

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

فریبا ریاحی سامانی، ناهیدشبانیان بروجنی^{*}، علیرضا داوودیان 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 سنجندج-سیرجان قرار دارد. این توده از نظر کانی‌شناسی، دارای کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپات پتاسیم، بیوتیت، آمفیبول، موسکویت، زیرکن، اسفن و آلانیت است. کوارتز یکی از فراوان‌ترین کانی‌های سازنده 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 مرز دانه‌ای (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 ۱/۲۳ تا ۱/۱۱ و دما بین ۴۰۰-۲۵۰ تا ۷۵۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است. براساس دما و بعد فرکتال محاسبه شده، نرخ کرنش برای چهار گستره اندازه-گیری شده بین $10^{-11/6}$ تا $10^{-6/6}$ است. نتایج بدست آمده از نمودارها با شواهد دگرشکلی بلورهای کوارتز (GBM, SGR, BLG) همخوانی داشتند.

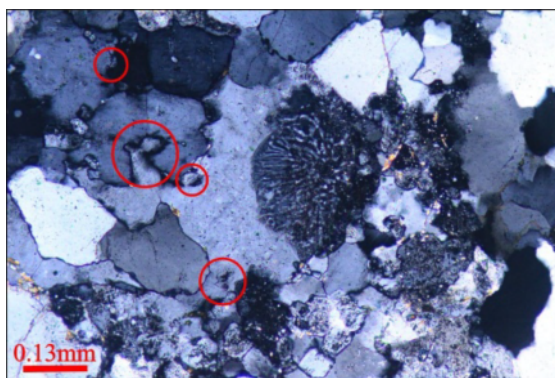
واژه‌های کلیدی: گرانیت گنیس؛ مرز دانه‌های کوارتز؛ فرکتال؛ نرخ کرنش؛ دگرشکلی؛ آبادچی؛ پهنه سنجندج-سیرجان.

مقدمه

دانه‌های همه کانی‌ها ایجاد شوند. این درزها در بلورهای کوارتز به خوبی شناخته شده‌اند؛ برای مثال، در سنگ‌های رخساره شپیست سبز در مرز دانه کوارتز، درزها (حدود ۱۰ μm) به-خوبی می‌توانند ایجاد شوند [۱].

هندس فرکتال روشی برای تعیین کمیت‌هایی مانند شکل-های پیچیده و نامنظم ارائه می‌دهد [۳، ۴]. 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

مرزهای بین بلورهای یک کانی در سنگ‌های دگرگونی و آذرین در شرایط ویژه‌ای به‌صورت بین‌انگشتی دیده می‌شوند. هر انگشت یک برآمدگی یا درز از مرز دانه را در مقیاس مختلف نشان می‌دهد (شکل ۱). در طول مرز دانه، اتم یا گروهی از اتم-ها 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 دایره 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 گنیزی آبادچی است.

زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد بررسی در شمال دریاچه سد زاینده‌رود، حدود ۴۵ کیلومتری شمال شهرکرد در گستره‌ای با مختصات $39^\circ 40' 39''$ تا $50^\circ 25' 43''$ شرقی و عرض جغرافیایی $33^\circ 44' 43''$ تا $32^\circ 46' 11''$ شمالی قرار دارد و بخشی از پهنه زمین‌ساختاری سهند - سیرجان است (شکل ۲). این پهنه با عرض ۵۰-۱۰۰ کیلومتر و طول ۱۵۰۰ 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 سهند - سیرجان را از کمربند رانشی زاگرس جدا می‌کند [۱۸]. بسیاری از گرانیتوئید نفوذی درون پهنه دگرگونی سهند - سیرجان دگرگون شده‌اند. بیش‌ترین توده‌ها در راستای NW-SE هستند و به موازات روند ساختاری اصلی زاگرس و روند کلی برگواری و محور چین هستند. این گرانیتوئیدها در مقادیر متفاوت خرد شده و میلونیتی‌اند. توده گرانیت‌گنیزی آبادچی دگرشکل شده، چین خورده و دگرگون شده است [۱۹].

