



فصلنامه زمین ساخت

بهار 1397، سال دوم، شماره 5

مطالعه دگرشکلی غیریکنواخت در پهنه‌های برشی کمربند دگرگونی سنندج - سیرجان، نیریز

سعیده کشاورز^{1*}، علی فقیه²، مجید شاه پسندزاده³، سعید زارعی⁴

1. استادیار دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، ایران.

2. دانشیار بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز، ایران

3. دانشیار دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، ایران

4. دکتری زمین‌شناسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

تاریخ دریافت: 1396/09/10

تاریخ پذیرش: 1397/02/31

چکیده:

مطالعات ساختاری و جنبش‌شناختی بر روی سنگ‌های دگرشکل شده کمربند دگرگونی سنندج - سیرجان به عنوان بخشی از کوهزاد زاگرس نشان می‌دهد که دگرشکلی در شرایط رخساره شیست سبز - آمفیولیت صورت گرفته است. جهت برش غالب top-to-the-SE بوسیله ساختارهایی مانند بودین‌های نامتقارن، میکاهای ماهی‌گون، پورفیروکلاست‌های غلافی، چین‌های کشیده، رخ‌کنگره‌ای نامتقارن و بافتارهای محور C کوارتز تأیید می‌گردد. واکاوی عدد تاوایی جنبشی متوسط با استفاده از روش‌های مبتنی بر بافتار کوارتز و پورفیروکلاست‌های چرخیده نشان‌دهنده وجود 44 درصد برش ساده و 56 درصد برش محض در طی دگرشکلی شکل‌پذیر برش عمومی می‌باشد که در ارتباط با رژیم جریان ترافشارشی مایل بوجود آمده است. مقادیر متغیر برش ساده نسبت به زمان دگرشکلی نشان‌دهنده آنست که در مراحل ابتدایی دگرشکلی مولفه برش محض نقش اساسی داشته و با پیشرفت دگرشکلی مولفه برش ساده افزایش یافته است.

واژه کلیدی: دگرشکلی، عدد جنبشی تاوایی، واتنش نهایی، کمربند دگرگونی سنندج - سیرجان، نیریز

پیش نوشتار

می کند. با در نظر گرفتن مسیر حرکت نقاط درون جسم در حال دگرشکلی نسبت به یک خط مرجع، یک میدان جابجایی برای خطوط جریان ایجاد می شود که محاسبه تاوایی را ممکن می سازد. با در نظر گرفتن زاویه بین مجانب حاصل از خطوط مادی و خط مرجع می توان مقدار W_k را برای حالت های مختلف دگرشکلی برشی بدست آورد (رابطه 1). برای بزرگی نرخ کشیدگی لحظه ای (s_a , s_b و s_c) در راستای محورهای اصلی و تنش به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$W_k = w_i \left[2 \left(s_a^2 + s_b^2 + s_c^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه 1}$$

که مقدار آن برابر یا بزرگ تر از صفر است. در حالت $W_k=0$ دگرشکلی از نوع هم محور است. بنابراین درجه غیر هم محوری با افزایش مقدار W_k افزایش می یابد

(Passchier, 1988a,b; Weijermars, 1991; Tikoff and Fossen, 1993; Robin and Cruden, 1994).

پهنه های برشی به عنوان جایگاهی برای تمرکز دگرشکلی دارای پهنایی از چند سانتیمتر تا چند کیلومتر می باشند. مطالعات نیمه کمی فابریک های کریستالوگرافی در پهنه های برشی نشان می دهد که مسیرهای دگرشکلی در بسیاری از زون های برشی منحصر به برش ساده پیش رونده نیست بلکه شامل مولفه ای از برش محض نیز می باشد. این موضوع بیان کننده این مطلب است که برای تفسیر ساختارهای دگرشکل شده واژه دگرشکلی غیر هم محور مناسب تر از دگرشکلی هم محور است (Law et al., 1984, 1986; Platt and Behrmann, 1986). به این ترتیب برای تخمین رابطه بین مولفه چرخشی و کشیدگی دگرشکلی کمیت های عددی مانند عدد تاوایی جنبشی مطرح می شوند (Truesdell, 1953; Means et al., 1980).

عدد تاوایی جنبش شناختی پارامتری بدون بعد است که سرعت زاویه ای و نرخ کشیدگی خطوط مادی در یک جسم صلب را که در زمینه شکل پذیر قرار گرفته، به هم مرتبط

