

تغییر شکل غیر هم محور حاشیه کرنش اسفالریت: شاخصی برای تعیین کینماتیک برشی در یال برگشته چین فرادیوارهای

علی ناکینی^۱، محمد محجل^(*)، علی یارمحمدی^۲

۱. کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲. دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشجوی دکتری زمین شناسی اقتصادی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۹۲/۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۹۳/۵/۱۱

چکیده

شواهد تغییر شکل به صورت تشکیل حاشیه کرنش در اطراف کانی اسفالریت در یال برگشته چین به عنوان شاخص اندازه گیری مراحل تکوین جنبشی مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی ساختاری انجام شده بر روی بخشی از نهشته های کرتاسه در منطقه معدنی تیران واقع در باختر اصفهان حکایت از شواهد دگرریختی برشی دارد که در یال برگشته چین خوردگی در فرادیواره گسل معکوس هم امتداد با آن واقع شده است. جهت گیری رشد فیبرها و نحوه چرخش آنها در حاشیه کرنشی این اسفالریت ها برای تعیین کینماتیک چین خوردگی مورد استفاده قرار گرفته است. با وجود این ساختار در یال برگشته چین های این منطقه، نحوه تکامل چین خوردگی و مکانیسم گسل گسترش یافته هم امتداد آن شناسائی و نحوه تکوین چین بررسی شده است. در این مطالعه علاوه بر ارائه میزان کشش فیبرها در جهت های مختلف در دوره رشد، مقدار درجه چرخش کانی اسفالریت و رشد فیبرها با روش object-centre path محاسبه شده است.

واژه های کلیدی: اسفالریت، جهت برش، چین خوردگی، گسل معکوس، حاشیه کرنش، فیبر.

مقدمه

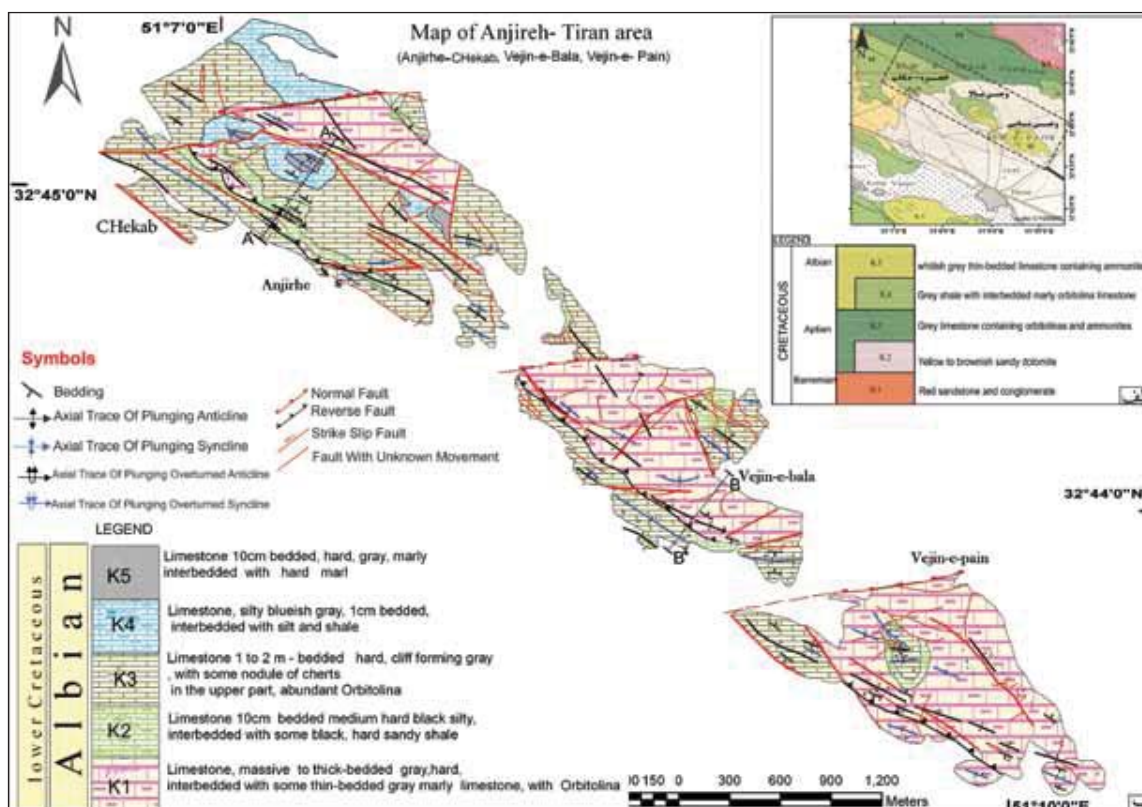
در پهنه سنندج - سیرجان قرار می گیرد (شکل ۱- الف). در این منطقه سنگ های آهکی - شیلی با سن کرتاسه برونزد دارند. این سنگ ها در سه معدن به صورت طاقدیس با محور میل دار از جنوب خاور به سمت شمال باختر به نام های وجین پایین، وجین بالا

منطقه مورد مطالعه در ۶۰ کیلومتری باختر اصفهان و در سمت شمال باختری شهر تیران واقع شده است که در تقسیم بندی واحدهای ساختاری - تکتونیکی،

* نویسنده مرتبط: mohajjel@modares.ac.ir

از شواهد دگرپختی برشی دارد که در یال برگشته چین در فرادیواره گسل معکوس واقع شده است. این شواهد به صورت تشکیل حاشیه کرنش^۱ در اطراف کانی اسفالریت دیده می شود. جهت گیری رشد فیبرها و نحوه چرخش آن ها شاهدهی برای تعیین جهت تنش و مقدار زاویه چرخش می باشند. در این مطالعه ضمن معرفی ساختار چین برگشته و گسل معکوس در ارتباط با آن در منطقه معدنی تیران، حاشیه کرنشی کانی ها اسفالریت در یال برگشته چین فرادیواره ای گسل معکوس با برداشت نمونه های جهت دار با روش object-centre path اندازه گیری شده و تاریخچه دگرپختی آن تعیین شده است.