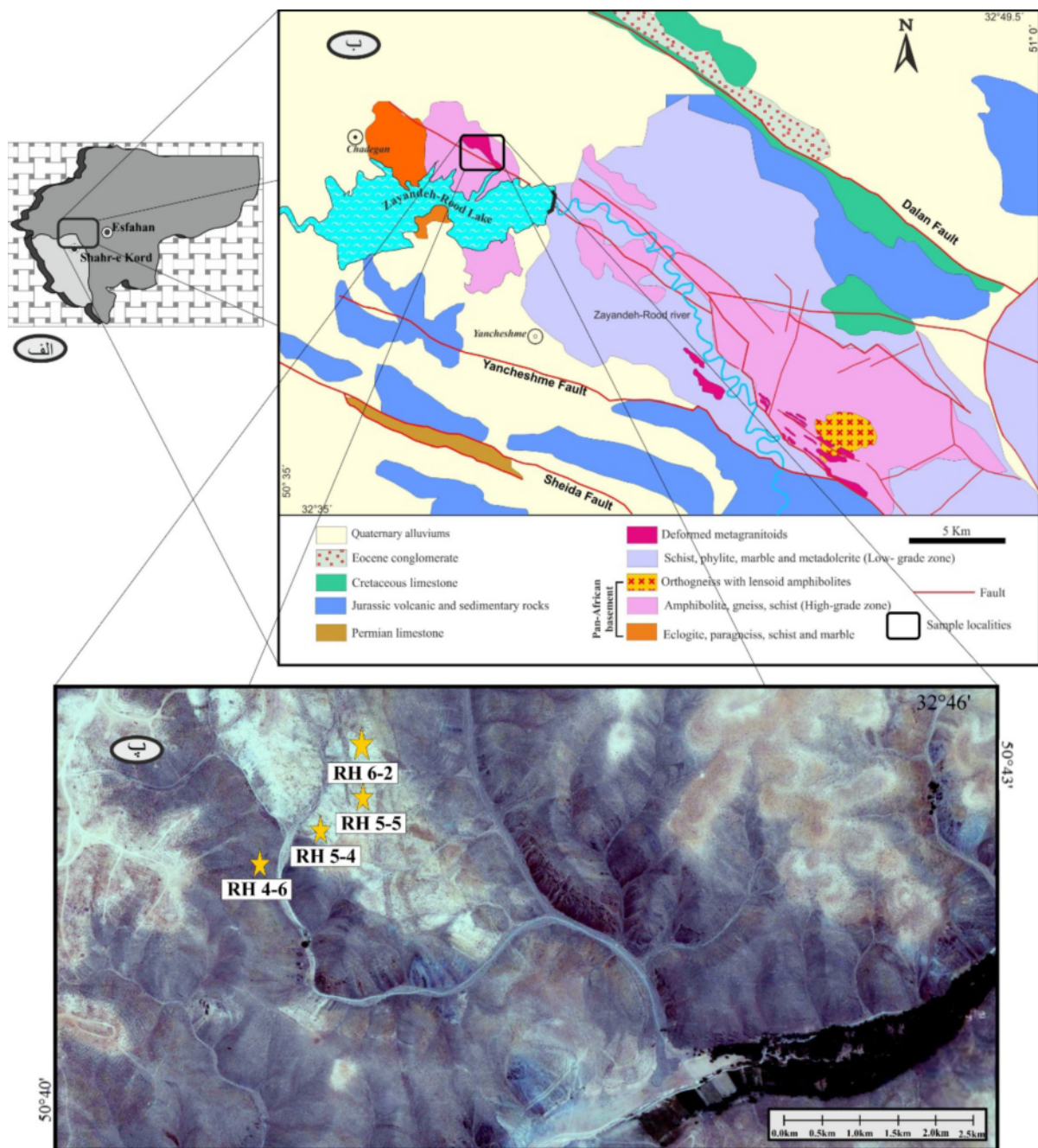
در این پژوهش، سنگ‌های گرانیت گنیزی از چهار نقطه برداشت و بررسی شده‌اند. نقاط مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