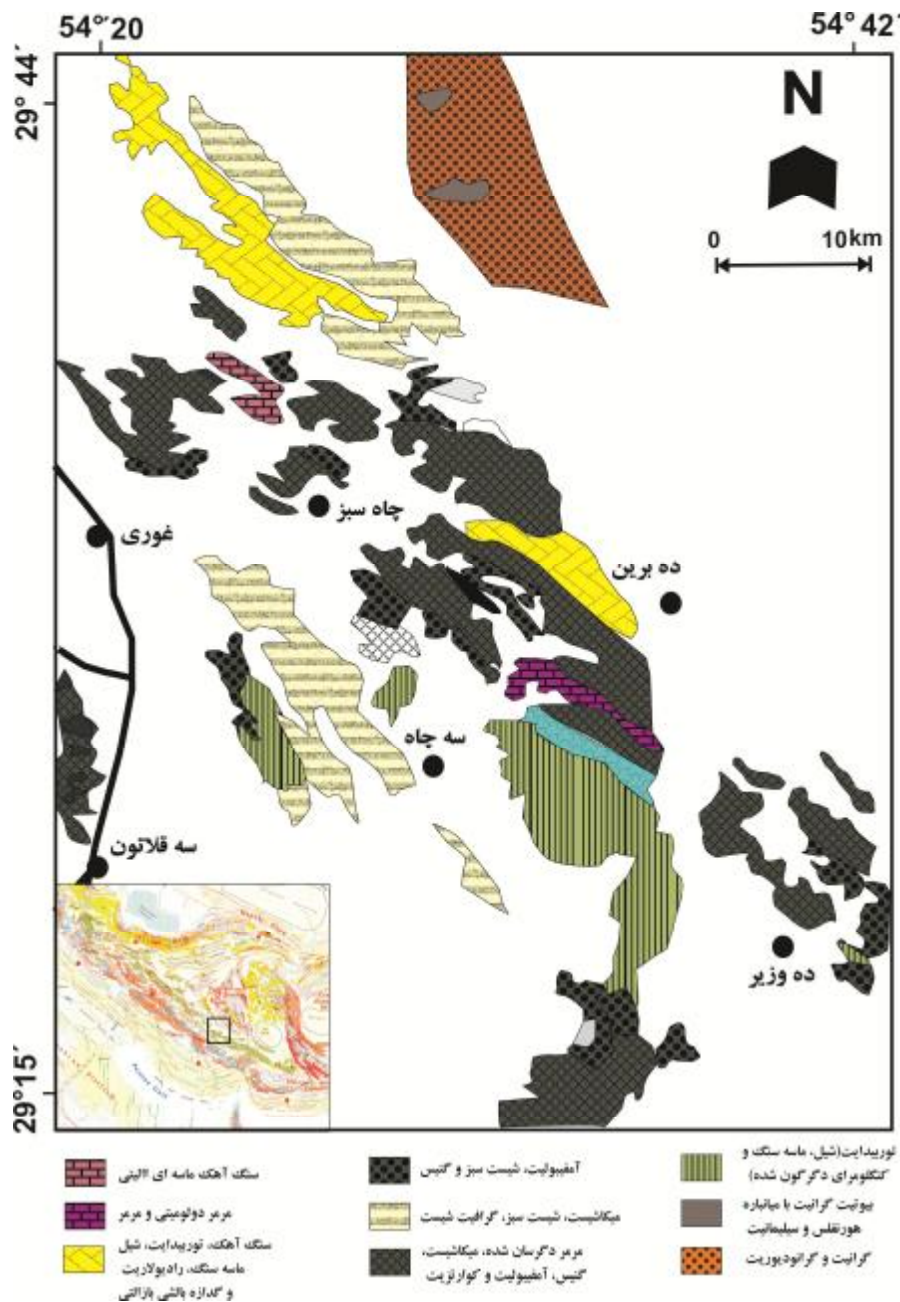
1- جایگاه زمین ساختی و زمین شناسی

منطقه مورد مطالعه در نزدیکی شهر نیریز و در فاصله 250 کیلومتری جنوب خاور شیراز قرار دارد. سنگ های دگرگونی دگرشکل شده این ناحیه به عنوان بخشی از سنگ های کمر بند دگرگونی سنندج - سیرجان محسوب می شوند. این کمر بند در راستای شمال باختر (سنندج) - جنوب خاور (سیرجان) با عرض 120-200 کیلومتر و طول 1500 کیلومتر به طور موازی با روند ناحیه ای ساختاری کوهزاد زاگرس کشیده شده است (Alavi, 1994). کمر بند دگرگونی سنندج - سیرجان شامل مجموعه ای از گسل های راندگی انتقال دهنده بلوک های سنگی متعددی از واحدهای چینه ای دگرگون شده فانروزوئیک می باشد. شواهد چینه نگاری و وجود کنگلومرای همزمان با کوهزایی نشان دهنده شروع راندگی در کرتاسه پایانی می باشد. سنگ های

کوهزاد زاگرس بخشی از کمر بند کوهزایی خطی و برخوردی آلپ - هیمالیا است. دگرشکلی های ناحیه ای حاصل از برخورد صفحات آفرو عربی و خردقاره ایران در زمان کرتاسه پایانی تا تریاری باعث شکل گیری ساختارهای قابل توجهی مانند برگواره ها، خطواره ها، چین های هم شیب، گسل های راندگی و گسل های راستالغز بزرگ مقیاسی شده است که با کوتاه شدگی پوسته در کوهزاد زاگرس مرتبط هستند (Stöcklin, 1968, Berberian and King, 1981). امروزه نیز کوتاه شدگی پس از برخورد با سرعت mm/yr 20 ± 2 در امتداد $N8^\circ \pm 5^\circ E$ در حال انجام است (Vernant et al., 2004).

دوره آبتین پسین و مرتبط با راندگی و تشکیل سنگ‌های دگرگونی فشار بالا در اوج دگرگونی قبل از تشکیل افیولیت نیریز بوده است. سن تعیین شده با داده‌های موجود از افیولیت عمان مطابق است. افیولیت‌های نیریز و عمان در ابتدا بخش‌هایی از لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس بوده‌اند و در کرتاسه پسین بر اثر برخورد خردقاره ایران با صفحه قاره‌ای آفروربی ایجاد شده‌اند (Sarkarinejad et al., 2008).

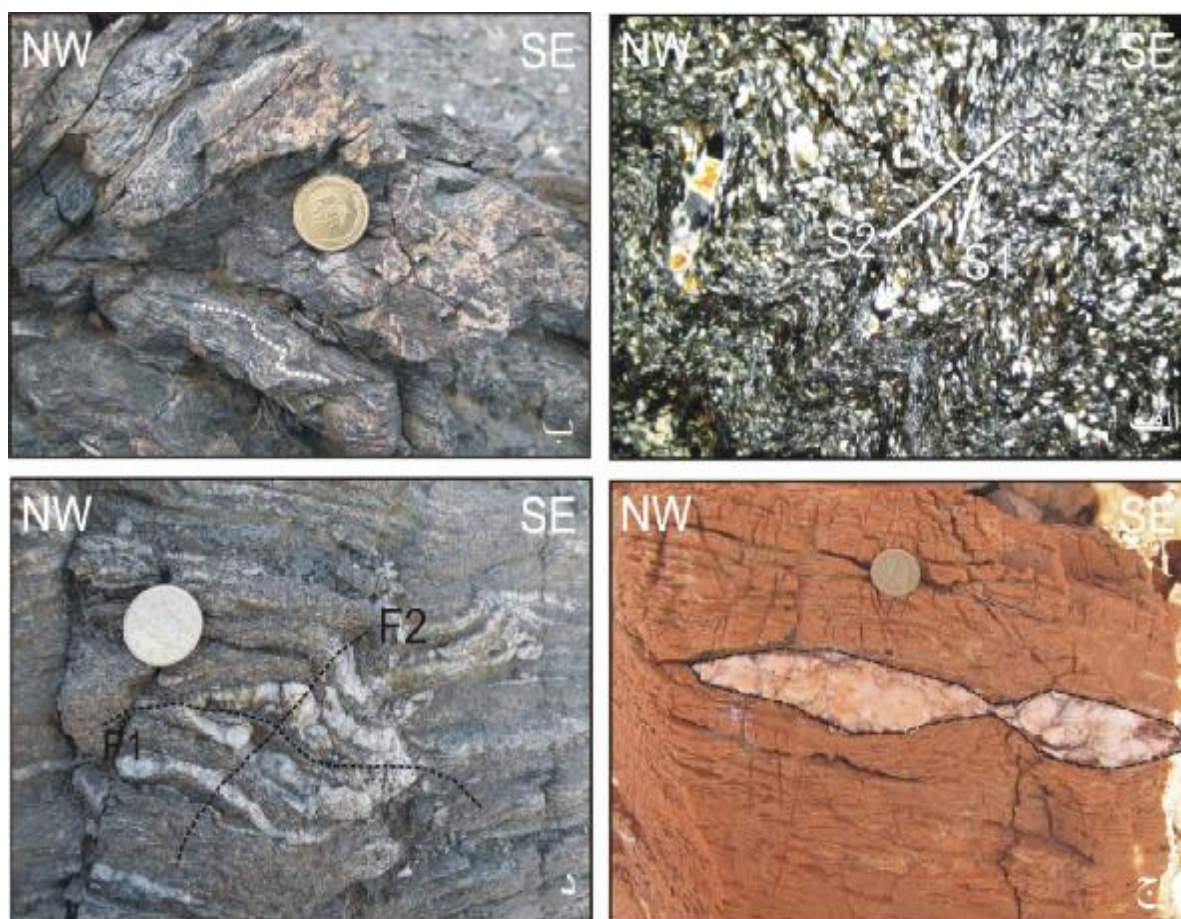
منطقه مورد مطالعه شامل سنگ‌های بازی و فوق بازی با درجات مختلف دگرگونی از شیبست سبز، آمفیولیت، گنیس، شیبست آبی و اکلوژیت می‌باشد (شکل 1). جدیدترین نتایج سن سنجی Ar^{40}/Ar^{39} بر روی نمونه‌های بیوتیت و مسکویت و آمفیولیت از رخنمون گنیس‌های بیوتیتی و آمفیولیت‌ها انجام شده است. سن اول بیوتیت‌ها سنی معادل 0/88 \pm 119/95 و 112/58 \pm 0/66 را نشان می‌دهند که مربوط به