و انجیره - چکاب قرار دارند که میل محور آن ها به سمت جنوب خاور بوده و در همان جهت طاقدیس ها زیر دشت پنهان می شوند (شکل ۱- ب). معادن سرب و روی این منطقه از لحاظ اقتصادی حائز اهمیت بوده و در حال بهره برداری می باشند. در رخنمون های سطح زمین شواهد گوناگونی مربوط به ساختارهای زمین شناسی هستند که ویژگی جنبشی، تاریخچه و چگونگی دگرپختی را معرفی می کنند. حاشیه های کرنشی، ساخت هایی هستند که می توانند اطلاعات زیادی درباره نوع برش و کرنش نهایی از آن ها استخراج کرد (Ramsay and Huber, 1983). بررسی ساختاری انجام شده بر روی سنگ آهک کرتاسه چین خورده در منطقه تیران حکایت



شکل ۱. الف) موقعیت معادن انجیره-تیران بر روی نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ نجفآباد (Zahedi, 1975). ب) نقشه زمین شناسی انجیره- تیران (انجیره - چکاب، وجین بالا، وجین پایین) اصلاح شده از نقشه Taraz (1968)

1. Strain fringe

علی ناکینی و همکاران

اکسید آهن و بافت دانه شکری دیده می‌شود. قسمت فوقانی این واحد دارای فسیل فراوان اربیتولین می‌باشند. واحد K_4 شامل ۲۱ متر از آهک‌های سیلتی و مارنی با لایه‌هایی با ضخامت در حد سانتی‌متر است که رنگ غالب این واحد آبی تیره بوده و در رخنمون به راحتی قابل تشخیص است. واحد K_5 که مرتفع‌ترین واحد منطقه را تشکیل می‌دهد، شامل لایه‌هایی از آهک‌های مارنی به رنگ خرمایی - زرد به ضخامت ۵۰ متر است.

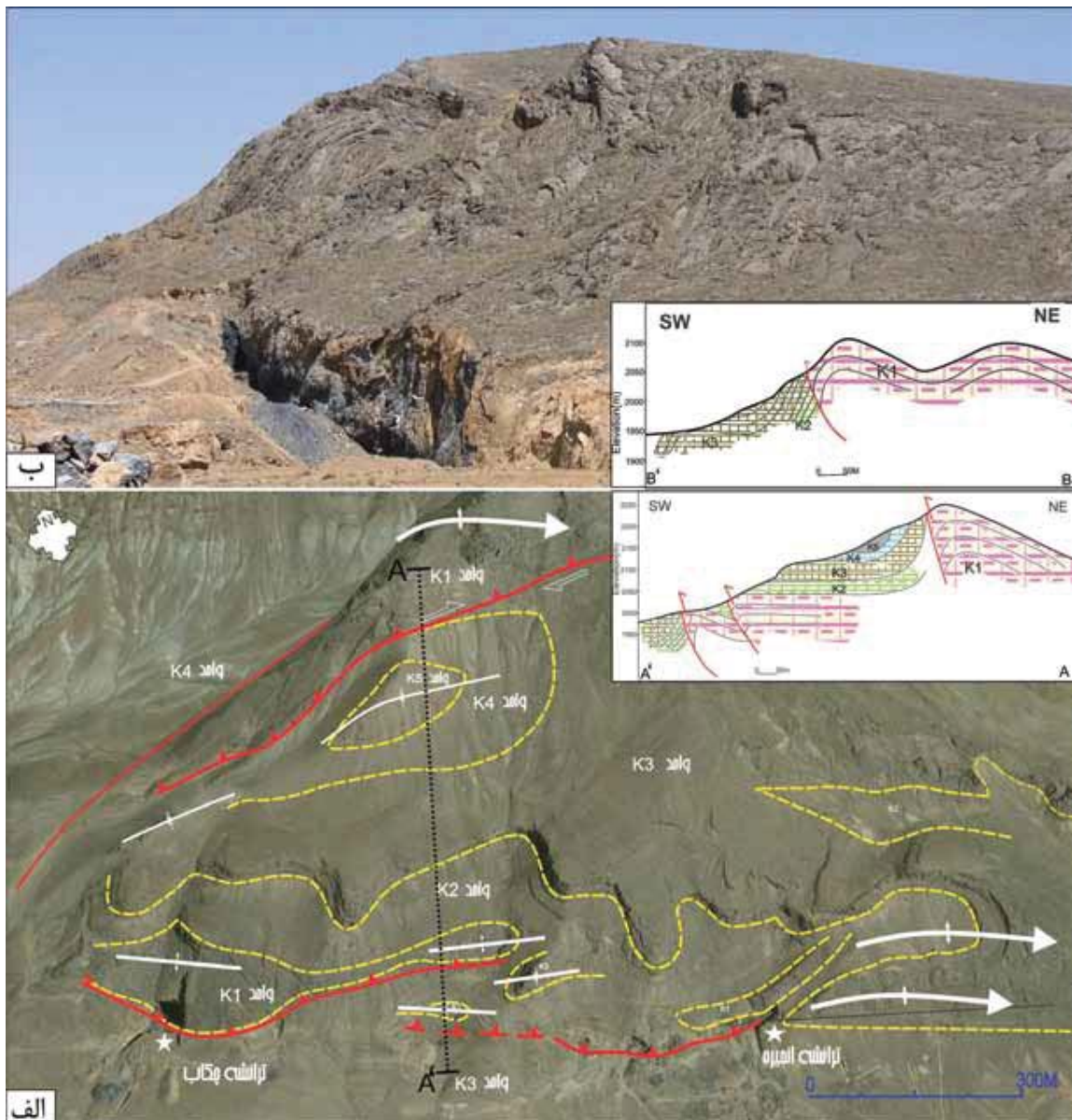
موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در طاق‌دیس‌های سمت جنوب انجیره - چکاب و وجین بالا

در جنوب‌باختری معدن انجیره - چکاب، طاق‌دیزی وجود دارد که محور آن به سمت جنوب‌خاور میل دارد. شیب واحدها در سمت شمالی کم بوده و در برخی قسمت‌ها دارای حالت افقی است. مرز بین واحد K_1 و K_2 در سمت جنوب منطقه به شدت به هم‌ریخته است. کانی‌ها اسفالریت در ترانشه چکاب و وجین بالا حاشیه کرنش از خود نشان می‌دهند. در وجین بالا عمدتاً واحدهای K_1 رخنمون دارند. در قسمت‌های شمالی، واحدهای K_2 و K_3 نیز رخنمون دارند (شکل ۲). در این منطقه با توجه به فعالیت گسل‌های معکوس، طاق‌دیس‌های فرادیواره‌ای دیده می‌شوند. در ترانشه‌های این معدن واحد K_2 به شدت خرد شده و واحدهای آهکی و شیلی در هم پیچیده‌اند. از نشانه‌هایی که می‌توان به معکوس بودن گسل اشاره کرد وجود پهنه برشی است که حاوی سنگ‌های با حالت‌های لنزی شکل از قطعات آهکی-شیلی است. ریزچین‌های داخل ترانشه‌ها نیز معکوس بودن گسل را تایید می‌کنند. حاشیه کرنش در این ترانشه همانند ترانشه چکاب در اطراف کانی اسفالریت دیده می‌شود (شکل ۳).

