



### تحلیل دگرشکلی شکل‌پذیر بر اساس الگوی جهت‌گیری ترجیحی شبکه کوارتز (مطالعه موردی: همتافت هسته دگرگون چاپدون، ایران مرکزی)



#### چکیده:

همتافت هسته دگرگون چاپدون در خردقاره شرق ایران مرکزی واقع شده است. مطالعات ریزساختاری براساس الگوی محور C کوارتز به منظور تعیین ماهیت دگرشکلی در زون برشی جداشدگی در این همتافت انجام شد. در این پژوهش درجه حرارت دگرشکلی و سامانه های لغزشی فعال در طی دگرشکلی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، رژیم دگرشکلی در این همتافت از نوع برش کلی با ترکیب ۴۷٪ برش ساده و ۵۳٪ برش محض تعیین گردید. آنالیزهای ریزساختاری و استرین محدود، تغییرات هندسه استرین از استرین صفحه‌ای تا پخش‌شدگی کلی در همتافت هسته دگرگون چاپدون را تأیید می‌نماید.

**کلید واژه ها:** (همتافت هسته دگرگون، محور C کوارتز، سامانه لغزشی، استرین محدود، رژیم دگرشکلی)

#### Analysis of ductile deformation based on the lattice preferred orientation of quartz (Case study: Chapedony metamorphic core complex, Central Iran)

#### Abstract:

Chapedony metamorphic core complex is located in the East-Central Iranian Microcontinent. Microstructural studies were carried out based on the study of quartz c-axis pattern in order to determine the deformation nature in the detachment shear zone of this complex. In this research, the deformation temperature and active slip systems during deformation were evaluated. Based on the obtained results of this research, deformation regime in this complex was determined as general shear consisting of 47% simple shear and 53% pure shear, respectively. Microstructural and finite strain analyses confirm the strain geometry variations from plane strain to general flattening in the Chapedony metamorphic core complex.

**Keywords :** (metamorphic core complex, quartz c-axis, slip system, finite strain, deformation regime)



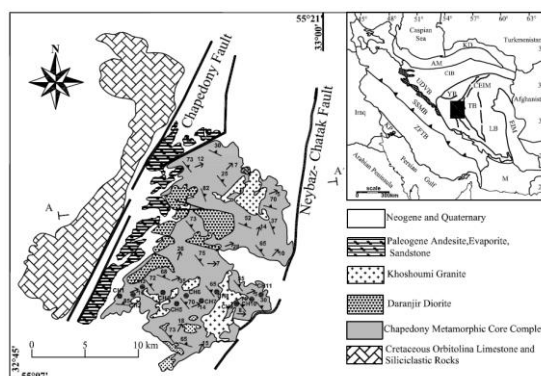
#### مقدمه:

همتافت‌های هسته دگرگون از جمله ساختارهای معمول در مناطقی هستند که از سنگ‌کره قاره‌ای گسترش یافته تشکیل شده‌اند. در این ساختارها یک یا چند زون برشی نرمال کم‌زاویه (یا زون جداشدگی) وجود دارد که فرادیواره گسل‌خورده متشکل از سنگ‌های سطحی را از فرودیواره تشکیل شده از پوسته پایینی یا میانی جدا می‌سازد و ثبت‌کننده تغییر تدریجی رفتار شکل‌پذیر به شکند است (Tirel et al., 2009). اخیراً مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی درجه بالا در ناحیه چاپدون، ایران مرکزی، به عنوان همتافت هسته دگرگون معرفی شده‌اند (Kargaranbafghi et al., 2006; Verdel et al., 2007). همتافت هسته دگرگون چاپدون با روند NNE به طول تقریبی ۱۰۰ کیلومتر از سنگ‌های دگرگونی به سن ائوسن تشکیل شده است (Kargaranbafghi et al., 2009). مرزهای شرقی و غربی همتافت هسته دگرگون توسط گسل‌های نرمال شکند -



شکل پذیر ائوسن مشخص می شوند. از دیدگاه زمین ساختی، روند عمومی شمالی- جنوبی منطقه به عملکرد دو گسل بزرگ امتدادلغز پشت بادام و چاپدونی وابسته است. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ آورده شده است. براساس مطالعات رمضانی و تاکر (۲۰۰۳)، کارگران بافتی و همکاران (۲۰۰۶ و ۲۰۰۷) و وردل و همکاران (۲۰۰۷) باور کلی بر این است که همتافت هسته دگرگون چاپدونی از تیپ کوردیلر به سن ائوسن می باشد.