شکل 1- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

تداخلی موجی و قارچی شکل از چین خوردگی مجدد F1 در مقیاس های متفاوت دیده می شوند (شکل 2-ج). بودین هایی که بطور مایل نسبت به برگوارهای S1 با تقارن مونوکلینیک هستند و در بخش های داخلی بودین عمود برخطواره کشیدگی L2 قرار دارند (شکل 2-د)، از دیگر عناصر ساختاری مرتبط با مرحله دوم دگرشکلی می باشند که در شرایط دگرگونی رخساره شیست سبز - آمفیولیت گسترش یافته است. دگرشکلی های مرحله سوم در خش لغزهای راندگی و در پهنه های برشی محلی با گسترش فراگیر نوارهای شکنجی و ساختارهای S/C قابل مشاهده است (Faghih, 2008).

کمر بند دگرگونی سندج - سیرجان چند مرحله دگرشکلی مرتبط با برخورد قاره - قاره را تجربه کرده است که شواهد آن در جهت یافتگی عناصر ساختاری حفظ شده است و براین اساس سه مرحله دگرشکلی در منطقه مورد مطالعه قابل تشخیص می باشد. در شرایط اوج دگرگونی و در مرحله اول دگرشکلی، برگواره ها (S1) و خطواره های (L1) نسل اول، چین های هم شیب (F1) شکل گرفته اند. رخ های کنگره ای حاصل دگرشکلی در مرحله دوم می باشد که در آن برگواره S2 با زاویه تقریباً 30 درجه نسبت به برگواره S1 و به صورت نامتقارن گسترش یافته است (شکل 2-الف و ب). الگوهای

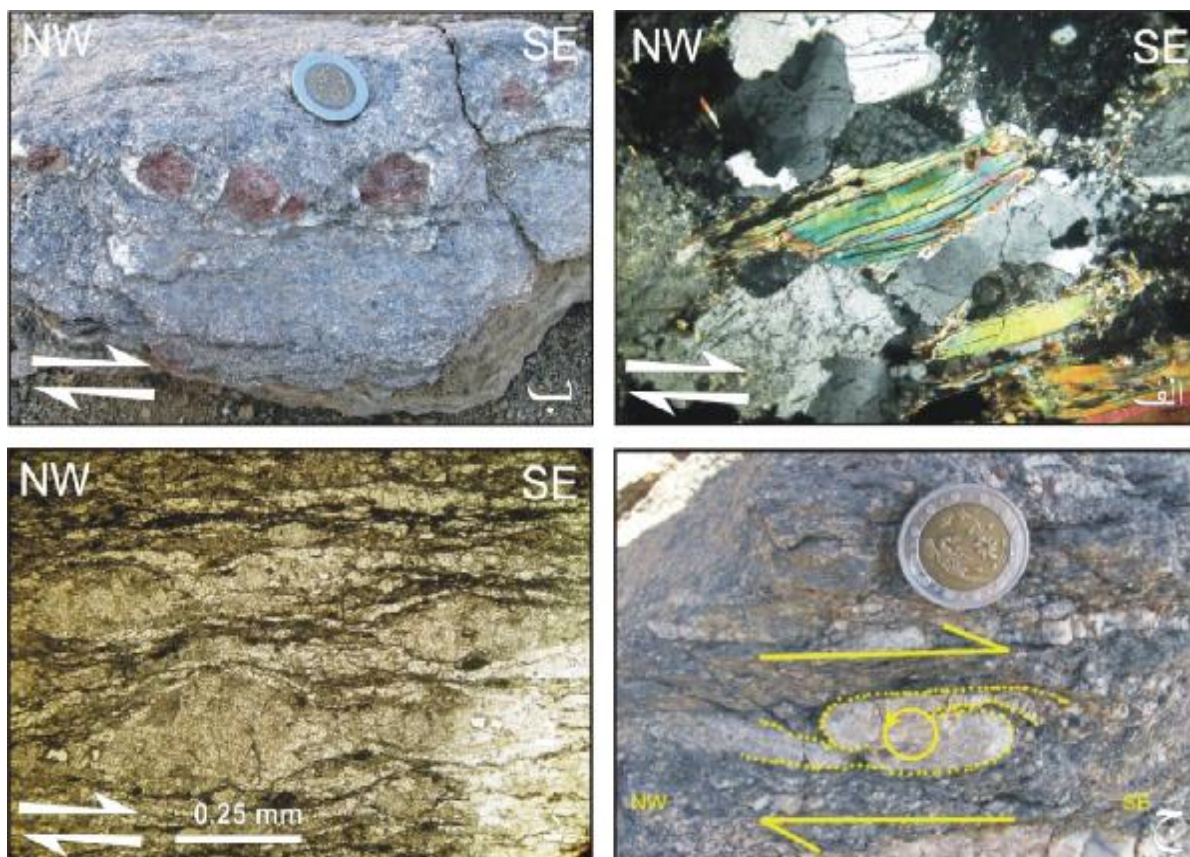


شکل 2- عناصر ساختاری مشاهده شده در منطقه مورد مطالعه: الف و ب رخ کنگره ای در دو مقیاس میکروسکوپی و ماکروسکوپی، ج- بودین های نامتقارن از نوع باندبرشی، د- نوع دوم از الگوی چین خوردگی متداخل که از چین خوردگی مجدد نسل اول چین ها در مرحله دوم دگرشکلی بوجود آمده است.

2- شاخص‌های جهت برش

مقاطع نازک جهت‌دار و نمونه‌های دستی برای تعیین جهت برش در منطقه، مورد مطالعه قرار گرفته است که وجود شاخص‌های برش در مقیاس‌های میکروسکوپی و مزوسکوپی مانند: میکافیش، پورفیروکلاست‌های سیگما و دلتا شکل، و بافتار شکل مایل برگواره (Passchier, 2005) موید جهت برش top-to-the-SE در یک دگرشکلی

شکل‌پذیر می‌باشد (شکل 3). همچنین تحلیل پارامترهای بافتار اسکلتی نشان‌دهنده عدم تقارن الگوی محور C-کوارتز نسبت به محور Z استریونت است که جهت برش top-to-the-SE را نشان می‌دهد. تمام شاخص‌های برش وجود مولفه جریان غیرهم محور را طی دگرشکلی ناحیه‌ای تایید می‌کنند.



