پیوسته در لبه توده دیده می‌شود [۴۱]. ۲) ریزساختارهای دمای پایین بسوی دمای بالا در اثر چند رخداد زمین‌ساختی: پس از جایگزینی همزمان با زمین‌ساخت، گسترش ریزساختارهای دمای بالا که تکامل تغییرشکل اولیه منطقه بوده است قابل مشاهده است. در این مرحله، گرانیت‌ها سرشار از ریزساختارهای دمای بالا بوده‌اند. در طول رخدادهای بعدی که نیروی کمتری به منطقه وارد شده است و بیشتر باعث تغییر ریزساختارها در مرزهای بین واحدها گشته است. تاثیر این رخداد در مناطق مرکزی قابل مشاهده نیست و باعث ایجاد ریزساختارهای دمای پایین در قسمت‌های لبه توده می‌شود [۴۱].

از آنجا که تعیین سن به روش $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ بشدت وابسته به رخدادهای دگرگونی و دگرشکلی است، شواهد بدست آمده از سن سنجی به روش $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ برای سنگ‌های اکلوژیت، پاراگنیس و متاگرانیت‌های منطقه مورد بررسی آشکار می‌سازد که فرآیندهای دگرگونی و دگرشکلی اصلی حاکم بر سنگ‌های منطقه طی ژوراسیک دارای حالتی پیوسته در مدت زمان چند ده میلیون سال بوده‌اند و ناپیوستگی زمانی در این سیر دگرگونی‌ها دیده نمی‌شود [۴۲].

برداشت

توده گرانیت گنیس چین خورده و دگرشکل شده آبادچی در پهنه ساختاری سنندج-سیرجان در جنوب غربی ایران واقع است. بافت اصلی توده آبادچی ورقه دانه شکفتی است که از

- Sanandaj- Sirjan zone, Iran". Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal Mineral Geochem*185 (3)(2009) 233–248.
- [17] Malek-Mahmoudi F., Davoudian A., Shabanian N., Azizi H., Asahara Y., Neubauer F., Dong Y., "Geochemistry of metabasites from the North Shahrekord metamorphic complex, Sanandaj-Sirjan Zone: Geodynamic implications for the Pan-African basement in Iran", Precambrian Research 293 (2017) 56–72.
- [18] Alavi M., "Regional stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust Belt of Iran and its proforeland evolution", Am. Journal Science 304(2004) 1–120.
- [19] Riyahi F., Shabanian N., Davoudian A. R., "Geochemistry and tectonic setting of granite-gneisses Abadchi, north of Shahrekord", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy Vol. 26 (2018a)195-208.
- [20] Davoudian A. R., Genser J., Dachs E. Shabanian N., "Petrology of eclogites from north of Shahrekord, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran", Mineralogy and Petrology (2008) 92: 393–413.
- [21] Voss R.F., "Fractals in nature: from characterization to simulation. In: Peitgen H-O, Saupe E (eds) The science of fractal images", Springer, Berlin Heidelberg New York, (1988) 21–70.
- [22] Riyahi F., Shabanian N., Davoudian A. R., Mansouri M., "Investigation of Dynamic Deformation Evidence in Metagranitoids in Abadchi Village", Geological Society of Iran (2016a) Tehran.
- [23] Riyahi F., Shabanian N., Davoudian A. R., Mansouri M., "Influence of dynamic deformation on quartz crystal with Na-metasomatism in folded metagranite of Abadchi area", 34th National & the 2th International Geosciences Congress which was held in the Geological Survey of Iran (2016b) Tehran.
- [24] Riyahi F., Shabanian N., Davoudian A. R., "Morphological study of zircon crystals from gneissic granite of Abadchi, North of Zayandeh-Rud dam" Earth Science Researches (2018b) (Under print).
- [25] Owona S., Ondoia J. M., Ekodeck G. M., "Evidence of Quartz, Feldspar and Amphibole Crystal Plastic deformations in the Paleoproterozoic Nyong Complex Shear Zones Under Amphibolite to Granulite Conditions (West Central African)", Journal of Geography and Geology Canadian Center of Science and Education Fold Belt, SW Cameroon) (2013).
- [4] Kaye B.H., "A random walk through fractal dimensions Unmarked set by Iran", VCH, Weinheim, (1989).
- [5] Stanley H.E., Ostrowsky N., (eds), "Random fluctuations and pattern growth: experiments and models", NATO ASI Series E, (1988) 157, Kluwer, London.
- [6] Daccord G., Nittman J., Stanley H.E., "Fractal viscous fingers- experimental results". In: Stanley H.E., Ostrowsky N., (eds) On growth and form. Martinus Nijhoff, Boston, (1986).
- [7] Kruhl J. H., Nega M., "The fractal shape of sutured quartz grain boundaries: application as a geothermometer", Geol Rundsch (1996) 85:38–43.
- [8] Pfiffner O. A., Ramsay J. G., "Constraints on geological strain rates; arguments from finite strain states of naturally deformed rocks". Journal of Geophysical Research v.87 (B1) (1982) 311–321.
- [9] Passchier C.W., Trouw, R.A.J., "Microtectonics". 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, (2005).
- [10] Twiss R.J., Moores E.M., "Structural Geology", 2nd Edition, W. H. Freeman and Company, New York, (2007).
- [11] Vigneresse J.L., "Rheology of a two-phase material with applications to partially molten rocks, plastic deformation and saturated soils", In: G.I. Alsop, R.E. Holdsworth, K.J.W. McCaffrey and M. Hand (Eds.), Flow Processes in Faults and Shear Zones, Geological Society London Spec. Publ., no.224, (2004) 79-94.
- [12] Vigneresse J.L., "Granitic batholiths: from pervasive and continuous melting in the lower crust to discontinuous and spaced plutonism in the upper crust". Transactions of the Royal Society Edinburgh: Earth Sciences v.97(2008) 311-324.
- [13] Takahashi M., Nagahama H., Masuda T., Fujimura A., "Fractal analysis of experimentally, dynamically recrystallized quartz grains and its possible application as a e& meter", Journal of Structure Geology v.20(1998) 269-275.
- [14] Manish M.A., "Strain-rate Estimation Using Fractal Analysis of Quartz Grains in Naturally Deformed Rocks", Journal Geological Society of INDIA Vol.75 (2010) 202-209.
- [15] Stöcklin J., "Structural history and tectonics of Iran: a review", AAPG Bull 52(7)(1968) 1229–1258.
- [16] Shabanian N., Khalili M., Davoudian A., Mohajjal M., "Petrography and geochemistry of mylonitic granite from Ghaleh-Dezh, NW Azna,