یکی از مهم ترین اهداف زمین شناسان ساختمانی تلفیق مشاهدات دقیق صحرایی و تحلیل های جنبش ساختمانی برای پی بردن به الگوی دگرشکلی در مقیاس زمین ساخت صفحه ای است (Ramsay and Lisle, 2000). هدف از انجام این پژوهش، تعیین ماهیت دگرشکلی بر اساس ویژگی های بافتاری محور C کوارتز در همتافت هسته دگرگون چاپدونی می باشد.



شکل ۱ نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه



### بحث و روش تحقیق:

برای بررسی میزان کرنش و تاوایی ابتدا باید نمونه های جهت دار تهیه شود. برای مطالعه جهت گیری ترجیحی شبکه کانی ها، نمونه های سنگی را در جهت عمود بر برگوارگی و به موازات خطوارگی برش داده و از آن ها مقاطع نازک تهیه می شود. در این پژوهش نمونه های دستی جهت دار در مقطع XZ در آزمایشگاه برش داده شدند. مقطع XZ صفحه ای موازی با خطوارگی کششی و عمود بر برگوارگی است (Passchier, 1988). سپس برای ادامه مطالعه از این مقاطع عکس دیجیتال تهیه شد. با استفاده از نرم افزار J image محورهاى بلند، محورهاى کوتاه و زاویه محور بلند نسبت به خط مرجع (زاویه  $\Phi$ ) اندازه گیری گردید. آنالیز کرنش به روش  $Rf/\Phi$  برای اولین بار توسط رمزی (۱۹۶۷) مطرح شد و پس از آن توسط دونت (۱۹۶۹) و لایل (۱۹۸۵) اصلاح شد. در این تحقیق از نرم افزار ارائه شده توسط چاو (۲۰۰۳) استفاده شد. این نرم افزار می تواند آزمون تقارن (Isym) و آزمون تنا ( $\chi^2$ ) را با دقت کامل انجام دهد.

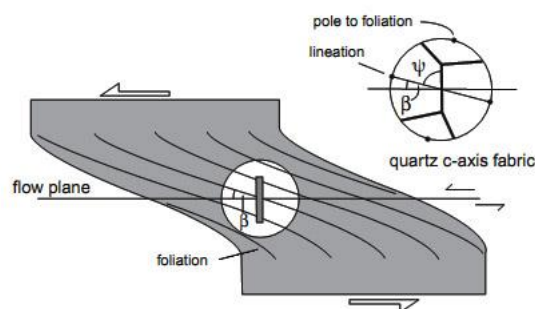
اندازه گیری میزان کرنش با استفاده از روش  $Rf/\Phi$  برای نشانگرهایی کاربرد دارد که از ابتدا به صورت بیضوی بوده اند. در جدول ۱ اطلاعات حاصل از روش  $Rf/\Phi$  که از نرم افزار (Chew 2003) بدست آمده، ارائه گردیده است. در جدول ۱ علاوه بر مقادیر Rs اطلاعات  $\chi^2$  و Isym نیز نشان داده شده است که نشانگر عدم فابریک اولیه و قرارگیری تصادفی اولیه نشانگرها است. تغییرات مقادیر کرنش نشان می دهد که از مرکز همتافت هسته دگرگون به سمت سطح جدایش میزان کرنش افزایش می یابد. این موضوع با افزایش شدت فابریک میلونیتی به سمت سطح جدایشی در منطقه مورد مطالعه همخوانی دارد.