شکل 3. شاخص‌های جهت برش در منطقه مورد مطالعه: الف - میکافیش، ب - پورفیروکلاست‌های چرخیده گارنت و سایه‌های واتنشی، ج - پورفیروکلاست دلتا با دنباله‌های خلیجی و هسته مرکزی به صورت پس رونده چرخیده است. د - پورفیروکلاست‌های سیگما در فلدسپارهای پتاسیم دار

3- تجزیه و تحلیل تاوایی

برای محاسبه تاوایی در پهنه‌های برشی از عناصر ساختاری متفاوتی مانند پورفیروکلاست‌های چرخیده، چین‌های کشیده، بودین‌های نامتقارن، بافتار محور C-کوارتز، درزه‌های استیلولیتی و غیره می‌توان استفاده نمود (Xypolias, 2010).

همه روش‌های مذکور تاوایی را به صورت دو بعدی در صفحه‌ای موازی با صفحه XZ از بیضوی واتنش نهایی اندازه‌گیری می‌کنند.

3-1- پورفیروکلاست‌های چرخیده

پورفیروکلاست‌های چرخیده شاخص مناسبی برای سنجش عدد تاوایی با استفاده از روش توزیع هیپربولیکی پورفیروکلاست‌ها (PHD) و روش شبکه دانه‌های صلب (RGN) می‌باشند (Simpson and De Paor, 1993; Passchier, 1987; Jessup, 2007).

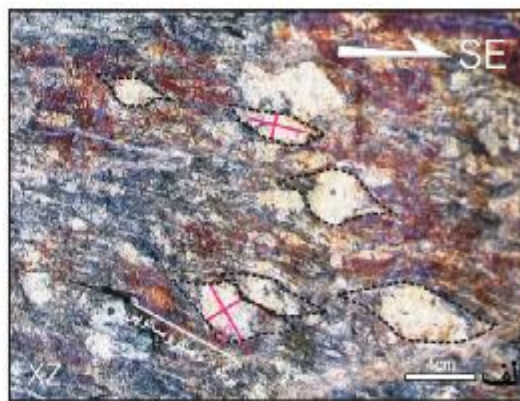
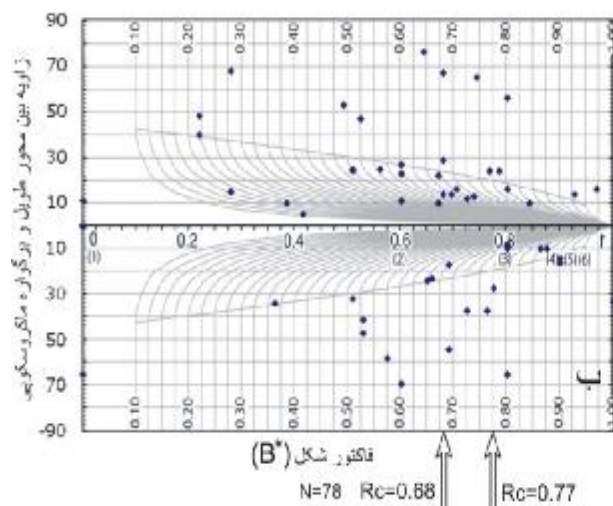
به این ترتیب نسبت شکل دانه صلب (محور کوتاه / محور طویل) و جهت یابی ϕ دانه‌ها (زاویه بین محور طویل دانه نسبت به صفحه جریان یا برگواره ماکروسکوپی) در یک سیستم مختصات قطبی با استفاده از یک شبکه هیپربولیکی نمایش داده می‌شوند (شکل 4). دانه‌هایی که بالاتر از نسبت شکل بالاتر بحرانی (Rc) قرار می‌گیرند موقعیت ثابت تری را نشان می‌دهند و دارای ϕ کوچک تری هستند، در حالی که دانه‌های با نسبت بحرانی کمتر چرخش نامحدود و بیشتری را داشته‌اند. با توجه به Rc مقدار تاوایی به صورت زیر (رابطه 2) تعریف می‌شود (Passchier, 1987):

$$W_m = (R_c^2 - 1) / (R_c^2 + 1) \quad \text{رابطه 2}$$

با تصویر کردن فاکتور شکل (B^*) بر حسب زاویه ϕ با استفاده از نمودار گرافیکی شبکه دانه صلب می‌توان W_m را محاسبه نمود. مشابه با نسبت شکل بحرانی (Rc) پارامتر B^* (رابطه 3) نیز جداکننده دانه‌هایی که به موقعیت ثابت رسیده‌اند از دانه‌هایی که به آزادی چرخش می‌کنند می‌باشد (Jessup et al., 2007).

$$B^* = (M_x^2 - M_y^2) / (M_x^2 + M_y^2) \quad \text{رابطه 3}$$

در این رابطه و به ترتیب نشان دهنده محور طویل و محور کوتاه کلاست می‌باشند. به این ترتیب W_m را می‌توان مستقیماً از B^* تعیین کرد. در این مطالعه برای محاسبه مقادیر تاوایی از شبکه دانه‌های صلب (RGN) (شکل 4) استفاده شده است (Jessup et al., 2007).



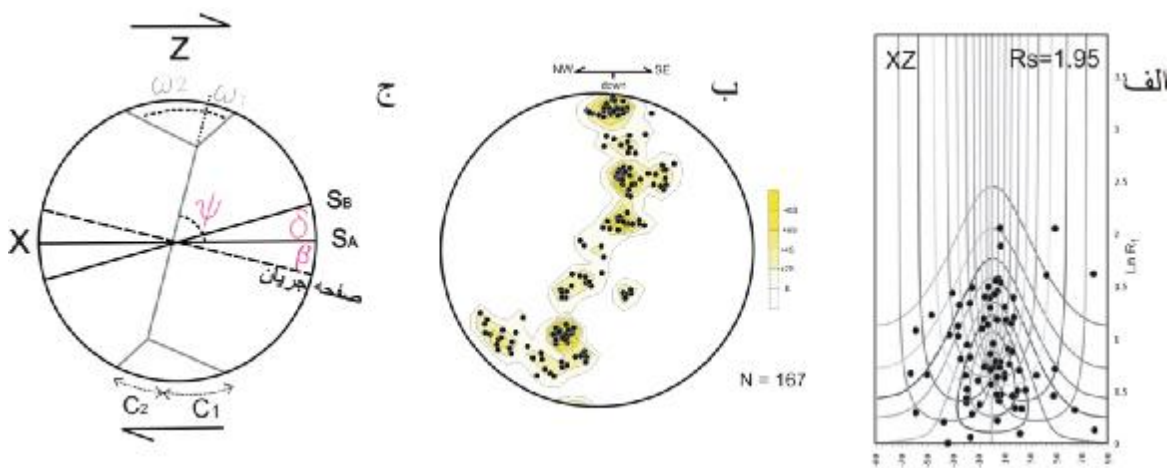
شکل 4. الف - نمونه‌ای از اندازه‌گیری محور دانه‌ها و زاویه ϕ برای پورفیروکلاست‌های دگرشکل شده، R نسبت محوری و ϕ زاویه بین محور طویل دانه و جهت برگواره می‌باشد. ب - روش RGN که در آن اندازه‌گیری‌ها مطابق با شکل الف انجام شده است. (n) تعداد دانه‌های اندازه‌گیری شده و B فاکتور شکل دانه می‌باشد (به متن رجوع شود).