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

با وجود پژوهش‌هایی که پیرامون نرخ کرنش و دگرشکلی در آزمایشگاه‌ها صورت گرفته است، بدیهی است که تعیین تغییر شکل سنگ‌ها یک چالش است. فیفتر 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 $\dot{\epsilon}$ ارائه دادند که اگر T از بازتبلور 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:

$$D = \Phi \log \dot{\epsilon} + \rho/T + 1.08 \quad (1)$$

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



شکل ۲ الف) جایگاه منطقه‌ی مورد بررسی در استان چهارمحال بختیاری، 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).

روش بررسی

گردید. برای محاسبه بعد فرکتال (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 فرکتال دو روش متداول وجود دارد [۲۱] که عبارتند از روش تقسیم (با استفاده از چندضلعی‌ها) و روش

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 ۲۰ 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].

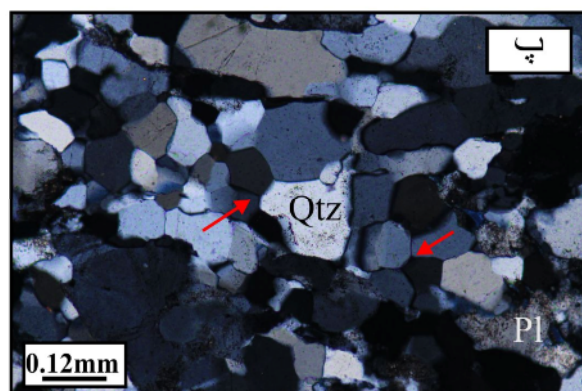
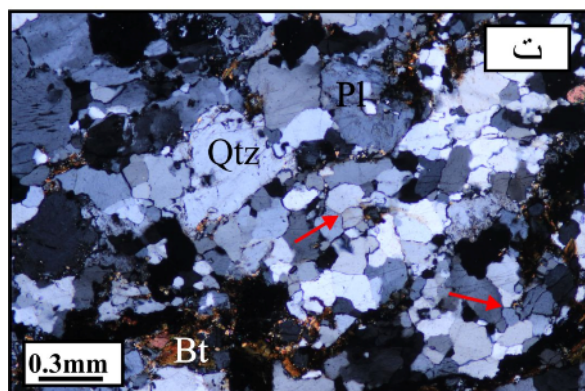
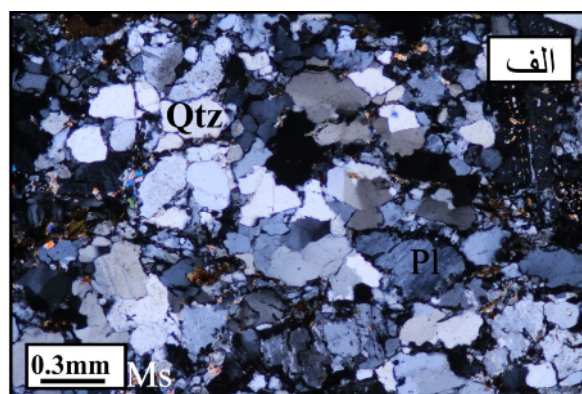
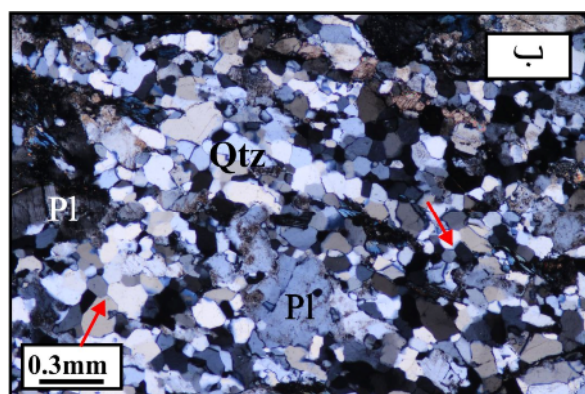
بلورها در دمای پایین بصورت دانه‌های بازتبلور یافته کوچک و محدب در طول مرز دانه دیده می‌شوند. با افزایش دما طی دگرشکلی، بازتبلور و نمایش ریزساختارهایی مانند برآمدگی (BLG) و مرز دندانه‌دار بلورها در شرایط دمای ۴۰۰-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد و بافت غالب به صورت ریزدانه در اطراف بلورهای درشت مشخص می‌شود (شکل ۳ الف). با افزایش دما، دانه‌های بازتبلور 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 شکستی است که از نظر مرز دانه‌ای از اینترلویت تا آمیبی شکل تغییر می‌کنند. ترکیب کانی‌شناسی اصلی گرانیت گنیسی آبادچی شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپات قلیایی، بیوتیت و موسکویت و کانی‌های فرعی مگنتیت، زیرکن، آمفیبول و آلانیت هستند [۲۲-۲۴].