جدول ۱ اطلاعات حاصل از روش  $R_f/\Phi$ 

Strain data(Rs) using the $R_f/\Phi$ method			
sample	ISYM	minimum $\chi^2$	Rs value
CH1	0.9459459	20.5225	1.71
CH2	0.9782609	3.6522	1.60
CH3	0.9603175	14.6349	1.56
CH4	0.973262	6.6898	1.55
CH5	0.9627119	14.4915	1.54
CH6	0.9554795	25.2603	1.46
CH7	0.985782	19.2370	1.46
CH8	0.9369628	12.7765	1.39
CH9	0.9714286	8.4000	1.35
CH10	0.9771429	11.1429	1.32
CH11	0.982808	19.6533	1.30

تعیین مقدار تاوایی با استفاده از فابریک‌های کریستالوگرافی نیز انجام می‌شود. این روش براساس اندازه‌گیری فابریک‌های محور C کوارتز و نسبت کرنش در صفحه کرنش محدود می‌باشد. این روش توسط والیس (۱۹۹۵) ارائه شده است. اگرچه از این روش بطور عمومی در مورد فابریک‌های کوارتز با ساختار حلقه‌های متقاطع نوع یک (Type I cross- griddle) استفاده می‌شود اما شبیه‌سازی عددی صورت گرفته توسط لیستر و هابس (۱۹۸۰) نشان می‌دهد که این روش در مورد فابریک‌های کوارتز با ساختار حلقه‌های متقاطع نوع دو (Type II cross- griddle) نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در شکل ۲ پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه میزان تاوایی بر اساس فابریک محور C کوارتز نشان داده شده است. زاویه  $\beta$  عبارت است از زاویه حاده بین برگوارگی و خط عمود بر بخش میانی فابریک و  $\psi$  زاویه حاده بین برگوارگی و بخش مرکزی فابریک (متمم زاویه  $\beta$ ) می‌باشد. در این معادله  $\beta$  زاویه حاده بین برگوارگی و خط عمود بر بخش میانی فابریک C کوارتز،  $R_{XZ}$  میزان کرنش در صفحه XZ و  $W_m$  میزان تاوایی میانگین می‌باشد.

برای اندازه‌گیری جهت ترجیحی شبکه LPO در کوارتز از روش نوری برای بدست آوردن جهت‌گیری محور C و  $a$  می‌توان استفاده کرد. برای انجام مطالعات LPO بر روی کوارتز باید از مقاطع نازک جهت‌دار در صفحه XZ بیضوی کرنش استفاده کرد (Passchier, 1988). از مزیت‌های انتخاب این مقطع این است که می‌توان نسبت بیضوی کرنش و همچنین مقدار تاوایی را نیز محاسبه کرد. به دلیل عدم وجود رخ و ماکل قابل تشخیص در کوارتز و همچنین یک محوری بودن آن، بهترین جهت نوری قابل اندازه‌گیری در این کانی محور C می‌باشد.

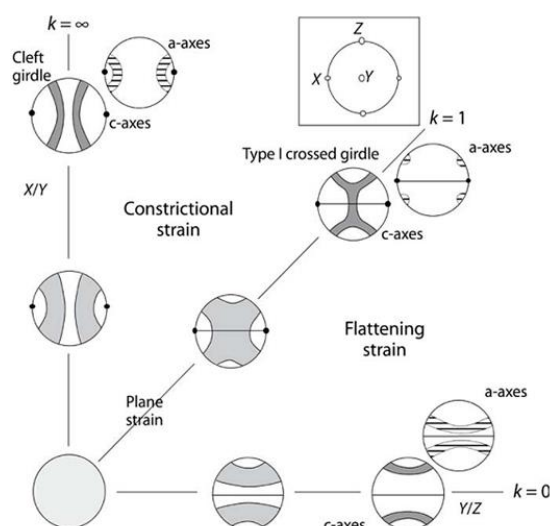


$$W_m = \sin \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{\sin(2\beta)}{[(R_{XZ} + 1)/(R_{XZ} - 1)] - \cos(2\beta)} \right] \right\} \times \frac{(R_{XZ} + 1)}{(R_{XZ} - 1)}$$

$W_m$  = mean kinematic vorticity number      $R_{XZ}$  = strain ratio in XZ section

شکل ۲ تعیین مقدار  $W_m$  با استفاده از جهت یابی فابریک محور C کوارتز (Law et al., 2004).