3-2- بافتارهای محور C کوارتز (R_{XZ}/β)

$$W_m = \cos[\tan^{-1} \left(\frac{R_{XZ} \tan^2 \beta}{1 + R_{XZ} \tan \beta} \right)] \quad \text{رابطه 4}$$

مقدار واتنش نهایی در صفحه XZ از روش Rf/ϕ (Ramsay & Huber, 1983; Lisle, 1985) و با استفاده از نشانگرهای بیضوی مانند دانه‌های کوارتز دگرشکل شده در نمونه‌های غنی از کوارتز اندازه‌گیری شده است (شکل 5). تقریباً در هر نمونه هشتاد دانه کانی کوارتز مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است که این دانه‌های دگرشکل شده‌ی کشیده دارای نرخ کمی از بازبلورش دوباره می‌باشند. نمودارهای Rf/ϕ با نرم افزار Chew (2003) ترسیم شده‌اند.

بافتارهای محور نوری C کوارتز با استفاده از دستگاه یونیورسال استیج پنج محوری مورد بررسی قرار گرفته است. تمام اندازه‌گیری‌ها در صفحه‌ای عمود بر برگواره و موازی با خطواره‌ها (صفحه XZ از بیضوی واتنش) از نمونه‌های غنی از کوارتز صورت گرفته است. برای اندازه‌گیری W_m با استفاده از بافتار محور C کوارتز استخراج شده، از پارامترهای واتنش (R_{XZ}) و زاویه β استفاده شده است. زاویه β ، زاویه بین خط عمود بر بخش مرکزی اسکلتون و برگواره اصلی است و معادل با زاویه بین صفحه جریان و صفحه اصلی واتنش می‌باشد (شکل 5) و این زاویه تابعی از R_{XZ} است (رابطه 4).



شکل 5- الف - نمودار Rf/ϕ که مقدار واتنش نهایی را بر حسب نسبت محوری دانه‌ها و جهت گیری آنها با خط مرجع نشان می‌دهد. ب - شبکه استریوگراف هم مساحت از بافتار محور c کوارتز در یک مورد از نمونه‌های مورد مطالعه، خطوط کنتوری 1، 2، 3، ... تا 8 توزیع یکسان نقاط را نشان می‌دهند. ج - پارامترهای قابل استخراج از الگوی بافتار محور c کوارتز که در اندازه‌گیری کمی عدد ناوایی و تعیین جهت برش قابل استفاده است. عدم تقارن مشاهده شده در کراس‌گریدها تاییدی بر رخداد دگرشکلی غیر هم محور راستگرد است. تمام پارامترهای اندازه‌گیری شده در صفحه‌ای عمود بر برگواره و موازی با خطواره کششی انجام شده است.

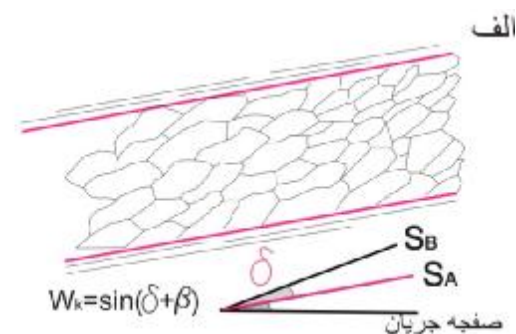
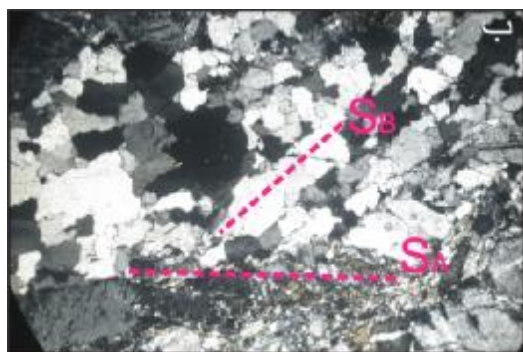
3-3- شکل مورب دانه/بافتار محور c- کوارتز (δ/β)

پیشرونده رشد می‌کنند (Law et al., 1984; 1990). بنابراین می‌توان بزرگ‌ترین زاویه بین برگواره مایل و مرز زون برشی را به صورت تنوری با زاویه δ نشان داد. در میلونیت‌های غنی از کوارتز، زاویه ثبت شده ماکزیمم، δ بین برگواره اصلی و مایل در ترکیب با زاویه β بین صفحه برش و برگواره‌های اصلی از

معمولاً تجمعاتی از بلورهای کوارتز با ویژگی بازبلورش دینامیکی درون محدوده‌های موازی با برگوارگی از درجات ضعیف تا متوسط در سنگ‌های میلونیتی با فابریک شکل مورب دانه‌ها ایجاد می‌شوند. چنین فابریک‌های موربی از شکل دانه در جهت ثابتی نسبت به چارچوب مرجع دگرشکلی

$$W_m = \sin \xi = \sin 2(\beta + \delta) \quad \text{رابطه 5}$$

این روش اغلب به عنوان روش δ/β شناخته می‌شود (شکل 6).



شکل 6- الف - تصویر شماتیک، ب - تصویر میکروسکوپی که رابطه بین برگواره اصلی (S_A) و برگواره میابل شکل دانه (S_B) را در صفحه جریان (XZ) نشان می‌دهد. ماکزیمم فراوانی زاویه δ اندازه‌گیری شده جهت محاسبات لحاظ می‌شود و زاویه b از الگوی بافتار محور C کوارتز قابل اندازه‌گیری است.

3-4- روش واتنش نهایی / بافتار مورب شکل دانه‌ها (R_{XZ}/δ)

بیضی واتنش دارد (رابطه 6) و با افزایش مقادیر واتنش نسبت

$$W_k = \sin(2\delta) \frac{R_{XZ} + 1}{R_{XZ} - 1} \quad \text{رابطه 6}$$

مستقیم دارد (Xypolias, 2009).

بر اساس مطالعات آزمایشگاهی در سنگ‌های چندبلوری

مقادیر زاویه δ ارتباط بسیار نزدیکی با مقدار تاوایی و شکل

4- مقایسه نتایج و روش‌ها

از نظر نظریه سنجنده‌های تاوایی می‌توانند برای اندازه‌گیری تاوایی دگرشکلی در پهنه‌های برشی که در رژیم‌های شکل‌پذیر شکل گرفته‌اند و تحت شرایط شکننده - شکل‌پذیر تا شرایط شکننده فعال باقی مانده‌اند بکار روند. روش‌های استفاده شده در این نوشتار در تعیین مقادیر W_k در منطقه مورد مطالعه می‌توانند هر کدام متوسط تغییرات زمانی دگرشکلی در بخش‌های مختلف از تاریخچه دگرشکلی را ثبت کنند. (Tikoff & Fossen 1995; Wallis 1995; Bailey et al. 2004; Law et al. 2004; Xypolias, 2009, 2010; Sarkarinejad et al., 2015).

