



تعیین دمای دگرشکلی بر مبنای رژیم‌های مختلف بازبلورش کوارتز در گنبد گنایسی توتک، کمربند دگرگونی سنندج - سیرجان، ایران

معصومه سلیمانی (نویسنده مسئول)^۱، علی فقیه^۲، معصومه ادیبی نژاد^۳

^۱بخش علوم زمین دانشگاه شیراز soleimani.geo20@yahoo.com

^۲بخش علوم زمین دانشگاه شیراز afaghiih@shirazu.ac.ir

^۳بخش علوم زمین دانشگاه شیراز masomeadibi@yahoo.com

چکیده

استفاده از الگوهای بازبلورش برای تشخیص دمای دگرشکلی در سنگ‌های میلونیتی یک روش ارزشمند در مطالعات زمین‌شناسی ساختاری است. در این پژوهش بر اساس مطالعه الگوهای توسعه بازبلورش کانی کوارتز در در سنگ‌های دگرشکل‌شده، دمای دگرشکلی در گنبد گنایسی توتک تعیین شده است. گنبد گنایسی توتک در کمربند دگرگونی سنندج- سیرجان و در شمال شرق استان فارس قرار گرفته است. در مطالعات میکروسکوپی سنگ‌های دگرشکلی در این گنبد گنایسی الگوهای مختلف بازبلورش نظیر برآمدگی و چرخش خرده دانه‌های کوارتز مشاهده گردید. وجود این الگوهای بازبلورش کوارتز در سنگ‌های میلونیتی نشانگر رخداد دگرشکلی در دمای کمتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. نتایج حاصل از این مطالعه مشخص نمود که دگرشکلی در این گنبد گنایسی در عمق حدود ۲۰ کیلومتری رخ داده است. این شرایط با رخساره دگرگونی شیست سبز تا آمفیبولیت زیرین قابل مقایسه است.

واژه‌های کلیدی

گنبد گنایسی توتک، بازبلورش دینامیکی کوارتز، دمای دگرشکلی، سنندج- سیرجان.



۱. مقدمه

به‌طور معمول گنبد‌های گنایسی در کمربند‌های کوهزایی سراسر جهان متشکل از یک هسته‌ی میگماتیت گرانیتی و یا گنایسی با پوششی از سنگ‌های رسوبی با درجات مختلف دگرگونی مشاهده می‌شوند [1]. دلایل متعددی شامل دیاپیرسم هدایت‌شده توسط خاصیت شناوری و ویسکوزیته پایین به دلیل گرما (حرارت)، چگالی کم سنگ‌های پوسته میانی یا ماگما با چگالی پایین [2, 3, 4]، بیرون‌زدگی‌های کششی سنگ‌های پوسته میانی در فرادایره‌ی گسل نرمال کم زاویه [5, 6, 7] و بیرون‌زدگی‌های انقباضی سنگ‌های پوسته میانی از طریق راندگی‌ها و فرسایش سریع سطح [7, 8] برای ایجاد یک گنبد گنایسی گزارش شده است. عامل شکل‌گیری برخی از گنبد‌ها ترکیبی از این فرایندها [9] است. تفاوت قابل‌توجهی در تکامل زمین‌ساختی یک کوهزایی با هر کدام از این سازوکارها و یا ترکیبی از آن‌ها ایجاد می‌شود.

بررسی ارتباط دگرشکلی و فعالیت‌های ماگمایی و دگرگونی نقش موثری در شناخت روند تکامل فرایندهای کوهزایی دارد. توسعه هر یک از ساختارهای دگرشکلی در شرایط خاص دما، فشار و عمق صورت می‌گیرد. برای تعیین شرایط دگرشکلی در سنگ‌های میلونیتی از شواهد ریزساختاری کانی‌های مختلف از جمله کوارتز و فلدسپار استفاده می‌شود. اخیراً به تعیین خصوصیات دگرشکلی مانند دما در کمربند‌های کوهزایی توجه ویژه‌ای شده است. در این پژوهش با استفاده مطالعه میکروسکوپی رژیم‌های مختلف بازبلورش توسعه یافته در کانی کوارتز در سنگ‌های میلونیتی گنبد گنایسی توتک، دمای دگرشکلی تخمین زده شده است.