الگوی LPO را می‌توان در حالت سه‌بعدی و در نمودارهای تابع توزیع جهت‌گیری (ODF or Orientation distribution function) نشان داد. اما به دلیل راحتی کار با U-Stage از شبکه‌های استریوگرام برای نشان دادن جهت کریستال‌ها استفاده می‌شود (Passchier and Trouw, 2005). الگوهای LPO در کوارتز براساس دگرشکلی‌های هم‌محور (Coaxial) و غیرهم‌محور (Non-Coaxial) به دو گروه تقسیم می‌شوند. در شکل ۳ انواع متداول فابریک‌های  $a$  و  $c$  کوارتز نشان داده شده است. برای بررسی این الگوها با تغییرات کرنش، آن‌ها را در نمودار فلین نشان می‌دهند. در این تصویر شکل محور  $C$  به صورت اسکلت بافتار و محورهای  $a$  به صورت شماتیک با خطوط منحنی نمایش داده شده‌اند. تقارن این فابریک‌ها در این تصویر نشانگر دگرشکلی هم‌محور است.



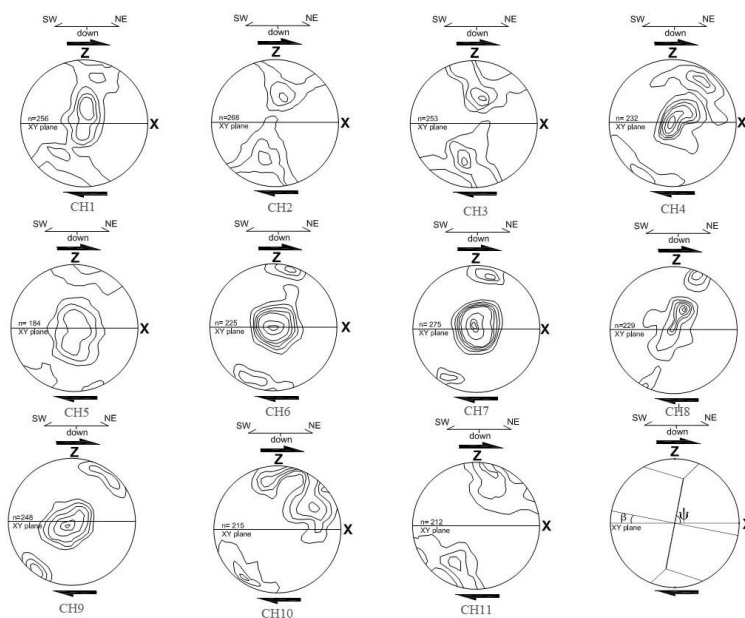
شکل ۳ ارتباط بین کرنش متقارن و فابریک‌های محور  $a$  و  $c$  کوارتز برای دگرشکلی‌های هم‌محور (Thigpen, et al., 2010). الگوهای LPO در حالت هم‌محور تحت شرایط دگرگونی درجه پایین تا متوسط نوارهای دایره‌ای کوچک (small circle girdle) بسیار عمومیت دارند (Passchier and Trouw, 2005). افزایش دما باعث افزایش زاویه بازشدگی (Opening angle) در نوارهای کوچک می‌شود. با استفاده از الگوهای LPO به دست آمده برای کوارتز می‌توان شرایط دمایی دگرشکلی را مشخص کرد.



برای این منظور از زاویه بازشدگی الگوهای LPO کوارتز استفاده می‌شود. میزان بازشدگی زاویه اسکلت بافتار به دمای دگرگونی بستگی دارد (Lister and Hobbs, 1980; Law et al., 2004). بنابراین با استفاده از این ارتباط می‌توان میزان حرارت در طی تشکیل سنگ‌های میلونیتی در زون‌های برشی را به دست آورد.

الگوی محور C کوارتز نیز می‌تواند نشانگر دمای دگرشکلی در میلونیت‌ها باشد (Passchier and Trouw, 2005). وجود بیشینه بافتار محور C کوارتز در پیرامون (محیط) تصویر استریوگرام نشان‌دهنده فعالیت سیستم لغزش قاعده‌ای (basal) در دمای دگرشکلی کمتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Passchier and Trouw, 2005). وجود بیشینه بافتار حدفاصل محیط و مرکز تصویر استریوگرام مربوط به فعالیت سیستم لغزشی لوزی (rhomb) در دمای ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است، درحالی‌که وجود بیشینه بافتار حول مرکز (محور Y) مربوط به غلبه سیستم لغزش منشور (prism) در دمای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (شکل ۴) (Stipp et al., 2002; Mancktelow and Pennacchioni, 2004; Passchier and Trouw, 2005; Guang Zhu et al., 2009).