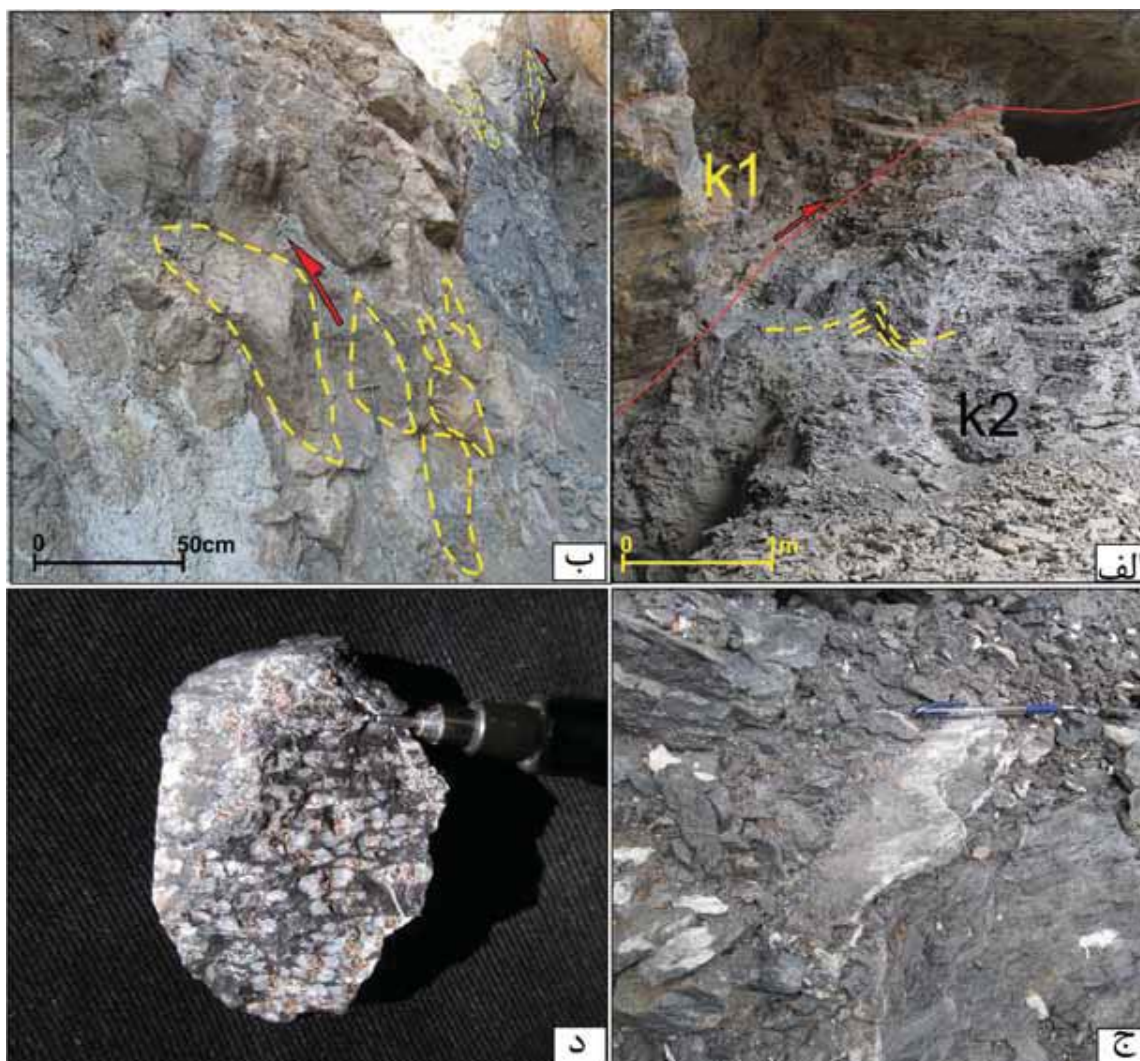
زمین‌شناسی عمومی

معدن انجیره - چکاب به طول دو کیلومتر، عرض یک کیلومتر و با ارتفاع ۳۷۰ متر از دشت اطراف معدن وجین بالا با دو کیلومتر طول، ۸۰۰ متر عرض و ارتفاع ۲۴۰ متر از سطح دشت اطراف و معدن وجین پایین با دو کیلومتر طول، یک کیلومتر عرض و ۲۰۰ متر ارتفاع از سطح دشت اطراف خود رخنمون دارند. واحدهای سنگی از نظر سنی به دوره کرتاسه پایینی (بارمین فوقانی-آلبین) تعلق داشته و از سنگ‌آهک‌های ضخیم و متوسط‌لایه تشکیل شده‌اند که بین لایه‌هایی از مارن و شیل سیاه قرار دارند. نهشته‌های منطقه تیران با واحدهای آهکی اربیتولین دار مارنی با میان لایه‌هایی از شیل (K_4) و آهک‌های خاکستری رنگ آمونیت دار (K_5) در منطقه مشخص شده‌اند (Zahedi, 1975) (شکل ۱-ب). کامل‌ترین توالی چینه‌شناسی در منطقه مورد مطالعه را می‌توان در معدن انجیره - چکاب دید. واحدهای چینه‌شناسی این سه معدن توسط Taraz (1968) به پنج واحد تقسیم شده است (شکل ۱-ب).

واحد K_1 شامل لایه‌های دو تا سه متری از سنگ‌آهک‌های خاکستری است که کمترین ضخامت این واحد ۲۳۰ متر بوده و با میان لایه‌هایی از مارن رخنمون دارد و سن آبتین-آلبین به این واحد داده شده است. این واحد بیشترین رخنمون را در منطقه دارا بوده و بهترین رخنمون آن در معدن انجیره - چکاب، یال شمالی وجین بالا و وجین پایین دیده می‌شود. واحد K_2 شامل ۳۵ تا ۴۰ متر سنگ‌آهک‌های متوسط‌لایه سیلتی و ماسه ای در سطح هوازده، به رنگ قرمز خرمایی با میان لایه‌هایی از شیل رخنمون دارد. این واحد به شدت خرد شده و سیلیسی است. واحد K_3 شامل ۴۰ تا ۵۰ متر آهک خاکستری مقاوم با میان لایه‌هایی از مارن و همچنین دارای نودول‌های چرتی در قسمت فوقانی است که به رنگ تیره دارای



شکل ۲. الف) طاق‌دیس جنوب و جین بالا به همراه برش زمین‌شناسی B-B'. مطالعه نمونه در داخل ترانسه در مرز بین واحد K₁ و K₂ صورت گرفته است. جهت دید به سمت شمال باختر (ب) نمای کلی از واحدهای معدن انجیره - چکاب بر روی تصویر ماهواره‌ای (برگرفته از نرم افزار Google Earth) به همراه برش زمین‌شناسی A-A'



شکل ۳. نشانه‌های برشی برای حرکت معکوس به سمت جنوب باختر در پهنه برشی الف) ریزچین‌های موجود در پهنه برشی که در ترانشه‌های معادن و جین بالا و انجیره - چکاب دیده می‌شوند. این ریزچین‌ها هم روند با چین خوردگی اصلی بوده و با تمایل سطح محوری به سمت جنوب باختر قرار دارند. واحد K_1 در ترانشه‌ها با شیب به سمت شمال‌خاور، یال برگشته طاق‌دیس می‌باشند. ب) حالت‌های لنزی شکل از قطعات آهکی- شیلی در داخل ترانشه‌ها که حرکت معکوس به سمت جنوب باختر را نشان می‌دهند. ج) سطح گسل با رشته‌های کلسیتی. د) نمونه دستی از حاشیه کرنش موجود در اسفالریت‌ها

روش مطالعه

و کشیده باشند، حاشیه‌های کرنشی نامیده می‌شوند و مجموع هسته و حاشیه‌ها به نام ساختار حاشیه کرنشی^۱ (شکل ۴- الف) معرفی می‌گردند (Pabst, 1931; Ramsay and Huber, 1983; Passchier and Trouw, 2005; Koehn, et al., 2001).