مقادیر بدست آمده نشان می‌دهند که تاوایی 0/58 تا 0/87 (33 تا 60 درصد برش محض) و 0/85 تا 0/93 (26-35 درصد برش محض) به ترتیب با استفاده از روش بافتار محور C- کوارتز و روش بافتار میابل شکل دانه‌ها بدست آمده است. در روش‌های واتنش نهایی / بافتار میابل شکل دانه‌ها تاوایی برابر با 0/65 تا 0/81 (41-56 برش محض) و روش RGN تاوایی 0/50 تا 0/77 (43-67 برش محض) را نشان می‌دهد. علاوه بر برآورد تاوایی از روش‌های بالا، جهت مقایسه و داشتن دید جامع‌تر نتایج مطالعات پیشین نیز جمع‌آوری شده است (شکل 7). به طوری که مقادیر تاوایی با استفاده از پورفیروکلاست‌های بدون دنباله گارنت (0/59-0/77)، بافتارهای کوارتز و واتنش نهایی (0/6-0/9)، پورفیروکلاست‌های فلدسپار به روش توزیع‌های پربولیکی (PHD) (0/76-0/86) می‌باشد (Partabian, 2008;

برش محض) به ترتیب با استفاده از روش بافتار محور C- کوارتز و روش بافتار میابل شکل دانه‌ها بدست آمده است. در روش‌های واتنش نهایی / بافتار میابل شکل دانه‌ها تاوایی برابر با 0/65 تا 0/81 (41-56 برش محض) و روش RGN تاوایی 0/50 تا 0/77 (43-67 برش محض) را نشان می‌دهد. علاوه بر برآورد تاوایی از روش‌های بالا، جهت مقایسه و داشتن دید جامع‌تر نتایج مطالعات پیشین نیز جمع‌آوری شده است (شکل 7). به طوری که مقادیر تاوایی با استفاده از پورفیروکلاست‌های بدون دنباله گارنت (0/59-0/77)، بافتارهای کوارتز و واتنش نهایی (0/6-0/9)، پورفیروکلاست‌های فلدسپار به روش توزیع‌های پربولیکی (PHD) (0/76-0/86) می‌باشد (Partabian, 2008;

W_m ممکن است بر اثر متقابل کلاست و زمینه در زمان جریان یافتن بوجود آمده باشد (Johnson et al., 2009). از طرف دیگر مقادیر بدست آمده از روش R_{xz}/β نسبت به روش δ/β کمتر است. فرض بر این است که روش (δ/β) آخرین مرحله از تاریخ دگرشکلی را ثبت می‌کند و نسبت به سایر روش‌ها تاریخچه کوتاه‌تری از جریان دگرشکلی را در بر می‌گیرد (Wallis 1995; Xypolias 2009; Wu, 2017).

میلونیتی شدن) نشان می‌دهند، در حالی که روش‌هایی که بر اساس نشانگرهای حساس لحظه‌ای هستند مانند روش برگواره شکل دانه مایل تمایل دارند تا W_m را فقط قبل از ثابت شدن فابریک‌ها را نشان دهند. این تفاوت‌ها بیان می‌کند که در بسیاری از روش‌ها به طور مشابه فقط بخشی از تاریخ دگرشکلی ثبت شده است.

در این مطالعه مقادیر تاوایی بدست آمده از روش پورفیروکلاست‌های صلب و روش‌های مبتنی بر بافتارهای کوارتز برای بازسازی تغییرات زمانی تاوایی جریان سنگ استفاده شده است. در شکل 7 طول هر خط نشان دهنده میزان خطای احتمالی و عدم قطعیت در سنجش تاوایی است. با توجه به شکل روش‌های تاوایی در روند کلی با هم مطابقت دارند: اما روش دوم (R_{xz}/β) و سوم (δ/β) مقادیر بالاتری را نسبت به روش اول (پورفیروکلاست‌های صلب) نشان می‌دهد. روش R_{xz}/β و روش پورفیروکلاست‌ها بخش عظیمی از تاریخ دگرشکلی شکل‌پذیر را ثبت می‌کنند (Passchier, 1988b). سایر مطالعات پیشنهاد می‌کند (Xypolias, 2009; Law, 2010) که واکای پورفیروکلاست‌های نیمه صلب نتیجه‌ای نزدیک به مقدار واقعی تاوایی متوسط را می‌دهند. در حالی که برگواره مایل در کوارتز نسبت به پورفیروکلاست‌ها به چگونگی مراحل پایانی دگرشکلی حساس‌تر است بنابراین

sarkarinejad et al., 2009; 2012, Faghiih and Sarkarinejad, 2011; Sarkarinejad and Keshavarz, 2015). به این ترتیب، W_m بدست آمده از روش کلاست‌های صلب کمتر از مقادیر حاصل از روش R_{xz}/β است. پورفیروکلاست‌های صلب بخش عظیمی از تاریخ دگرشکلی را در خود حفظ می‌کنند و مقادیر تاوایی متوسطی را نسبت به سایر روش‌ها در یک جریان دگرشکلی شکل‌پذیر نشان می‌دهند. این تمایز در کاهش میزان

5- بحث: الگو و هندسه جریان

فرآیند دگرگونی در منطقه مورد مطالعه به عنوان بخشی از کمربند دگرگونی سنندج-سیرجان در رخساره‌های شیست سبز تا آمفیولیت همراه با برش راستگرد مشاهده می‌شود که با توجه به مجموعه کانی‌ها و ریز ساختارها قابل استنتاج می‌باشد. همانطور که قبلاً ذکر شد، در واکای تاوایی برای ساده‌تر شدن مسئله فرض می‌شود که دگرشکلی هموزن و یکنواخت است. اگر دگرشکلی در پهنه‌های برشی توسط جریان با حالت یکنواخت همراهی شود، مقادیر تاوایی بدست آمده بر روی یک منحنی خاص W_m قرار خواهند گرفت. به عنوان مثال اگر شرایط با حالت یکنواخت باشد، با کاربرد همه روش‌های مبتنی بر بافتار کوارتز $(\delta/\beta, R_{xz}/\delta, R_{xz}/\beta)$ در یک نمونه، W_m در یک نقطه خاص روی نمودار تاوایی قرار می‌گیرند (Xypolias, 2009).