کوارتز از فراوان‌ترین کانی‌های سازنده این سنگ‌هاست که دارای اندازه متغیر، شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار 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) ظهور 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 دوسطحی و از نوع GBM به ترتیب در مقطع‌های RH 5-5 و RH 6-2 (نور XPL) (پیکان‌های قرمز دانه‌های کوارتز با زاویه‌ی ۱۲۰ درجه را نشان می‌دهند). علامت‌های اختصاری برگرفته از مرجع [۲۹] هستند.

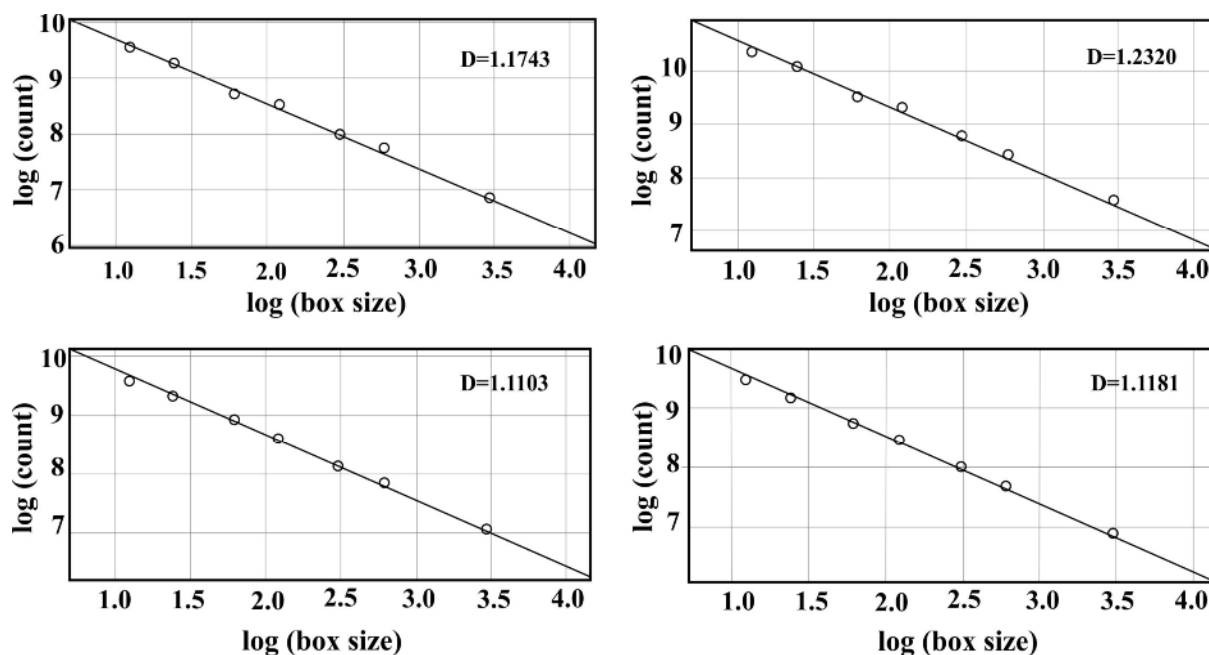
توسط تاکاهاشی و همکاران [۱۳] ارائه داده شده است برای محاسبه کرنش در کوارتزها استفاده می‌شود. کوارتزهای نمونه RH 4-6 در گستره دمای ۲۵۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد گسترش یافته‌اند. با استفاده از مقدار بعد فرکتال ($D=1.173$)، نرخ کرنش در دماهای ۲۵۰ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب $10^{-11/6}$ و $10^{-8/6}$ است. در نمونه RH 5-4 گستره اندازه دانه-های کوارتز از ۰.۷۹ تا ۷.۱۲ 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 RH 5-5 و RH 6-2 به ترتیب ۱.۱۲ و ۱.۱۱ است. نرخ کرنش با استفاده از این مقادیر D در دماهای ۵۰۰ و ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد در جدول ۱ آورده شده است. کمترین مقدار کرنش ($10^{-6/6}$) کوارتزها برای نمونه RH 6-2 در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است.