از لحاظ شکل ساختاری بین دو اصطلاح strain

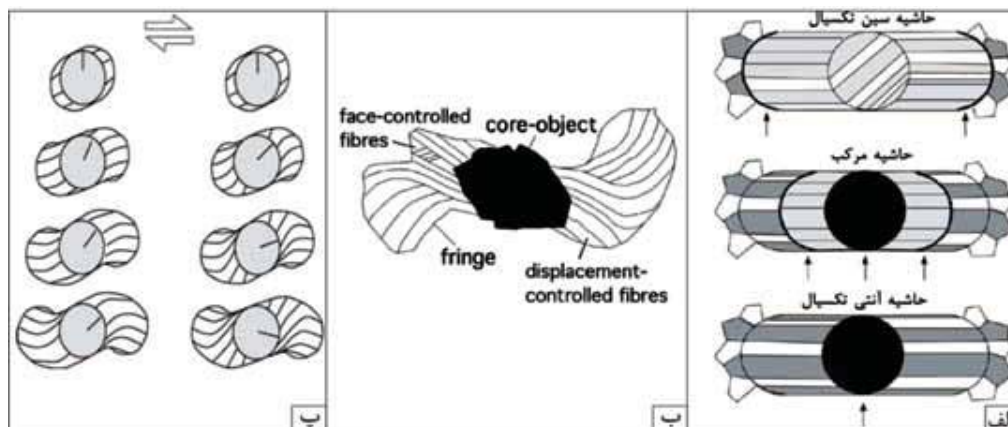
در محیط‌های با فشار بالا و حرارت پایین وجود انحلال فشارشی در کنار جسم سخت در جهت ISA تراکمی می‌باشند در حالی که ممکن است در محل اتصال جسم و خمیره رگه‌های کششی در جهت ISA کششی تشکیل شود (Pabst, 1928; Mügge, 1931). گاهی درون این رگه‌ها رشد کانی‌ها جدید دیده می‌شوند، در صورتی که این بلورها به صورت فیبری

1. - Strain shadows or strain fringes

سین تکسیال یا نوع کرینوئید (جنس هسته با خمیره مشابه) و یا ترکیبی باشند (Ramsay and Huber, 1983; Passchier and Trouw, 2005). در این مطالعه بحث اصلی حاشیه‌های کرنشی است که به صورت غیر هم محور رشد کرده‌اند. رشد فیبرها در نوع غیر هم محور در حالت نرمال به دو قسمت تقسیم می‌شوند. اگر رشد فیبرها تحت کنترل جابجایی^۴ باشد، انحنای مشابهی نسبت به طرح کلی حاشیه نشان می‌دهند با این تفاوت که نسبت به سطح جریان با زاویه بیشتری قرار می‌گیرند. اگر فیبرها تحت کنترل سطح^۵ باشند به سمت بیرون پراکنده می‌شوند (شکل ۴-ب). انحنای فیبرها بیشتر هم جهت با انحنای حاشیه خواهد بود ولی در نزدیکی هسته به هم نزدیک می‌شوند (Koehn et al., 2000)، با این وجود انحنای فیبرها به مقدار زیادی بستگی به نرخ چرخش هسته نسبت به حاشیه‌ها دارد (شکل ۴-پ). این نرخ چرخش بستگی به هماهنگی بین هسته و زمینه دارد.

fringe و strain shadow تفاوت‌هایی وجود دارد. زمانی از اصطلاح strain fringe استفاده می‌شود که تجمع بلورهای حاشیه با جهت‌یابی و مرز مشخص با زمینه^۱ داشته باشند در حالی که اصطلاح strain shadow حالتی است که بلورها تبلور یافته و حالت ریش‌ریش^۲ با مرز زمینه دارند و جهت‌یابی واضحی را نشان نمی‌دهند. قسمت ما بین دو حاشیه کرنش را اصطلاحاً قسمت مرکزی^۳ و کل ساختار (قسمت مرکزی و حاشیه‌ها) ساختار حاشیه کرنشی نامیده می‌شود (Koehn et al., 2000).

از آنجا که وجود جسم سخت به صورت هسته، هندسه ساختار دگرریختی را در اطراف حاشیه‌های کرنشی در حال تشکیل تغییر می‌دهد، شکل و ساختار داخلی آن با رگه بسیار متفاوت است. حاشیه‌های کرنش اطلاعات مربوط به جریان و تاریخچه دگرشکلی را در خود ذخیره می‌کنند و از این نظر ابزار خوبی برای شاخص‌های کینماتیکی به حساب می‌آیند. حاشیه‌های کرنش می‌توانند آنتی تکسیال یا نوع پریت (جنس هسته با جنس خمیره متفاوت)،

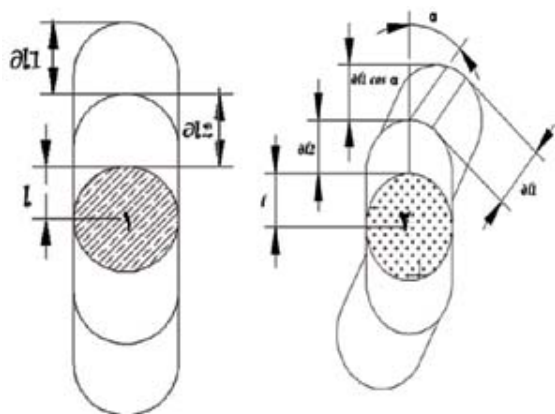


شکل ۴. الف) ترسیم نمایشی از سه نوع حاشیه کرنشی. ماده موجود در هسته در حاشیه کرنشی سین تکسیال جسمی مثل کرینوئید است که با دوقلوهای حاصل از دگرریختی همراه است. پیکان‌ها موقعیت صفحه رشد را مشخص می‌سازند، ب) رشد فیبرها در دو حالت کنترل جابجایی و کنترل سطح (Koehn et al., 2000). پ) طرح‌های مختلف فیبر که متاثر از نرخ چرخش متفاوت در ارتباط با حاشیه‌هاست

1. Matrix
2. Fuzzy
3. Core-object
4. Displacement-controlled
5. Face-controlled

علی ناکینی و همکاران

برای محاسبه واتنش استفاده شد. ویژگی‌های اصلی این رشته سایه فشار متحمل تغییر شکل افزایشی هم‌محور است. هسته با شعاع L یک دسته رشته‌هایی با طول ∂l را ایجاد می‌کند. واتنش افزایشی e_{ii} با رابطه ۱ برابر خواهد بود. در طول مرحله بعدی واتنش، یک رشته با طول ∂l_2 شکل می‌گیرد. در این حال، رشته‌های شکل گرفته اولیه با سخت بودن به جسم سخت پیوسته و خط مبنا با طول $l + \partial l_1$ را می‌سازند. بنابراین واتنش افزایشی دوم با رابطه ۲ برابر می‌شود و این مورد برای افزایش‌های بعدی (n ام) به صورت رابطه ۳ خواهد بود (شکل ۵).