۲. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

زون سندانج- سیرجان یکی از زون‌های زمین‌ساختی ایران، دارای پیچیدگی‌های بی‌شمار است که تحت تأثیر فرآیندهای گوناگون زمین-ساختی، ماگمایی و دگرگونی قرار گرفته است. گنبد گنایسی توتک در این زون زمین‌ساختی قرار گرفته است. گستره منطقه مورد مطالعه در بردارنده‌ی مساحتی حدود ۱۳۰ کیلومترمربع از شرق به استان یزد، از جنوب به مرودشت و از غرب به صفاشهر (ده بید) ختم می‌شود. از جمله راه‌های دسترسی به این منطقه مسیر صفاشهر (ده بید، شهرستانی که در مسیر جاده شیراز- تهران قرار دارد) - سوریان - توتک است.

عملکرد فرسایش سنگ‌ها و شکستگی‌ها در گنبد گنایسی توتک سبب توپوگرافی پست هسته‌ی گنبد شده است. شیب لایه‌های مرمر در بخش جنوبی گنبد گنایسی توتک، نسبت به بخش شمالی بیشتر است. در این بخش به هم‌ریختگی واحدهای سنگ‌شناختی توسط گسل‌های کوچک متعددی انجام شده است. در بخش شمال‌غرب تافدیس و مخصوصاً در غرب آن واحدهای میکاشیست مرمر شدیداً به هم ریخته‌اند.

گنبد گنایسی توتک از هسته به سمت حاشیه دارای چهار واحد سنگ‌شناسی شامل گرانیت گنایس بندنو و آپلیت گرانیت، همتافت توتک (شامل: میکاشیست، هورنفلس، کالک سیلیکات، آمفیبولیت و کنگلومراهای دگرشکل‌شده)، لایه‌های ضخیم مرمر (کوه سفید) شناخته شده و همتافت سوریان (شامل: کوارتزیت، میکاشیست و گرین شیست) است. دو نوع گرانیت درون گنبد‌های گنایسی توتک شامل آپلیت گرانیت و دیگری گرانیت گنایس بندنو با گرانیت‌های برگواره شده مشاهده می‌شود. تقریباً تمام گرانیت‌های آپلیتی جهت‌دار شده و گرانیت‌های برگواره شده درون گنبد را تشکیل می‌دهند. لایه‌های ضخیم مرمر کوه سفید بر روی هر دو گرانیت گنایس بندنو و همتافت توتک قرار گرفته‌اند.

گسل سوریان و گسل مزایجان در شمال و جنوب گنبد گنایسی توتک، مهم‌ترین گسل‌های بزرگ مقیاس در منطقه مطالعاتی می‌باشند که موازی با گسل‌های اصلی زاگرس جهت‌گیری کرده‌اند و گنبد گنایسی توتک را در بر گرفته‌اند. علیرغم اینکه مدارک و اسنادی یکسانی برای نشان دادن جهت حرکت آن‌ها نیست، آن‌ها توسط ساختارهای میکرو، مزو و ماکرو به‌طور عمومی به‌عنوان گسل‌های شیب‌لغز-تراستی مشخص شده‌اند. بالاآمدگی این گسل‌ها باعث حرکت و جابه‌جایی لایه‌ها و طبقات به سمت پیش‌بوم زاگرس شده و هندسه‌ای گوه شکل را ایجاد کرده است [10].



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای Google Earth از منطقه مورد مطالعه را مشاهده می‌کنید.

وجود ساختارهای دگرشکلی در گرانیتهای موجود در گنبد گنایسی نشانگر کوهزایی‌های مکرر و پی‌درپی است. با توجه به تعریف [1] از گنبد گنایسی، در ابتدا منشأ هسته گنبد گنایسی توتک خاستگاه پلوتون گرانیتهی (آپلیت گرانیتهی) داشته و مشابه با پوسته‌ی قاره‌ای ایران مرکزی بوده است. رژیم کششی NE-SW باعث تزریق گرانیتهای در کمربند کوهزایی شده و سپس بی‌طاق شده‌اند و نهایتاً به‌طور مکرر توسط لایه‌هایی از رسوبات پوشیده شده است. این لایه‌ها شامل کنگلومرای پایه (کنگلومرای مرشدی) و دربردارنده‌ی قطعاتی از گرانیتهای در زیر هستند. با شروع مجدد نیروهای کوهزایی، گرانیتهای تحریک شده‌اند (گرانیت گنایس بندوق). عموماً در این زمان سنگ‌های رسوبی، دگرگون شده‌اند [10].