اعتقاد بر این است که نرخ کرنش طبیعی زمین شناسی بین 10^{-12} تا 10^{-15} در تغییر است [۲۷، ۳۰] 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 دانه-های کوارتز هستند. این نمودار بر اساس آزمایش‌های انجام شده با نرخ کرنش 10^{-6} 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 بازتبلور 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 بازتبلور یافته بزرگتر شده و مهاجرت مرز دانه‌ها (GBM) پدیده غالب می‌شود. GBM در دمای بالاتر از $550-500^{\circ}\text{C}$ 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 تغییر شکل 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 [۲۴، ۲۵] (شکل‌های ۳ پ و ت).

بحث و بررسی

شکل ۴ نشان دهنده جایگاه نمونه‌های مورد بررسی در نمودارهای $\log d$ نسبت به $\log N_d$ و نمایش بعد فرکتال (D) در سنگ‌های مورد بررسی است. بعد فرکتال برای هر نمونه بصورت شیب خط مستقیم در هر نمودار نمایش داده شده است. نتایج تجزیه و تحلیل فرکتال در ۴ منطقه مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده‌است. نمونه RH 4-6 در لبه گرانیته آبادچی قرار داشته و نسبت به بقیه نمونه‌ها بزرگ‌ترین دانه‌های کوارتز را دارد (۱۵/۵ میلی‌متر). گستره بعد فرکتالی این نمونه نیز بالاست ($D=1.173$) در حالی که بقیه نمونه‌ها دارای مقادیر D پایین‌تری هستند. چنان که پیشتر بیان شد، رابطه (۱) که