تحلیل مقاطع نازک جهت‌دار (صفحه XZ) براساس اندازه‌گیری جهت‌گیری حدود ۲۰۰ دانه کوارتز با بلورش یافته با استفاده از دستگاه U-Stage انجام شد. الگوهای بدست آمده از محور C کوارتز یک عدم تقارن نسبت به محور Z از خود نشان می‌دهند که مؤید وجود برش راستگرد (top- to- the NE) برای زون جدایشی می‌باشد. اکثر الگوهای محور C کوارتز تقارن مونوکلینیک از خود نشان می‌دهند که عملکرد برش ساده می‌باشد. با توجه به بیشینه بافتار محور C کوارتز حول مرکز (محور Y) استریوگرام عملکرد سیستم لغزش منشور طی دگرشکلی کوارتز در هم‌تافت هسته دگرگون‌چاپ‌دونی تائید می‌گردد.

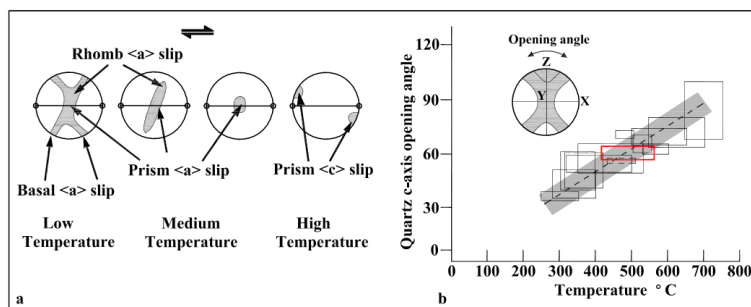


شکل ۴ الگوهای حاصل از اندازه‌گیری محور C کوارتز.

نمونه‌های CH1 تا CH6 نشان‌دهنده الگوی محور C کوارتز از نوع (Type I cross gridle) کمربند متقاطع نوع اول، این بافتار نشان‌دهنده درجه حرارت  $420 \pm 50$  تا  $560 \pm 50$  دگرشکلی است. نمونه‌های CH7 تا CH9 بیشینه بافتار در مرکز استریوگرام واقع شده و نشان‌دهنده درجه حرارت بالای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است. نمونه‌های CH10 و CH11 از نوع small circle gridle بوده



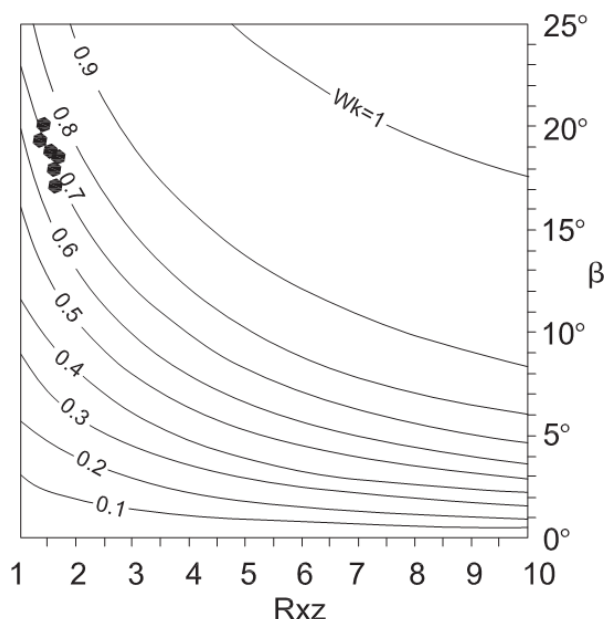
و بیشینه بافتار محور C کوارتز حدفاصل محیط تا مرکز واقع شده است و نشان‌دهنده درجه حرارت ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است.