- Formation (Gua mine, India)", Geological Magazine v.144 (2007) 271-287.*
- [36] Bouchez J.L., "Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies of granitic rocks. In: *J.L.Bouchez*", D.W.H. Hutton and W.E. Stephens (Eds.), Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics Kluwer Academic Publishers Dordrecht, The Netherlands (1997) 95-112.
- [37] Saint-Blanouat M., Tikoff B., "Development of magmatic to solid-state fabrics during syntectonic emplacement of the Mona Creek granite, Sierra Nevada Batholith", California. In: J.L. Bouchez, D.W.H. Hutton and W.E. Stephens (Eds.), Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands (1997) 231-252.
- [38] Alonso Olazabal A., Carradeco M., Aranguren A., "Petrology, magnetic fabric and emplacement in a strike-slip regime of a zoned peraluminous granite: The Campanario-La Haba pluton", Spain. In: A., Castro C., Fernández J.L., Vigneresse (Eds.), Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques. Geol. Soc. London, Spec. Publ. No.168 (1999) 177-190.
- [39] Greiling R.O., VERMA P.K., "Strike-slip tectonics and granitoid emplacement: an AMS fabric study from the Odenwald Crystalline Complex", SW Germany Mineralogy and Petrology v.72 (2001) 165-184.
- [40] Mamtni M.A., Greiling R.O., "Granite emplacement and its relation with regional deformation in the Aravalli Mountain Belt (India)-inferences from magnetic fabric". Journal of Structure Geology v.27 (2005) 2008-2029.
- [41] Majumder S., Mamtni M.A., "Fractal analysis of quartz grain boundary sutures in a granite (Malanjkhand, Central India) — Implications to infer regional tectonics". Journal of the Geological Society of India Volume 73 Issue 3 (2009) 309–319.
- [42] Davoudian A.R., Genser J., Neubauer F., Shabanian N., " $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral ages of eclogites from North Shahrekord in the Sanandaj-Sirjan Zone, Iran: Implications for the tectonic evolution of Zagros orogen", Gondwana Research vol. 37(2016) 216-240.
- [26] Langille J. M., Jessup M J., Cottle J.M., Newell D., Seward G., "Kinematic evolution of the Ama Drime detachment: Insights into orogen-parallel extension and exhumation of the Ama Drime Massif, Tibet Nepal", Journal of Structural Geology Science Direct (2010) 900-919.
- [27] Passchier C.W., Trouw R.A.J., "Microtectonics", second ed., Springer, Berlin (2005)
- [28] Passchier C.W., and Trouw R.A.J., "Atlas of Mylonites- and related microstructures", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2010) 313.
- [29] Whitney L., Evans W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", American Mineralogist Volume 95 (2010) 185–187.
- [30] Twiss R.J., Moores E.M., "Structural Geology", 2nd Edition, W.H. Freeman and Company New York (2007).
- [31] Hirth G., Tullis J., "Dislocation creep regimes in quartz aggregates". Journal of Structure Geology v.14 (1992) 145-60.
- [32] Piazolo S., Bons P.D., Jessell M.W., Evans L., Passchier C.W., "Dominance of microstructural processes and their effect on microstructural development: insights from numerical modeling of dynamic recrystallisation". In: S. de Meer, M.R. Drury, J.H.P. de Bresser and G.M., Pennock (Eds.), Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics: Current Status and Future Perspectives, Geological Society[London] Special Publication no.200 (2002) 149-170.
- [33] Stipp M., Stnitz H., Heilbronner R., Schmid S.M., "The eastern Tonale fault zone: a "natural laboratory" for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C". Journal of Structure Geology v.24 (2002a) 1861-1884.
- [34] Stipp M., Stnitz H., Heilbronner R., Schmid S.M., "Dynamic recrystallisation of quartz: correlation between natural and experimental conditions. In: S. de Meer, M.R. Drury, J.H.P. de Bresser, and G.M. Pennock (Eds.), Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics: Current Status and Future Perspectives". Geological Society[London] Special Publication no.200 (2002b) 171-190.
- [35] Mamtni M.A., Mukherji A., and Chaudhuri A.K., "Microstructures in a Banded Iron