۳. روش کار

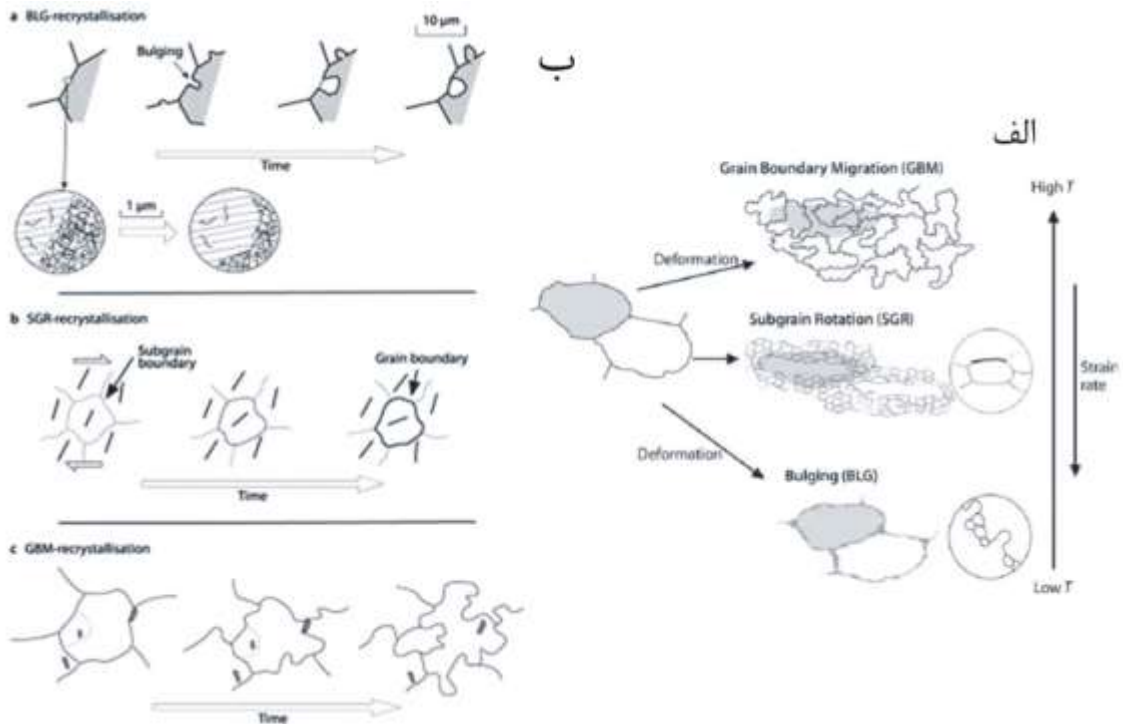
۳.۱. بازبلورش دینامیکی کوارتز:

براساس بسیاری از مطالعات، نوع بازبلورش دینامیک ارتباط مستقیمی با دمای دگرشکلی دارد و می‌تواند به‌عنوان دماسنج دگرشکلی مورد استفاده قرار گیرد [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. رژیم‌های بازبلورش به ترتیب با افزایش دما شامل برآمدگی مرز دانه‌ها (BLG)، چرخش ریزدانه‌ها (SGR)، مهاجرت مرز دانه‌ها (GBM) می‌باشد [13, 14].

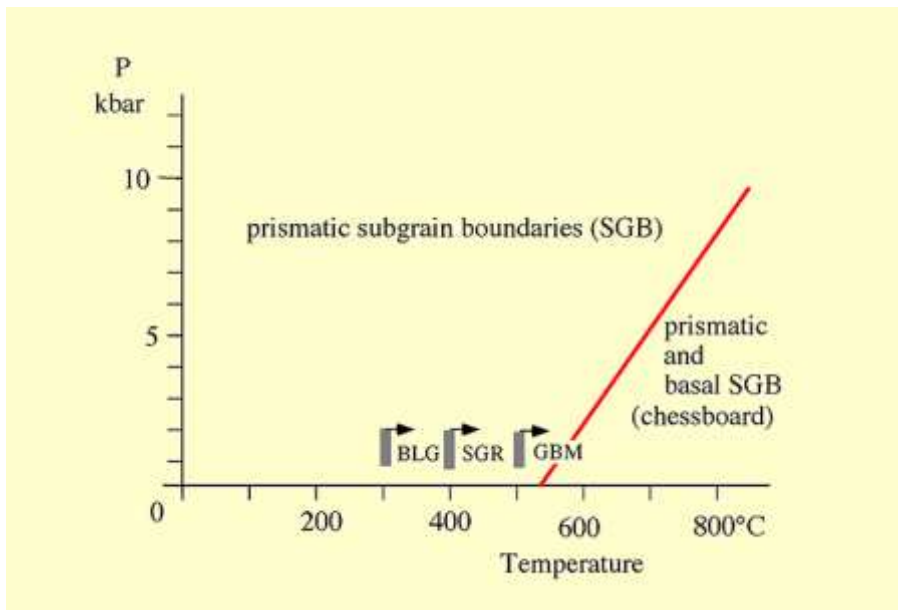
در درجه حرارت پایین‌تر حرکت مرز دانه ممکن است به صورت محلی باشد و دگرشکلی باعث برآمدگی به داخل بلوری با تراکم دگرشکلی بالا می‌شود و بلور جدید و کوچکی را شکل می‌گیرد، به این پدیده بازبلورش برآمدگی (BLG) می‌گویند [19, 13, 14].