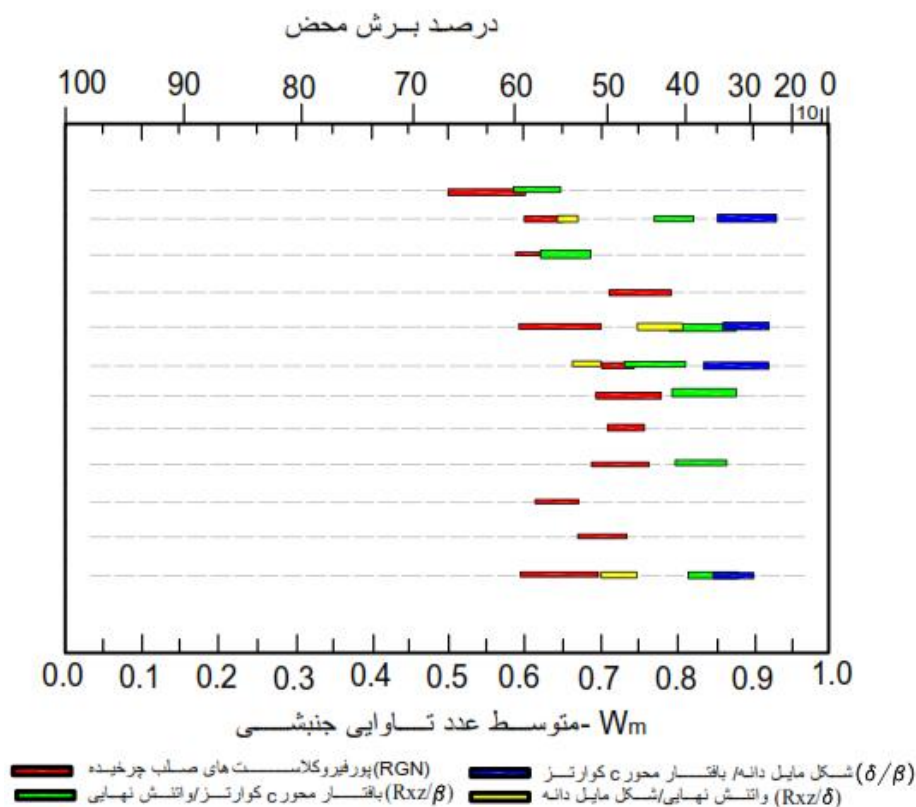
پژوهشگران بسیاری تغییرات منظمی را در بزرگی واتنش، LPO کوارتز و تاوایی نسبت به تاریخچه دگرشکلی را گزارش کرده‌اند (Xypolias and Koukouvelas, 2001; Law et al., 2004; Wallis, 1995; Grasemann et al., 1999; Xypolias, 2009, 2010; Sarkarinejad et al., 2015, 2017). در چنین مواردی به نظر می‌رسد که اغلب روش‌های تاوایی مقدار متوسط تاوایی جریان را برای یک مرحله دگرشکلی مورد نظر (مانند میلونیتی شدن، پس از

(and Tikoff, 1997). به نظر می‌رسد که دگرشکلی شکل پذیر در کمربند دگرگونی سنندج - سیرجان دارای مولفه برش ساده بیشتری در پایان دگرشکلی می‌باشد و در مراحل ابتدایی مولفه برش محض در دمای بالا غالب بوده است که به این نوع دگرشکلی تندشونده می‌گویند.

نتایج ما در واکای تاوایی با توجه به میلیونیت‌ها شباهت قابل توجهی دارند با آنچه در سایر مناطق مطالعاتی مانند برش رودخانه سوتلیج در زون برشی آیلانو شان قرمز (Wu et al., 2017)، زون MCTZ در سفره راندگی اوچی در کمربند کوهزایی آلپ (Xypolias et al., 2010) و زون تراستی مرکزی در شمال باختر هیمالیا (Graseman et al. 1999) در تغییرات زمانی تاوایی گزارش شده است.

بافتارهای مایل کوارتز مراحل نهایی دگرشکلی را ثبت می‌کنند. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که زون برشی مورد مطالعه احتمالاً یک دگرشکلی غیریکنواخت را تجربه کرده است که در آن مولفه برش ساده دگرشکلی در مراحل پایانی دگرشکلی نسبت به مولفه برش محض افزایش داشته است.

تغییرات زمانی جریان در طی دگرشکلی دربرگیرنده مسیرهای واتنش حاد می‌شوند که دگرشکلی ابتدا در نزدیکی برش ساده شروع شده و در مراحل پایانی مولفه برش محض افزایش می‌یابد و به‌عنوان جریان کاهشی تعریف می‌شود (Grasemann et al., 1999) و برعکس اگر با پیشرفت دگرشکلی مولفه برش ساده افزایش یابد نوع دگرشکلی افزایشی است (Simpson and De Paor, 1993; Fossen).



شکل 7- نمودار نشان دهنده تغییرات مقادیر تاوایی از چهار روش RGN، Rxz/δ ، Rxz/β و β/δ : چنانچه مشاهده می‌شود مقادیر تاوایی حاصل از فابریک مایل/بافتار محور c بالاترین مقادیر را نسبت به سایر روش‌ها نشان می‌دهد. با توجه به شکل گیری و حساسیت بافتار مایل دانه‌ها به مراحل پایانی دگرشکلی، از افزایش عدد تاوایی می‌توان افزایش مولفه برش ساده را طی جریان دگرشکلی استنتاج نمود.

6- نتیجه‌گیری

استفاده شده در واکاوی تاوایی نسبت به تاریخ جریان حساس هستند می‌توان با مقایسه نتایج مشاهده نمود که تغییرات دگرشکلی در طول زمان ثابت نبوده است، در ابتدا دگرشکلی در محدوده برش محض به وقوع پیوسته و توسط دانه‌های صلب فلدسپار به ثبت رسیده است و سپس دگرشکلی به سمت محدوده برش ساده پیشرفت داشته، بافتارهای کواتز که نسبت به مراحل پایانی دگرشکلی حساسیت بیشتری دارند این تغییر را نشان می‌دهند.

نشانه‌های میکروسکوپی و مزوسکوپی وجود جهت برش راستگرد را در پهنه‌های برشی در سنگ‌های دگرشکل شده منطقه مورد مطالعه مشخص می‌نماید. با توجه به فراوانی و برهم‌نهی عناصر ساختاری سه مرحله دگرشکلی در منطقه نیریز از کمربند دگرگونی سنندج-سیرجان تشخیص داده شده است. مقدار میانگین عدد جنبش‌شناختی تاوایی 0/78، بر اساس خصوصیات بافتار محور C کوارتز و پورفیر و کلاست‌های چرخیده اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده جزءبندی واتنش می‌باشد. از آنجا که نشانه‌های

منابع

- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 299, 211–238.
- Bailey, C.M., Francis, B.E., Fahrney, E.E., 2004. Strain and vorticity analysis of transpressional high-strain zones from the Virginia Piedmont, USA. In: Aslop, G.I., Holdsworth, R.E., McCaffrey, K.J.H., Hand, M. (Eds.), *Flow Processes in Faults and Shear Zones*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 224, pp. 249–264.
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210–265.
- Chew D. M., 2003. An excel spreadsheet for finite strain analysis using the Rf/Φ technique. *Comput Geosci* 29: 795–799.
- Faghih, 2008. Structural evaluation of accretion and collision process of the Zagros orogeny, Iran (unpublished thesis), Shiraz university.
- Faghih, A. و Sarkarinejad, S., 2011. Kinematics of rock flow and fabric development associated with shear deformation within the Zagros transpression zone, Iran. *Geological magazine* 9, 1-9.
- Fossen, H., Tikoff, B. 1997. Forward modelling of non-steady-state deformations and the 'minimum strain path'. *Journal of Structural Geology* 19, 987–996.
- Grasemann, B., Fritz, H., Vannay, J.C. 1999. Quantitative kinematic flow analysis from the main central thrust zone (NW-Himalaya, India): implications for a decelerating strain path and the extrusion of orogenic wedges. *Journal of Structural Geology* 21, 837–853.
- Jessup, M.J., Law, R.D., Frassi, C., 2007. The rigid grain net (RGN): an alternative method for estimating mean kinematic vorticity number (W_m). *Journal of Structural Geology* 29, 411–421.
- Johnson, S.E., 2009. Porphyroblast rotation and strain localization: debate settled! *Geology* 37, 663–666.
- Law, R.D., 2010. Moine thrust zone mylonites at the Stack of Glencoul: II e results of vorticity analyses and their tectonic significance. In: Law, R.D., Butler, R.W.H., Holdsworth, R.E., Krabbendam, M., Strachan, R.A. (Eds.), *Continental Tectonics and Mountain Building: The Legacy of Peach and Horne*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 335, pp. 579–602.
- Law, R.D., Knipe, R.J., Dayan, H., 1984. Strain-path partitioning within thrust sheets: microstructural and petrofabric evidence from the Moine thrust zone at Loch Eriboll, northwest Scotland. *Journal of Structural Geology* 6, 477–497
- Law, R.D., Schmid, S.M., Wheeler, J., 1990. Simple shear deformation and quartz crystallographic fabrics: a possible natural example from the Torridon area of NW Scotland. *Journal of Structural Geology* 12, 29–45.
- 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.
- Lisle, R.J., 1985, *Geological Strain Analysis. A Manual for the Rf/ϕ Method*. Pergamon Press, New York, 99 p.
- Means, W.D., 1994. Rotational quantities in homogeneous flow and the development of