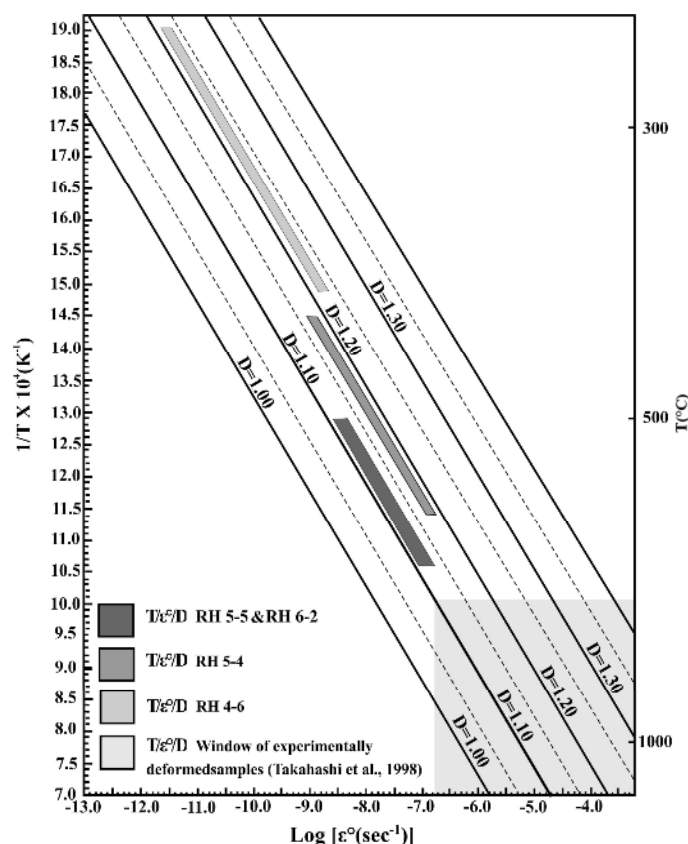
شکل ۴ جایگاه نمونه‌های مورد بررسی در نمودارهای $\log d$ نسبت به $\log N_d$ و نمایش بعد فرکتال (D) در سنگ‌های مورد بررسی.

جدول ۱ محاسبه بعد فرکتال (D) داده‌های کوآرتز محاسبه شده از بررسی نمونه‌های منطقه آبادچی. (n: تعداد دانه‌های کوآرتز مورد بررسی در هر نمونه، d: اندازه دانه، $\dot{\epsilon}$: 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	$10^{-11.6}$ (۲۵۰ °C) – $10^{-8.6}$ (۴۰۰ °C)
RH 5-4	۲۵۵	۰.۷۹ – ۷.۱۲	۱.۱۷	10^{-9} (۴۲۰ °C) – $10^{-8.6}$ (۶۰۰ °C)
RH 5-5	۲۱۴	۰.۵۹ – ۸.۵۸	۱.۱۲	$10^{-8.7}$ (۵۰۰ °C) – $10^{-7.1}$ (۷۵۰ °C)
RH-6-2	۲۲۷	۰.۸۱ – ۷.۱۳	۱.۱۱	$10^{-8.4}$ (۵۰۰ °C) – $10^{-6.6}$ (۷۵۰ °C)

شیست سبز بالایی، آمفیبولیت و گرانولیت‌ها برای تغییر شکل و شکل‌پذیری طبیعی به دمای بیش از ۳۴۵ درجه سانتی‌گراد نیاز دارند (به طور کلی تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر). با این حال، با استفاده از شکل ارائه شده توسط [۱۳]، در دمای بیش از ۳۴۵ درجه سانتی‌گراد نرخ کرنش بالا برآورد می‌شود. چنان که در شکل ۵ دیده می‌شود، در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، $D > 1$ و نرخ کرنش بیش از $10^{-8.8}$ خواهد بود. برای گرانیت‌ها، نرخ کرنش بیش از این نیز برآورد شده است [۱۱، ۱۲].