با افزایش دما به جابه‌جایی‌ها افزوده شده و تبدیل مداوم دیواره‌ها به ریزدانه‌های جدید را مشاهده خواهیم نمود، به این پدیده بازبلورش اثر چرخش ریزدانه (SGR) گفته می‌شود که نسبت به بازبلورش برآمدگی در دمای بالاتری رخ می‌دهد. در حرارت‌های نسبتاً بالا افزایش حرکت مرز دانه‌ها به حدی می‌رسد که می‌تواند نقاط ضعف در مرز ریزدانه‌ها را از بین ببرد و به این نوع بازبلورش مهاجرت مرز دانه (GBM) می‌گویند (شکل ۲) [18].

معمولاً در سنگ‌های دگرشکل شده، شروع بازبلورش دینامیک کوارتز از دمای حدود ۲۸۰ درجه است. در دمای ۲۸۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بازبلورش برآمدگی (BLG)، در دمای ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بازبلورش زیردانه (SGR) و در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بازبلورش مهاجرت مرز دانه (GBM) رخ می‌دهد (شکل ۳) [13, 14, 16].



شکل ۲. الف- ارتباط سه نوع اصلی بازبلورش دینامیک با تغییر درجه حرارت و نرخ استرین در یک چند بلوری و ب- توسعه سه نوع رژیم بازبلورش دینامیکی در طی زمان را مشاهده می کنید [18].

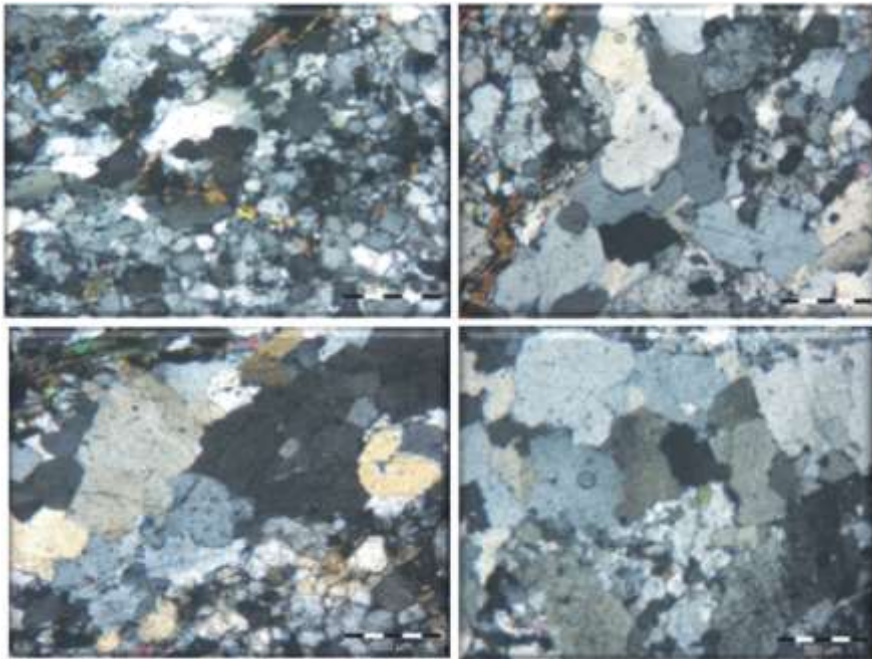


شکل ۴. نمودار P-T گستره بازبلورش دینامیکی در کوارتز را نشان می دهد
 Error! No text of specified style in document.. [13, 14, 20]