شکل ۵. رابطه بین کشش‌های افزایشی ∂l_1 و ∂l_2 در مدل رشته سخت برای افزایش‌های هم‌محور و غیرهم‌محور حاشیه کرنش (Ramsay and Huber, 1983)

$$e_{ii} = \frac{\partial l_1}{l} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$e_{ii} = \frac{\partial l_2}{l + \partial l_1} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$e_{ii} = \frac{\partial l_n}{l + \partial l_1 + \partial l_2 + \dots + \partial l_{n-1}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

کل طول شدگی محدود (e_{fi}) از ضرب نیم‌محورهای بیضی واتنش متوالی به دست می‌آید (رابطه ۴).

حاشیه‌ها و مسیر دگرریختی

بسیاری از حاشیه‌ها و رگه‌ها دارای فیبرهای خمیده هستند که این فیبرها در اثر تغییر امتداد پارامترهای جریان دگرریختی به وجود می‌آیند. برای تعیین واتنش‌های افزایشی لازم است جهت‌های رشته‌ها ثبت شوند. طول رشته‌ها بین محدوده‌های زوایای انتخاب شده اندازه‌گیری می‌شود و قطر حداکثر جسم مقاوم در جهت متوسط رشته تعیین می‌گردد. دو الگوی عمده برای محاسبه واتنش افزایشی استفاده می‌شود. الگوی اول به الگوی رشته سخت موسوم است و در آن فرض می‌شود که برای هر افزایش در طول رشد، رشته‌های قبلاً تشکیل شده غیر قابل تغییر شکل هستند و به طریق سخت مثل اجسام مقاوم مرکزی عمل می‌کنند در این الگو باید طول هر رشته که قبلاً تشکیل شده به شعاع جسم سخت مرکزی اضافه شود و این طول جهت تعیین هر افزایش واتنش بعدی مورد استفاده قرار گیرد.

در الگوی دوم که به الگوی رشته تغییر شکل پذیر معروف است فرض می‌شود که در زمان شکل‌گیری رشته به روشی مشابه با سنگ زمینه احاطه‌کننده جسم سخت تغییر شکل می‌دهد و بنابراین رشته‌های قبلاً تشکیل شده در تعیین مقادیر واتنش‌های افزایشی بعدی نقشی ندارند. اما در نتیجه افزایش‌های بعدی تغییر شکل، تغییر در طول را متحمل می‌شوند. هندسه رشته‌های کوارتز به نظر می‌رسد بیشترین مطابقت با الگوی رشته سخت داشته باشد، در حالی که هندسه رشته‌های کلریت و کلسیت را می‌توان به هر دو الگو ربط داد (Ramsay & Huber, 1983).

رابطه‌های اندازه‌گیری واتنش برای الگوی رشته سخت

در این مطالعه با توجه به این که رشته‌های کلسیت در اطراف کانی اسفالریت دارای خمیدگی اند ولی پیوستگی خود را حفظ کرده‌اند از الگوی رشته سخت

1. Rigid fiber model
2. Deformable fiber model

هستند دیده می‌شوند (شکل ۶- الف و ب). ناهم جنسی بین هسته و فیبرها وجود دارد که در تقسیم بندی انواع حاشیه کرنش از نوع غیر هم محور است (Ramsay and Huber, 1983; Passchier and Trouw, 2005).

وجود خوردگی‌های موجود در سطح بیرونی هسته اسفالریت (دندان شانه‌ای) (شکل ۶- پ) می‌تواند شاهدهی برای انحلال حاشیه و واکنش آن با زمینه پیرامون قبل از رشد فیبر باشد. وجود این کجی‌ها بر سطح هسته، نقش موثری در شروع دنباله‌روی فیبرها داشته است. ویژگی دنباله‌روی و یا عدم دنباله‌روی بلورها در حاشیه‌های کرنشی به یک عامل پیچیده سرعت بازشدگی در فضای بین حاشیه و هسته و همچنین بین بلورها در حاشیه است. نتایج تجارب آنالیزی و کامپیوتری نشان می‌دهد که اگر نرخ رشد بلور با بازشدگی موزون و سطح هسته ناهموار باشد می‌تواند دنباله‌روی جهت بازشدگی در حاشیه کرنش باشند که در این صورت جهت رشد آن‌ها بستگی به چرخش نسبی حاشیه و هسته دارد (Koehn et al., 2001 and 2003). چنین فرایند رشدی در فیبرهای حاشیه ناهموار اسفالریت دیده می‌شود. علاوه بر این در بعضی از نمونه‌ها رشد شعاعی فیبرهای کلسیت خود شاهدهی بر کنترل رویه، بر فیبرهای کلسیتی این مجموعه است.

$$e_{ii} = \frac{\partial l_1 + \partial l_2 + \partial l_3 + \dots + \partial l_n}{l} \quad (\text{رابطه ۴})$$