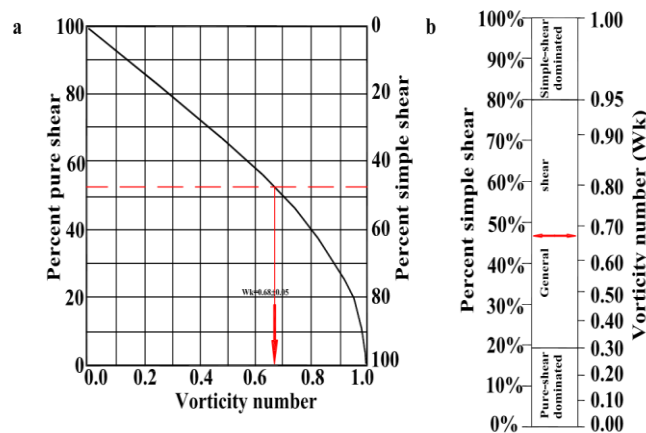
شکل ۵ دمای دگرشکلی هم‌تافت هسته دگرگون چاپ‌دونی با استفاده از زاویه Opening angle

### نتایج تاوایی حاصل از الگوی محور C کوارتز:

براساس بررسی‌های انجام گرفته بر روی الگوی محور C کوارتز مقادیر  $\beta$  استخراج گردید و با تلفیق داده‌های استرین در صفحه XZ (RxZ) مقادیر تاوایی براساس شکل ۶ بدست آمد. با توجه به اینکه فقط ۶ نمونه دارای الگوی Type I بودند و از آن‌ها مقدار  $\beta$  قابل محاسبه بود، در نتیجه در این نمودار ۶ داده قابل مشاهده است. محدوده تغییرات تاوایی در این نمودار بین ۰/۶۷ تا ۰/۷۱ می‌باشد.



شکل ۶ حاصل از اندازه‌گیری محور C کوارتز و کرنش در صفحه XZ ( $Wk$  بین ۰/۶۷ تا ۰/۷۱، با میانگین  $0.68 \pm 0.05$  است). با توجه به نتایج بدست آمده از مقادیر تاوایی و براساس نمودارهای ارائه شده توسط زیپولیاس (۲۰۱۰) و فورت و بیلی (۲۰۰۷)، درصد برش ساده و برش محض محاسبه گردید. با توجه به مقادیر بدست آمده میزان برش ساده و برش محض به ترتیب ۴۷٪ و ۵۳٪ در منطقه مورد مطالعه بدست آمد (شکل ۷a). همچنین براساس شکل ۷b رژیم دگرشکلی در منطقه مورد مطالعه برش کلی (general shear) تعیین گردید.



شکل ۷ درصد برش محض و برش ساده اندازه گیری شده در منطقه مطالعاتی.



### نتیجه گیری:

براساس مطالعات ریز ساختمانی انجام شده در همتافت هسته دگرگون چاپدوننی نتایج زیر حاصل شد:

الگوهای بدست آمده از محور C کوارتز یک عدم تقارن نسبت به محور Z از خود نشان می دهند که مؤید وجود برش راستگرد (top- to- the NE) در زون جدایشی می باشد. اکثر الگوهای محور C کوارتز تقارن مونوکلینیک از خود نشان می دهند که مؤید وجود برش ساده می باشد. با توجه به بیشینه بافتار محور C کوارتز حول مرکز یا محور Y استریوگرام عملکرد سیستم لغزش منشور طی دگرشکلی کوارتز در همتافت هسته دگرگون چاپدوننی تأیید می گردد. نمونه های CH1 تا CH6 نشان دهنده الگوی محور C کوارتز از نوع (Type I cross gridle) کمر بند متقاطع نوع اول، این بافتار نشان دهنده درجه حرارت  $420 \pm 50$  تا  $560 \pm 50$  دگرشکلی است. نمونه های CH7 تا CH9 بیشینه بافتار در مرکز استریوگرام واقع شده و نشان دهنده درجه حرارت بالای  $500$  درجه سانتی گراد است. نمونه های CH10 و CH11 از نوع small circle gridle بوده و بیشینه بافتار محور C کوارتز حدفاصل محیط تا مرکز واقع شده است و نشان دهنده درجه حرارت  $400$  تا  $500$  درجه سانتی گراد است.

تغییرات مقادیر کرنش نشان می دهد که از مرکز همتافت هسته دگرگون به سمت سطح جدایش میزان کرنش افزایش می یابد. این موضوع با افزایش شدت فابریک میلونیتی به سمت سطح جدایشی در منطقه مورد مطالعه همخوانی دارد. از غرب به شرق منطقه مورد مطالعه رژیم دگرشکلی از Plane strain تبدیل به General Flattening می شود.