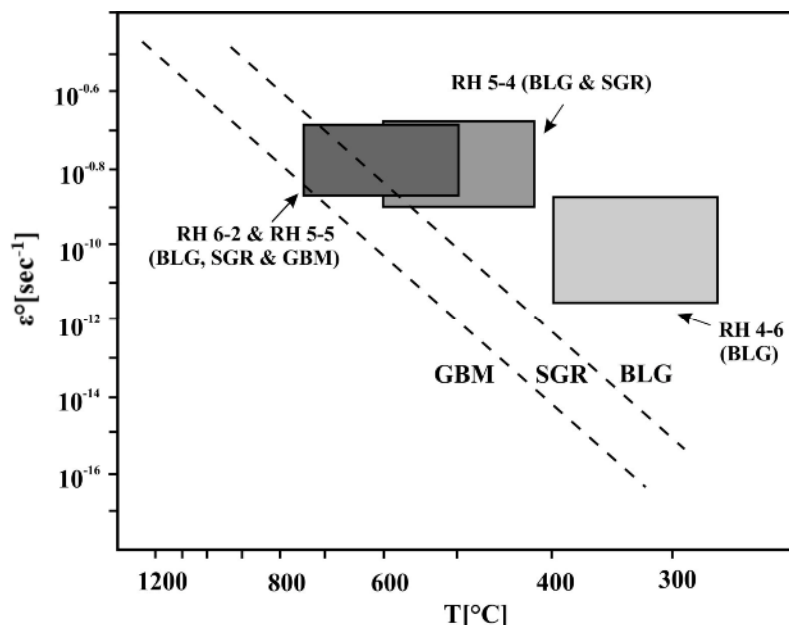
جایگاه نمونه‌های مورد بررسی در نمودار $1/T \times 10^4 (K^{-1})$ نسبت به $\log [\dot{\epsilon} (sec^{-1})]$ در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند. منطقه بسیار کوچک (مستطیل خاکستری) در شکل ۵ نشان‌دهنده داده‌های اصلی مرجع [۱۳] است گفتنی است که D باید بین خطوط ۱ تا ۲ باشد، زیرا همه بررسی‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های 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 ۳۴۵ ~ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین، دمای بیش از ۳۴۵ درجه سانتی‌گراد و $D > 1$ مربوط به نرخ کرنش کم‌تر از 10^{-12} است. رخساره‌های



شکل ۵ نمودار $1/T \times 10^4 (K^{-1})$ نسبت به $\log [\dot{\epsilon} (sec^{-1})]$ که نمایشگر رابطه بین ابعاد فرکتال (D) و شرایط کرنش است. (برگرفته از شکل ۴ از مرجع [۱۳] با اصلاحات).

دما/نرخ کرنش در مرجع [۳۴] برای آزمودن و تایید نرخ کرنش برآورد شده 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 دمایی ۴۰۰-۲۵۰ درجه سانتی-گراد قرار گرفته‌اند و انتظار می‌رود که این کوارتزها در گستره BLG قرار گیرند (شکل ۳ الف). به طور عمده مستطیل خاکستری در شکل ۶ برای کوارتزهای منطقه RH 4-6 در گستره BLG قرار گرفته است. پیش‌تر گفته شد که بافت کوارتزها در دمایی ۶۰۰-۴۲۰ درجه سانتی-گراد گسترش می‌یابد، با این حال چنان که بیان شد، انتظار می‌رود که این کوارتزها در گستره SGR و BLG قرار گیرند (شکل ۳ ب). چنان که دیده می‌شود، مستطیل خاکستری در شکل ۶ (منطقه RH 5-4) در قسمت SGR و BLG واقع است. در دو منطقه RH 5-5 و RH 6-2، کوارتزها در دمایی ۷۵۰-۵۰۰ درجه سانتی-گراد قرار داشته‌اند. این کوارتزها باید در گستره SGR و GBM دیده شوند (شکل‌های ۳ پ و ت). جایگاه این دو منطقه در نمودار $T(^{\circ}\text{C})/\dot{\epsilon}^{\circ}(\text{sec}^{-1})$ ، در گستره‌های BLG، SGR و GBM نمایش داده شده است.