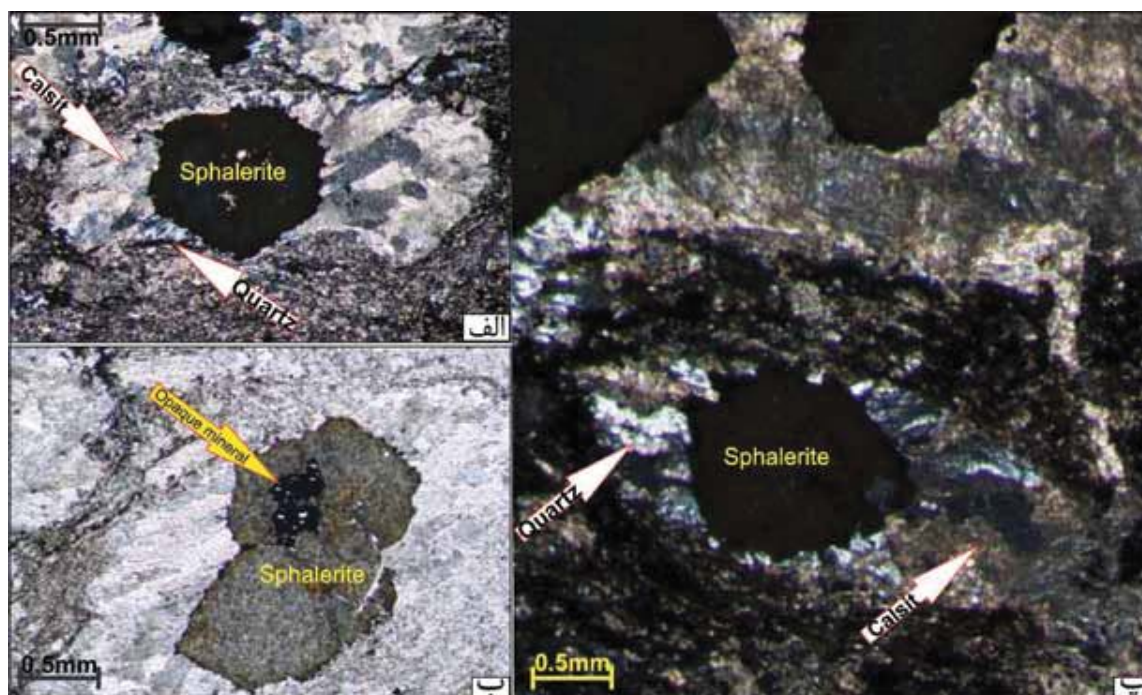
زمانی که افزایش‌ها هم محور نیستند، اصطلاحات ویژه‌ای را باید به کار برد، چون طول موثر پیکره سخت در جهت افزایش‌های بعدی تابعی از زاویه α بین رشته اولیه و جهت افزایش بعدی است. طول خط پایه پیکره سخت برای افزایش طول ∂l_2 مجموع شعاع پیکره سخت و $\partial l_2 \cos \alpha$ است که واکنش افزایشی دوم را نشان می‌دهد. در این صورت با رابطه ۵ برابر می‌شود و به طور کلی برای افزایش (nام) از (رابطه ۶) استفاده می‌شود.

$$e_{ii} = \frac{\partial l_2}{1 + \partial l_1 \cos \alpha} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$e_{ii} = \frac{\partial l_2}{1 + \sum_{i=1}^{n-1} \partial l_i \cos \alpha} \quad (\text{رابطه ۶})$$

بحث و تفسیر مشاهدات

وجود جسم سخت مانند اسفالریت، به عنوان هسته این ساختار باعث تغییرات شدید در میدان تنش و الگوی جریان دگرختی شده است. علاوه بر آن، تغییرات محلی در جهت تنش و عوامل کنترل کننده رشد فیبرها نیز بر این جریان موثر هستند. در مشاهدات کلی، هسته اسفالریت دیده می‌شود که فیبرهای کلسیتی و کوارتزی در حاشیه آن رشد کرده‌اند در داخل هسته اسفالریت کانی‌ها تیره که بیشتر از جنس پیریت و کالکوپیریت



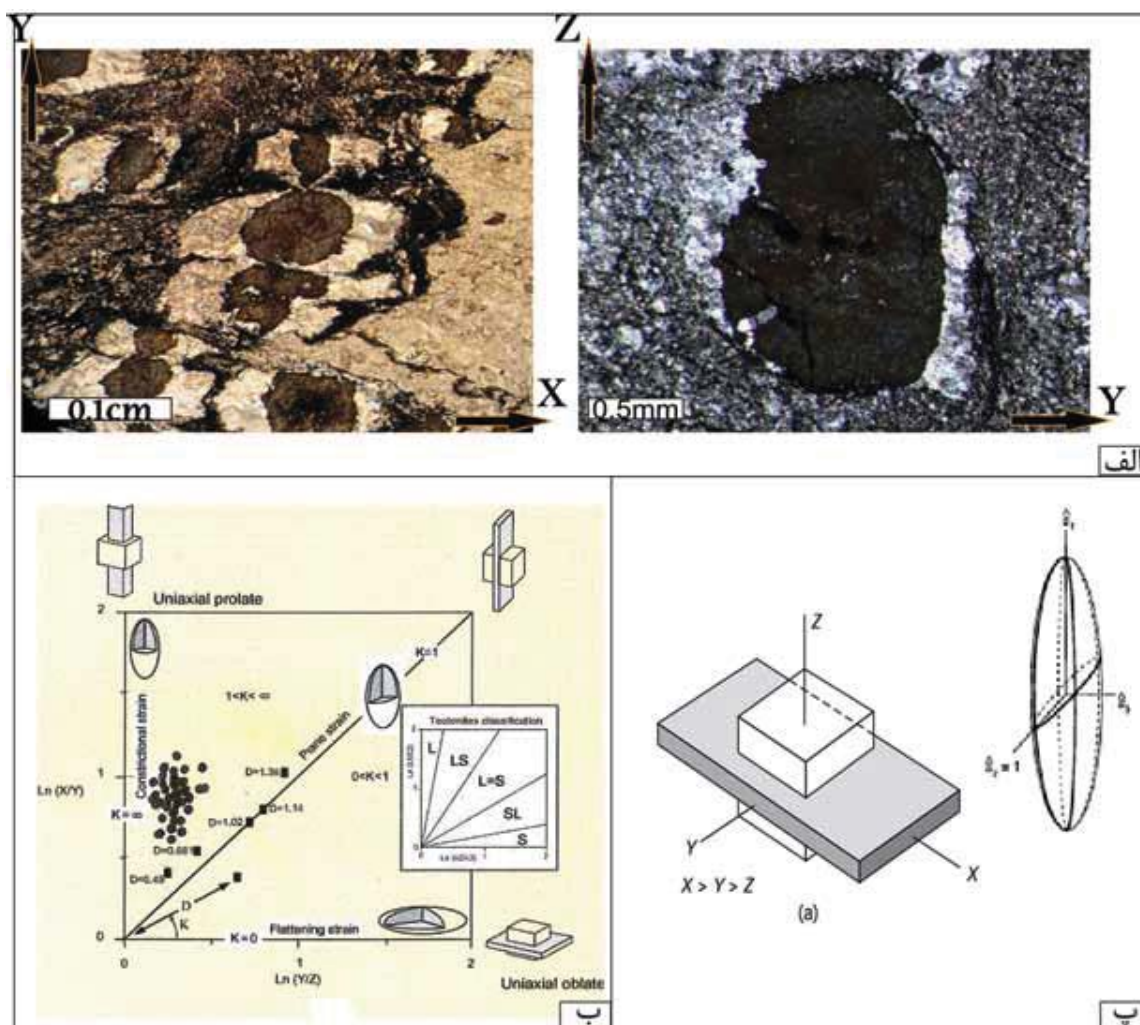
شکل ۶. الف) ساختار حاشیه کرنش که شامل هسته از اسفالریت و فیبرهای کوارتز و کلسیت که اطراف آن دیده می‌شوند، ب) کانی‌ها کوچک در داخل هسته اسفالریت دیده می‌شوند که بیشتر از جنس کالکوپیریت هستند، پ) خوردگی در اطراف اسفالریت که به شکل دندان شانه‌ای هستند، این عامل در رشد شعاعی فیبرهای کلسیت و کوارتز در اطراف هسته موثر است