### References:

- Chew, D.M., 2003. An Excel spreadsheet for finite strain analysis using the  $R_f/\Phi$  technique. Computers & Geosciences 29, P 795–799.
- Dunnet, D., 1969. A technique of finite strain analysis using elliptical particles. Tectonophysics 7, 117–136.
- Forte, A.M. & Bailey, C. M. 2007. Testing the utility of the porphyroclast hyperbolic distribution method of kinematic vorticity analysis. Journal of Structural Geology, 29, 983–1001.



**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.

**Kargaranfahghi, F., Neubauer, F., Genser, J., Houshmandzadeh, A.,** 2007.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  constraints on the tectonothermal evolution of the Chapedony metamorphic core complex, Central Iran. Geophys. Res. Abstracts 9 EGU07-A-07387.

**Kargaranfahghi, F., Neubauer, F.J.G., Houshmandzadeh, A.,** 2006. The Eocene Chapedony Metamorphic Core Complex in Central Iran: Preliminary Structural Results. European Geosciences Union, Vienna, Austria. pp. EGU06-J-05008.

**Kargaranfahghi, F., Neubauer, F., Genser, J.,** 2009. The Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of western Central Iran seen through detrital white mica. Geophys. Res. Abstracts 11 EGU2009-0.

**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, Vol. 161, 2004, pp. 305–320.

**Lisle, R.J.,** 1985. Geological strain analysis: a manual for the  $R_F/\Phi$  method. 99p.

**Lister, G.S., Hobbs, B.E.,** 1980. The simulation of fabric development during plastic deformation and its application to quartzite: fabric transition. Journal of Structural Geology 1, 99–115.

**Mancktelow, N.S., Pennacchioni, G.,** 2004. The influence of grain boundary fluids on the microstructure of quartz-feldspar mylonites: Journal of Structural Geology, v. 26, p. 47–69.

**Passchier, C.W., Urai, J.L.,** 1988. Vorticity and strain analysis using Mohr diagrams. Journal of Structural Geology 10, 755–763.

**Passchier, C.W., Trouw, R.A.J.,** 2005. Microtectonics: New York, Springer, 366 p.

**Ramezani, J And Tucker, R. D.** 2003 American Journal of Science, Vol. 303, September, P. 622–665.

**Ramsay, J.G.,** 1967. Folding and Fracturing of Rocks. McGraw-Hill, New York.

**Ramsay, J.G., Huber, M.,** 1983. The Techniques of Modern Structural Geology. Volume 1: strain analysis. Academic Press, London.

**Ramsay, J.G., Lisle, R.J.,** 2000. Applications of Continuum Mechanics in Structural Geology. In: The Techniques of Modern Structural Geology.

**Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R., Schmid, S.M.,** 2002. 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, v. 24, p. 1861–1884.

**Thigpen, J. Ryan., Lawa, R.D., Lloyd, G.E.; Brown, S.J.,** 2010. Deformation temperatures, vorticity of flow, and strain in the Moine thrust zone and Moine nappe: Reassessing the tectonic evolution of the Scandian foreland-hinterland transition zone. Journal of Structural Geology 32. 920-940.

**Tirel, C., Gautier, P., van Hinsbergen, D.J., Wortel, M.J.R.,** 2009. Sequential development of interfering metamorphic core complexes: numerical experiments and comparison with the Cyclades, Greece. The Geological Society, London, Special Publications, 311, 257–292.

**Verdel, C., Wernicke, B.P., Ramezani, J., Hassanzadeh, J., Renne, P.R., Spell, T.L.,** 2007. Geology and thermochronology of Tertiary Cordilleran-style metamorphic core complexes in the Saghand region of central Iran. Bulletin Geological Society of America 119, 961–977.

**Wallis, S.R.,** 1995. Vorticity analysis and recognition of ductile extension in the Sanbagawa Belt, SW Japan. Journal of Structural Geology 17, 1077–1093.

**Xypolias, P.,** 2010. Vorticity analysis in shear zones: A review of methods and applications. Journal of Structural Geology 32, 2072-2