مشخص شده است که ریزساختارهای موجود در سنگ‌ها به فرآیندهای تغییرشکل، نرخ کرنش و دما وابسته‌اند (برای مثال، [۳۱-۳۴]). 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 بازتبلور را در ناحیه گسل تونال (آلپ ایتالیا) مشاهده کردند، که عبارتند از: بازتبلور (BLG) در دمایی ۴۰۰-۲۵۰ درجه سانتی-گراد، چرخش ریزدانه (SGR) در ۵۰۰-۴۰۰ درجه سانتی-گراد، و مهاجرت مرز دانه (GBM) در ۷۰۰-۵۰۰ درجه سانتی-گراد). افزون بر این، استیپ و همکاران [۳۴] ریزساختارهای بازتبلور 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 بازتبلور) که ممکن است در سنگ باشد را تعیین نمود. افزون بر این، اگر دما و سازوکار بازتبلور مشخص باشد، با کمک نمودار می‌توان نرخ کرنش را برآورد کرد (برای مثال، [۳۵]). بنابراین، نمودار



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

تأثیر زمین‌ساخت منطقه‌ای بر مرزهای کوارتز

پژوهش حاضر نشان می‌دهد که بدون شک گرانیته گنبدی آبادچی به طور قابل توجهی دستخوش رخدادهای زمین‌ساختی منطقه ای شده است. هماهنگی مشابه بین جایگزینی گرانیته و زمین‌ساخت منطقه برای گرانیته‌های مختلفی از سراسر جهان گزارش شده است [۳۶-۴۰].

گسترش ریزساختارهای دمای بالا باعث کاهش دنداندار شدن مرز دانه‌های کوارتز می‌شود [۴۱]. افزایش دنداندار 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 همزمان با 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 همزمان با تکامل تغییرشکل اولیه منطقه بوده است قابل مشاهده است. در این مرحله، گرانیته‌ها 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. تأثیر 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 سنجدی به روش $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ برای سنگ‌های اکلوتیت، پاراگنیس و متاگرانیته‌های 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 گرانیته گنبد چرخورده و دگرشکل شده آبادچی در پهنه ساختاری سنجد-سیرجان در جنوب غربی ایران واقع است. بافت اصلی توده آبادچی ورقه دانه شکفتی است که از

نظر شکل مرز دانه‌ای از اینترلوبیت تا آمیبی شکل تغییر می‌کند. کانی‌های اصلی این توده شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، 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 بازتبلور دینامیکی (از نوع GBM, SGR, BLG)، شکل‌گیری زیر دانه‌ها، تغییر شکل مرز دانه‌ها و ایجاد نودانه‌ها اشاره نمود. نتایج آزمایش‌ها در مورد تغییر شکل بلور-های 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. کوارتزها بیش‌ترین مقدار کرنش $(10^{-11/6})$ در نمونه RH 4-6 با بعد فرکتال $1/23$ در دمای 250°C درجه‌سانتی‌گراد و کم‌ترین مقدار کرنش $(10^{-6/6})$ برای نمونه RH 6-2 با بعد فرکتال $1/11$ در دمای 800°C درجه‌سانتی‌گراد ثبت شده است. با کمک نمودار دما/نرخ کرنش، شرایط تغییرشکل در نمونه‌های مورد بررسی با استفاده از سازوکار بازتبلور برآورد شد که نتایج بدست آمده از نمودارها با شواهد دگرشکلی بلورهای کوارتز (GBM, SGR, BLG) همخوانی داشتند. از آنجا که این منطقه دستخوش یک رویداد زمین‌ساختی شده است، طی سرد شدن و کاهش اثر رویداد زمین‌ساختی ریزساختارهای بازتبلور دمای پایین بطور پیوسته در لبه توده دیده می‌شود.

قدردانی

نویسندگان 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.Huttentw., 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).

- 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., Ondo 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. Holdworth, 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., Mohajjel 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] Mamtani 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., Mamtani M.A., "Fractal analysis of quartz grain boundary sutures in a granite (Malanjhand, 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., "⁴⁰Ar/³⁹Ar 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, TibeteNepal", 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] Piazzolo 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., St.nitz 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., St.nitz 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] Mamtani M.A., Mukherji A., and Chaudhuri A.K., "Microstructures in a Banded Iron