رد استرین مستقیم را ایجاد می‌کنند، در حالی که افزایش‌های نامساوی استرین، ردهای منحنی را به وجود می‌آورد. این در حالی است که در نمودار فلین، هر دو حالت استرین‌های جزئی مساوی و نامساوی، به صورت رد استرین غیر مستقیم رسم می‌شوند (Marshak and Pluijm, 2004). با توجه به موقعیت بیضوی استرین در این نمودار الگوی شکل بیضوی استرین برای حاشیه کرنش مربوط به این منطقه شکل خربزه‌ای^۲ توجیه می‌گردد که در محدوده LS در این نمودار واقع شده است. با توجه به ساختار سه بعدی مربوطه می‌توان رابطه نسبی $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ برای محوره‌های استرس و $X > Y > Z$ برای محوره‌های استرین این ساختارها معرفی کرد (شکل ۷-پ).

در برش برای مطالعه میکروسکوپی از ساختار حاشیه کرنشی در جهت‌های حداکثر کشش (صفحه XY) و حداقل آن (صفحه YZ) (شکل ۷-الف) به رابطه بین ۳ مولفه کرنش این ساختار می‌توان پی برد. این برداشت بر روی ۳۰ نمونه از حاشیه کرنش انجام گرفت و موقعیت بیضوی استرین در نمودار رمزی^۱ پلات گردید (شکل ۷-ب).

نمودار رمزی از مزیت‌های چندی نسبت به نمودار فلین برخوردار است. نخست اینکه استرین‌های کوچک که نزدیک مبدا قرار می‌گیرند و استرین‌های بزرگ که در فاصله زیادی از مبدا قرار می‌گیرند، در نمودار رمزی یکنواخت‌تر توزیع می‌شوند. دوم اینکه نمودار رمزی یک ارزیابی تصویری از تاریخچه استرین‌های جزئی بدست می‌دهد، زیرا در طول تغییرشکل، استرین‌های جزئی مساوی، مسیر یا

1. Ramasy diagram
2. General strain



شکل ۷. الف) تعیین موقعیت صفحه XY در اسفالریت. محور X حداکثر کشش در اسفالریت را نشان می‌دهد ($X > Y$). تعیین موقعیت صفحه YZ و مقادیر فیبرهای تشکیل شده در جهت $Y > Z$ را نشان می‌دهد. ب) نمودار ۳ بعدی رمزی و موقعیت بیضوی استرین ۳۰ نمونه از حاشیه کرنش که در نمودار پیاده شده است. پ) رابطه بین محورهای استرین و استرس در ساختار حاشیه کرنشی اسفالریت

استفاده شوند. چرخش در حاشیه، نسبت به هسته ممکن است به طور مجزا مطالعه شود. موضوع مسیر هسته و حاشیه به فیبرهای انفرادی بستگی نداشته و برای همه یکسان است و می‌تواند تعیین کننده کرنش نهایی باشد. حتی می‌تواند تاریخچه دگرختی در سنگ دیواره را نیز بازگو کند (Koehn et al., 2003). این روش می‌تواند مسیر باز شدن فیبرها نسبت به هسته مرکزی را تعیین کند. مسیر بازشدگی برای فیبرها توصیف کننده حرکت قدیمی ترین قسمت حاشیه‌ها نسبت به هسته مرکزی می‌باشند (شکل

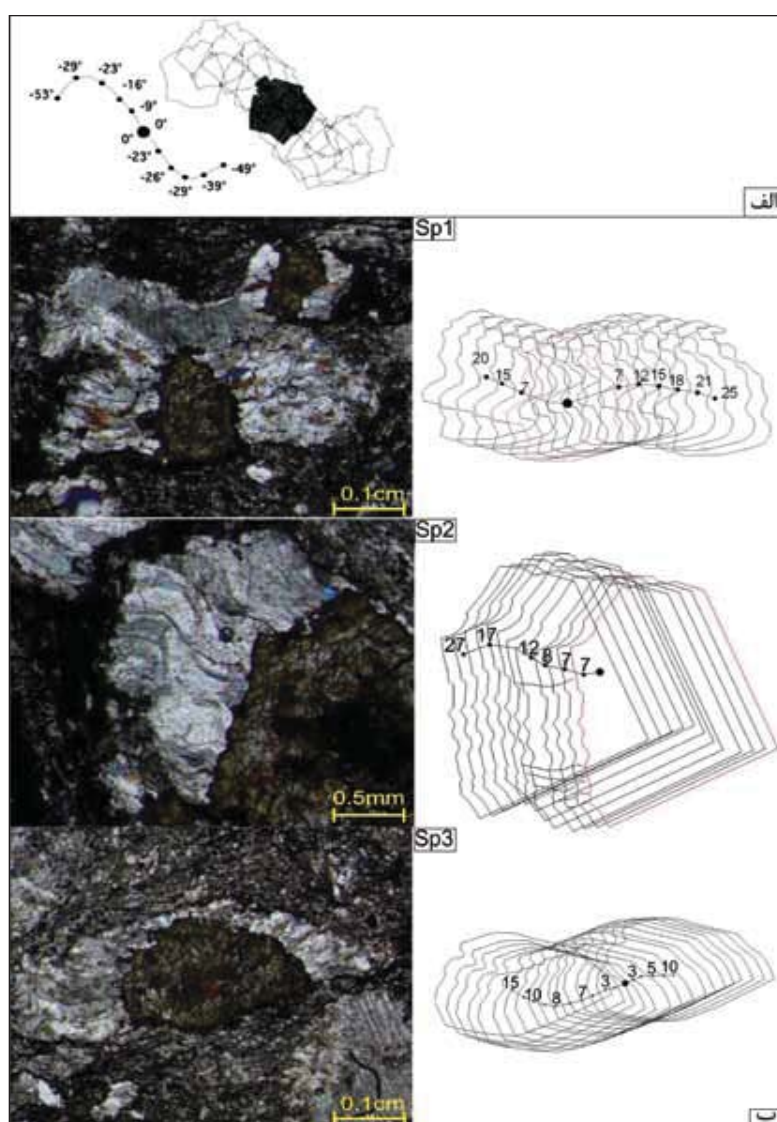
محاسبه میزان چرخش با روش object centre path