- smallscale structure. *Journal of Structural Geology*
- Partabian, 2008. structural study and finite strain analysis of Ghuri deformed zone (unpublished thesis, Shiraz university).
- Passchier, C.W., 1987. Stable positions of rigid objects in non-coaxial flow e a study in vorticity analysis. *Journal of Structural Geology* 9, 679–690.
- Passchier, C.W., 1988a. The use of Mohr circles to describe non-coaxial progressive deformation. *Tectonophysics* 149, 323–338.
- Passchier, C.W., 1988b. Analysis of deformation paths in shear zones. *Geologische Rundschau* 77, 309e318.
- Passchier, C.W., 1997. The fabric attractor. *Journal of Structural Geology* 19, 113–127.
- Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 2005. *Microtectonics*, second ed. Springer Verlag, Berlin.
- Platt, J.P., Behrmann, J.H., 1986. Structures and fabrics in a crustal scale shear zone, Betic Cordilleras, S.E. Spain. *Journal of Structural Geology* 8, 15–34.
- Ramsay, J.G., Huber, M.I., 1983. *The Techniques of Modern Structural Geology*. In: *Strain Analysis*, vol. 1. Academic Press.
- Robin, P.Y.F., Cruden, A.R., 1994. Strain and vorticity patterns in ideally ductile transpression zones. *Journal of Structural Geology* 16, 447–466.
- Sarkarinejad, K., Godin, L., Faghih, A. 2009. Kinematic vorticity flow analysis and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology related to inclined extrusion of the HP-LT metamorphic rocks along the Zagros accretionary prism, Iran. *Journal of Structural Geology*, 31, 691–706.
- Sarkarinejad, K., Faghih, A., Grasemann. 2008. Transpressional deformations within the Sanandaj- Sirjan Metamorphic Belt (Zagros Mountains, Iran). *Journal of Structural Geology* 30, 818–26.
- Sarkarinejad, K., Keshavarz, S., Faghih, A. 2015. Kinematics constrains on the nature of deformation of the Sirjan mylonite nappe, Zagros orogeny: insights from strain and vortcity analysis. *Journal of Geosciences* 60. 189–202.
- Sarkarinejad, K., Keshavarz, S., Faghih, A., Samani, B. 2017. Kinematic analysis of rock flow and deformation temperature of the Sirjan thrust sheet, Zagros Orogen, Iran. *Geological magazine*. doi:10.1017/S0016756815000941.
- Sarkarinejad, S., Keshavarz, S., 2015. Quantitative kinematic analysis of the asymmetric boudins of the Zagros accretionary prism, Iran. *Geosciences Journal* 3. 415–430.
- 16, 437–445.
- Sarkarinejad, S., Partabian, A., Faghih, A., Kusky, T., 2012. Usage of strain vorticity analyses to interpret large-scale fold mechanisms along the Sanandaj-Sirjan HP-LT metamorphic belt, SW Iran. *Geological journal* 47, 99-110.
- Simpson, C., De Paor, D. G. 1993. Strain and kinematic analysis in general shear zones. *Journal of Structural Geology*, 15, 1–20.
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* 52, 1229–1258.
- Tikoff, B., Fossen, H., 1993. Simultaneous pure shear and simple shear: the unifying deformation matrix. *Tectonophysics* 217, 267–283.
- Truesdell, C., 1953. Two measures of vorticity. *Journal of Rational Mechanics Analysis* 2, 173–217.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld D., Abbasi M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., Chery, J. (2004). Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurement in Iran and northern Oman. *International Journal of Geophysics* 157, 381–398.
- Wallis, S.R., 1995. Vorticity analysis and recognition of ductile extension in the Sanbagawa belt, SW Japan. *Journal of Structural Geology* 17, 1077–1093.
- Weijermars, R., 1991. The role of stress in ductile deformation. *Journal of Structural Geology* 13, 1061–1078.
- Wu, W., Liu, J., Zhang, L., Qi, Y. and Ling, Ch. 2017. Characterizing a middle to upper crustal shear zone: Microstructures, quartz c-axis fabrics, deformation temperatures and flow vorticity analysis of the northern Ailao Shan-Red River shear zone, China, *Journal of Asian Earth Sciences* 139 (2017) 95–114.
- Xypolias, P. 2010. Vorticity analysis in shear zones: A review of methods and applications. *Journal of Structural Geology*, 32, 2072–2092.
- Xypolias, P., 2009. Some new aspects of kinematic vorticity analysis in naturally deformed quartzites. *Journal of Structural Geology* 31, 3–10.
- Xypolias, P., Koukouvelas, I.K., 2001. Kinematic vorticity and strain rate patterns associated with ductile extrusion in the Chelmos Shear Zone (External Hellenides, Greece). *Tectonophysics* 338, 59–77.



steady state deformation in the shear zones of the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Neyriz region

Saeede Keshavarz^{*1}, Ali Faghieh², Majid Shahpasandzadeh³, Saeed Zarei⁴

1, 3. Department of Earth Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

2. Department of Earth Sciences, College of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

3. Persian gulf university, Bushehr, Iran

Abstract:

Kinematic and structural studies on the deformed rocks of the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt as a part of the Zagros Orogeny show that the deformation was occurred under greenschist- to amphibolite-facies conditions. A dominant top-to-the-SE sense of shear is confirmed by asymmetric boudins, mica fish, mantled porphyroclasts, drag folds, asymmetric crenulation cleavage and quartz c-axis fabrics. The mean kinematic vorticity number analyses based on the quartz fabrics and rotated porphyroclasts revealed relative contribution of ~44% pure shear and ~56% simple shear components during ductile general shear deformation associated with a transpressional flow regime. The variable quantities of simple shear relative to time reveals that the earlier phases of deformation developed during a pure shear-dominated regime whereas the later stages took place in a simple shear-dominated regime.

Key words: Deformation, Kinematic Vorticity Number, Finite Strain, Sanandaj-Sirjan Metamorphic Belt, Neyriz