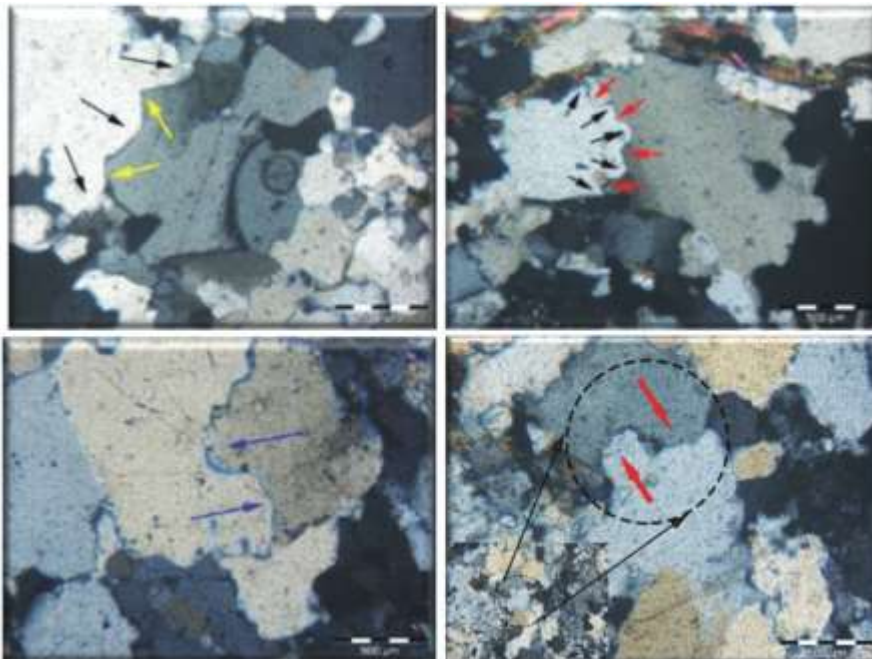
۴. نتایج
 ۱.۴. بازبلورش دینامیکی کوارتز



مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک از سنگ‌های دگرشکل شده (گرانیت گنایس‌های توتک) نشان می‌دهد که کوارتزهای موجود در این مقاطع، دچار بازبلورش دینامیکی نوع برآمدگی (BLG) در برخی مقاطع دارای ترکیبی از بازبلورش برآمدگی (BLG) و چرخش ریزدانه (SGR) شده‌اند که نشانگر درجه حرارت حدود ۲۸۰ تا ۴۰۰ سانتی‌گراد می‌باشد (شکل‌های ۴ و ۵ و جدول ۱).



شکل ۴. بلورهای کوارتز موجود در گنبد گنایسی توتک بازبلورش چرخش ریزدانه (SGR) را نشان می‌دهند.



شکل ۵. بلورهای کوارتز موجود در گنبد گنایسی توتک با بازبلورش برآمدگی (BLG) شکل گرفته‌اند.

جدول ۱. نتایج حاصل از بررسی‌های میکروسکوپی سازوکار بازبلورش دینامیکی کوارتز برای مقاطع نازک

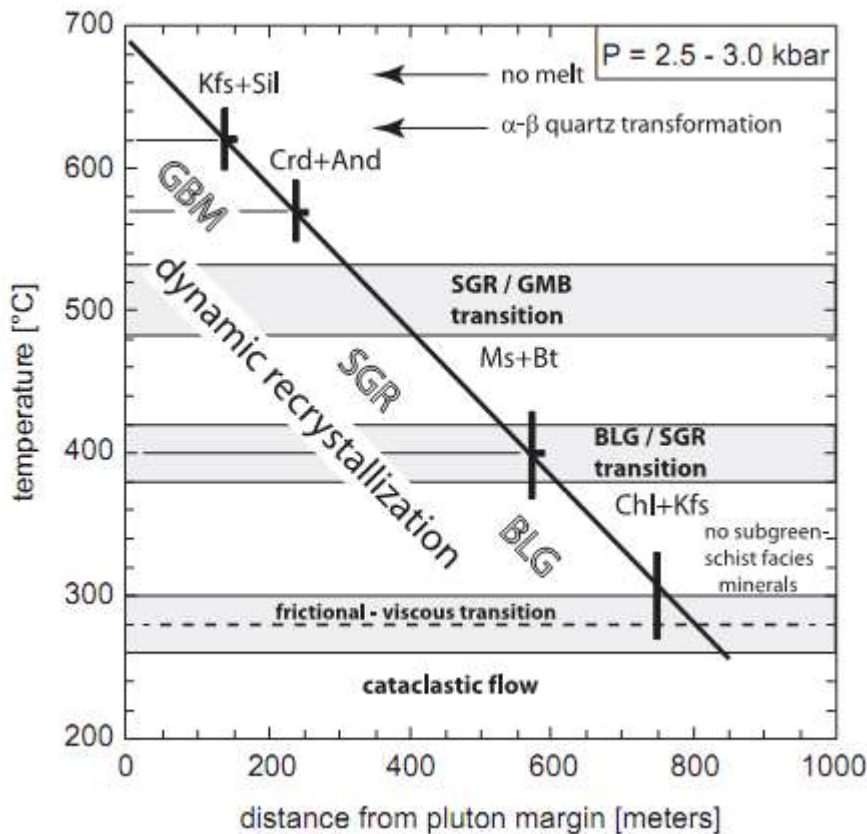
Sample No.	Rock type	Mineral	Type Of quartz	Estimated T
------------	-----------	---------	----------------	-------------



(°C)	recrystallization			
410 - 490	SGR	Qz + Fel + Mus + Bio	geranit-gneiss	T01
410 - 490	SGR	Qz + Fel + Mus + Bio + Plg	geranit-gneiss	T02
270 - 390	BLG	Qz + Fel + Mus + Bio	geranit-gneiss	T03
410 - 490	SGR	Qz + Fel + Mus + Bio + Plg	geranit-gneiss	T04
270 - 390	BLG	Qz + Fel + Mus + Bio	geranit-gneiss	T05
270 - 390	BLG	Qz + Fel + Mus + Bio	geranit-gneiss	T06
270 - 390	BLG	Qz + Fel + Mus + Bio	geranit-gneiss	T07
410 - 490	SGR	Qz + Fel + Mus + Bio + Plg	geranit-gneiss	T08

۵. بحث

تعیین دمای دگرشکلی یک نیاز کلیدی در بسیاری از مطالعات ساختاری است که سعی در ارزیابی نرخ استرین در طول رویدادهای کوهزایی دارند [21, 22, 23, 24, 25]. مطالعات متعددی توسط محققین مختلف جهت تعیین دمای دگرشکلی با روش‌های متفاوت در سنگ‌های دگرشکلی انجام گرفته است [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36]. دماسنج بازبلورش کوارتز به طور بالقوه ارزیابی کیفی محدوده احتمالی دماهای دگرشکلی را بر اساس ریزساختارهای مشاهده شده و سازوکارهای استنباط شده بازبلورش دینامیکی (برآمدگی مرز دانه در دمای پایین، چرخش زیردانه و مهاجرت مرز دانه در دمای بالا) ارائه می‌دهد. این دماسنج مبتنی بر ریزساختار بر اساس مطالعه رگه‌های کوارتز دگرشکل طبیعی و بازبلورش دینامیکی توسط [13, 14] ارائه شده است (شکل ۶).



شکل ۶. روابط بین نواحی بازبلورش کوارتز و دمای محلی تماس دگرگونی مشخص شده است. نوارهای عمودی سیاه نشان دهنده خطاهای احتمالی (± 30 درجه سانتی‌گراد) در تخمین دما از ایزوگرادهای واکنش هستند. BLG: مرز دانه برآمدگی منطقه بازبلورش، SGR: ناحیه چرخش زیردانه. GBM: منطقه مهاجرت مرز دانه [37].

۶. نتیجه‌گیری

مهم‌ترین عوامل مؤثر در سازوکار بازبلورش دینامیکی کوارتز شامل دما، نرخ استرین و فعالیت مایعات است. ارتباط ناحیه‌ای بین زونینگ دگرگونی و رژیم بازبلورش، وابستگی دما و عملکرد سازوکار بازبلورش‌های مختلف در کوارتز را مشخص می‌کند [38]. مطالعات رژیم بازبلورش دینامیکی کوارتز در گنبد گنایسی توتک نشان‌دهنده تأثیر رژیم بازبلورش دینامیکی BLG و SGR و حالت تبدیل بازبلورش BLG به SGR در بلور کوارتز است که تخمین دمای دگرشکلی بین ۲۷۰ تا ۳۹۰ درجه سانتی‌گراد برای حالت اول (BLG) و ۴۱۰ تا ۴۹۰ درجه سانتی‌گراد برای بازبلورش دوم (SGR) و دمای ۳۹۰ تا ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد برای حالت حدواسط و گذار از بازبلورش BLG به SGR است.

با توجه به حضور این رژیم‌های بازبلورش در مقاطع نازک مطالعه شده دمای دگرشکلی حاصل از بازبلورش کوارتز بین ۲۷۰ تا ۴۹۰ درجه سانتی‌گراد در گنبد گنایسی توتک تخمین زده شد. این نتایج با تخمین‌های استیپ و همکاران (۲۰۰۲) سازگار است. فیتز جرال و همکاران (۲۰۰۶) نشان داده‌اند که کوارتزهای دگرشکل شده تحت شرایط رخساره آمفیبولیت خشک (۵۸۰-۵۱۰ درجه سانتی‌گراد) متحمل بازبلورش چرخش ریزدانه و برآمدگی شده‌اند. کولب و همکاران (۲۰۰۵) بیان کرده‌اند که فعالیت بالای آب در رگه‌های کوارتزها، باعث ایجاد بازبلورش چرخش ریزدانه‌ها در شرایط دمای ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد شده است درحالی‌که کوارتزهای فقیر از آب تحت شرایط دمایی یکسان دچار بازبلورش برآمدگی می‌شوند. شرایط اشباع‌شدگی آب با مدل [13, 14] همخوانی دارد.



قدردانی

بدینوسیله نویسندگان از پشتیبانی‌های مادی و معنوی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شیراز در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- [1] Eskola, P.E., 1949. The problem of mantled gneiss domes: Quarterly. *Journal of the Geological Society of London* 104, 461–476.
- [2] Ramberg, H., 1980. Diapirism and gravity collapse in the Scandinavian Caledonides. *Journal Geological Society London* 137, 261–270.
- [3] Calvert, A.T., Gans, P.B., Amato, J.M., 1999. Diapiric ascent and cooling of a sillimanite gneiss dome revealed by ⁴⁰Ar/³⁹Ar thermochronology: the Kigluaik Mountains, Seward Peninsula, Alaska. *Geological Society, London, Special Publications* 154(1), 205–232.
- [4] Teyssier, C., Whitney, D.L., 2002. Gneiss domes and orogeny. *Geology* 30, 1139–1142, [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<1139:GDAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<1139:GDAO>2.0.CO;2)
- [5] Brun, J. V., Jean Van Den Driessche., 1994. Extensional gneiss domes and detachment faults—structure and kinematics. *Bulletin de la Societe Geologique de France* 165, 519–530.
- [6] Holm, D.L., Lux, D.R., 1996. Core complex model proposed for gneiss dome development during collapse of the Paleoproterozoic Penokean Orogen, Minnesota. *Geology* 24, 343–346.
- [7] Brun, J., 1983. L'origine des dômes gneissiques: Modèles et tests. *Bulletin de la Société Géologique de France* 25, 219–228.
- [8] Burg, J.-P., Brunel, M., Gapais, D., Chen, G.M., Liu, G.H., 1984. Deformation of leucogranites of the Crystalline Main Central Thrust Sheet in southern Tibet (China). *Journal of Structural Geology* 6(5), 535–542. doi: 10.1016/0191-8141(84)90063-4.
- [9] Lee, J., Hacker, B.R., Dinklage, W.S., Wang, Y., Gans, P., Calvert, A., Wan, J., Chen, W., Blythe, A.E., McClelland, W., 2000. Evolution of the Kangmar Dome, southern Tibet: structural, petrologic and thermochronologic constraints, *Tectonics* 19, 872–895.
- [10] Sarkarinejad, K., Alizadeh, A., 2009. Dynamic model for the exhumation of the Tutak gneiss dome within a bivergent wedge in the Zagros Thrust System of Iran. *Journal of Geodynamics* 30, 1–9.
- [11] Lafrance, B., John Barbara, E., Frost, B.R., 1998. Ultra high-temperature and subsolidus shear zones: Examples from the Poe Mountain anorthosite, Wyoming. *Journal of Structural Geology* 20, 945–955.
- [12] Altenberger, U., Wilhelm, S., 2000. Ductile deformation of K-feldspar in dry eclogite facies shear zones in the Bergen Arcs, Norway. *Tectonophysics* 320, 107–121.
- [13] Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R., Schmid, S.M., 2002 a. 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 Structural Geology* 24, 1861–1884.
- [14] Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R., Schmid, S.M., 2002b. Dynamic recrystallization of quartz: correlation between natural and experimental conditions. In: De Meer, S., Drury, M.R., De Bresser, J.H.P., Pennock, G.M. (Eds.), *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics, Current Status and Future Perspectives*.
- [15] Rosenberg, C.L., 2003. Deformation and recrystallisation of plagioclase along a temperature gradient: An example from the Bergell tonalite: *Journal of Structural Geology* 25, 389–408, doi: 10.1016/S0191-8141(02)00036-6.
- [16] Guang, Z., Cheng-Long, X., Wen, C., Xiang, Bi-W., Zhao-Qi, H., 2009. Evolution of the Hongzhen metamorphic core complex: Evidence for Early Cretaceous extension in the eastern Yangtze craton, eastern China. *Geological Society of America. GSA Bulletin*; March/April 2010; v. 122; no. 3/4; p. 506–516.
- [17] Mancktelow, N.S., Pennacchioni, G., 2004. The influence of grain boundary fluids on the microstructure of quartz–feldspar mylonites. *Journal of Structural Geology* 26, 47–69.
- [18] Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 2005. *Microtectonics*: New York, Springer 366 p.
- [19] Shigematsu, N., 1999. Dynamic recrystallization in deformed plagioclase during progressive shear deformation. *Tectonophysics* 305, 437–452.
- [20] Kruhl, J.H., 1998. Reply: Prism- and basal-plane parallel subgrain boundaries in quartz: a microstructural geothermobarometer. *Journal of Metamorphic Geology* 16, 142–146.
- [21] Hacker, B. R., 1990. Amphibolite-facies to granulite-facies reactions in experimentally deformed unpowdered amphibolite: *American Mineralogist* 75, 1349–1361.
- [22] Dunlap, W.J., Hirth, G., Teyssier, C., 1997. Thermomechanical evolution of a ductile duplex. *Tectonics* 16, 983–1000.
- [23] Behr, W.M., Platt, J.P., 2011. A naturally constrained stress profile through the middle crust in an extensional terrane. *Earth and Planetary Science Letters* 303, 181–192.



- [24] Mahmoudi Sivand, S., Faghih, A., Keshavarz, S., Soleimani, M., 2021. Characterizing syn-convergent extension along the Neybaz-Chatak detachment shear zone, Central Iran: insights from microstructures, quartz petrofabrics and flow vorticity analysis. *Journal of Structural Geology* 143,104270, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104270>
- [25] Soleimani, M., Faghih, A., Kusky, T., 2021. Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Central East Iranian Microcontinent: evidence from the Boneh Shurow metamorphic core complex. *Journal of Geological Society of London*. <https://doi.org/10.1144/jgs2020-123>
- [26] Bouchez, J.L., 1977. Plastic deformation of quartzites at low temperatures in an area of natural strain gradient. *Tectonophysics* 39, 25–50.
- [27] Bouchez, J.L., Pecher, A., 1981. Himalayan main central thrust pile and its quartzrich tectonites in central Nepal. *Tectonophysics* 78, 23–50.
- [28] Mainprice, D., Bouchez, J.L., Blumenfeld, P., Tubia, J.M., 1986. Dominant c-slip in naturally deformed quartz: implications for dramatic plastic softening at high temperature. *Geology* 14, 819–822.
- [29] Jessell, M., Lister, G.S., 1990. A simulation of the temperature dependence of quartz fabrics. In: Knipe, R.J., Rutter, E.H. (Eds.), *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics*. Geological Society, London, Special Publications, 54, 353–362.
- [30] Lloyd, G.E., Freeman, B., 1994. Dynamic recrystallization of quartz under greenschist conditions *Journal of Structural Geology* 16, 867–888.
- [31] Hirth, G., Teyssier, C., Dunlap, W.J., 2001. An evaluation of quartzite flow laws based on comparisons between experimentally and naturally deformed rocks. *International Journal of Earth Sciences* 90, 77–87.
- [32] Law, R.D., Searle, M.P., Simpson, R.L., 2004. Strain, deformation temperatures and vorticity of flow at the top of the Greater Himalayan Slab, Everest Massif, Tibet. *Journal of the Geological Society, London*, 161, 305–320. <https://doi.org/10.1144/0016-764903-047>
- [33] Faghih, A., Soleimani, M., 2015. Quartz c-axis fabric development associated with shear deformation along an extensional detachment shear zone: Chapedony Metamorphic Core Complex, Central-East Iranian Microcontinent. *Journal of Structural Geology* 70, 1–11.
- [34] Keshavarz, S., Faghih, F., 2020. Heterogeneous sub-simple deformation in the Gol-e-Gohar shear zone (Zagros, SW Iran): insights from microstructural and crystal fabric analyses. *International Journal of Earth Sciences* 109, 421–438.
- [35] Bose, N., Mukherjee, S., 2020. Estimation of deformation temperatures, flow stresses and strain rates from an intra-continental shear zone: the Main Boundary Thrust, NW Himalaya (Uttarakhand, India). *Marine and Petroleum Geology* 112, 104094.
- [36] Faghih, A., Soleimani, M., Partabian, A., 2020. Exhumation style of the Chapedony core complex, Central Iran: insights from kinematic vorticity analysis. *Geotectonics* 54, 705–712, <https://doi.org/10.1134/S0016852120050040>
- [37] Law, R.D., 2014. Deformation thermometry based on quartz c-axis fabrics and recrystallization microstructures: a review. *Journal of Structural Geology* 66, 129–161, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.05.023>
- [38] Faleiros, F. M., da Cruz Campanha, G. A., da Silveira Bello, R. M., Fuzikawa, K., 2010. Quartz recrystallization regimes, c-axis texture transitions and fluid inclusion reequilibration in a prograde greenschist to amphibolite facies mylonite zone (Ribeira Shear Zone, SE Brazil). *Tectonophysics* 485(1-4), 193-214.