(Aerden (1996) و Koehn et al. (2000) روش object centre path را برای آنالیز حاشیه‌های کرنش غیردگربرخته پیشنهاد کرده‌اند به طوری که ناهموار بودن سطح خارجی جسم مرکزی برای فیبر مشخصی تنظیم می‌شود. لغزش و چرخش در هسته مرکزی در طول آن‌ها در آنالیز مسیر منحنی شکل فیبرها در بسیاری از موارد کاربرد داشته و این قابلیت را دارند که به عنوان ابزاری مهم برای آنالیز کینماتیک دگربرختی سنگ‌ها

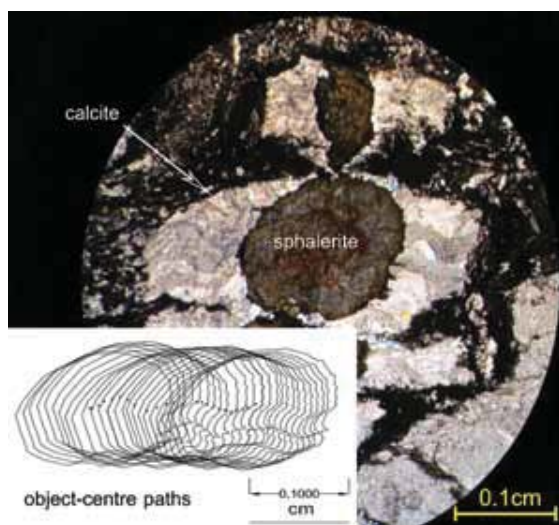
علی ناکینی و همکاران

شد. با توجه به اینکه سمت راست نمونه رشد بیشتری از حاشیه‌ها را نشان می‌دهد، چرخش ۲۵ درجه ای از کانی اسفالریت مشاهده می‌شود. نمونه دوم (sp2) از ترانسه چکاب برداشت شده است. کانی اسفالریت در این نمونه با چرخش ۲۷ درجه و رشد فیبرهای کلسیت دیده می‌شود. نمونه سوم (sp3) از معدن وجین بالا انتخاب شده است. با توجه به اینکه چرخش کانی اسفالریت در این نمونه از سایر نمونه‌ها کمتر می‌باشند رشد فیبرها خمیدگی کمتری را نشان می‌دهند.

۸- الف). سه نمونه از مقاطعی (شکل ۸- ب) که دارای حاشیه‌های منظمی بودند از داخل ترانسه‌های چکاب، انجیره و وجین بالا به صورت جهت دار از یال برگشته طاق‌دیس‌های فرادیوارهای انتخاب شد. همانطور که بروی تصاویر میکروسکوپی مشخص است فیبرهای کلسیتی دارای خمیدگی و بدون قطع‌شدگی می‌باشند که این خود نشان دهنده چرخش کانی‌های اسفالریت و رشد فیبرها همزمان با چرخش می‌باشند. در نمونه اول شکل ۸- ب (sp1)، این نمونه از ترانسه انجیره برداشت



شکل ۸. الف) جسم مرکزی و مسیر رشد فیبر برای آن مشخص شده است (Aerden, 1996; Koehn et al., 2000)، ب) نمونه‌هایی از مسیر رشد فیبرهای کلسیت با استفاده از روش object centre path



شکل ۹. نمونه مورد مطالعه برای محاسبه واتنش افزایشی و مسیر چرخش بلور اسفالریت

محاسبات واتنش افزایشی

مقطع نازکی از بلور اسفالریت در زمینه آهک مارنی از مرز بین واحد K_1 و K_2 انتخاب شد (شکل ۹). اسفالریت به وسیله سایه کرنشی کلسیت رشته‌های احاطه شده است. رشته‌ها شدیداً دارای خمیدگی‌اند ولی پیوستگی خود را حفظ کرده‌اند. هیچ نشانه‌ای از تغییرات در ساختمان رشته‌های کلسیت در طول رشته‌ها مشاهده نمی‌شود. این ویژگی‌های سایه فشاری گویای تشکیل آن با مدل رشته سخت است. با توجه به رابطه ۶ و همچنین رسم خطوط ایزوگون با نرم‌افزار اتوکد^۱، میزان کشیدگی فیبرها محاسبه شد (جدول ۱). همانطور که در این جدول دیده می‌شود در یک سمت حاشیه، تعداد ۹ توالی کشش انتخاب و میزان کشش در هر مرحله محاسبه شده است.

دوقلویی در فیبرهای کلسیت

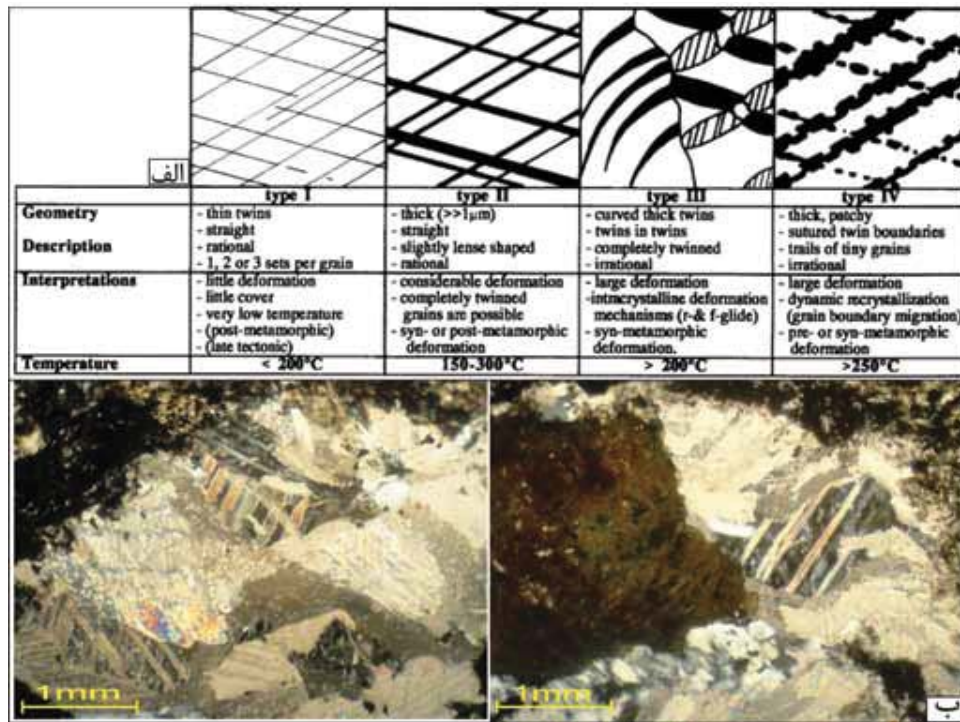
دوقلوسازی^۲ فرایندی است که با اعمال تنش محدود به وجود می‌آید و فقط در جهت‌های بلوری خاص عمل می‌نماید. برای بررسی شرایط دگرشکلی گسل معکوس در منطقه تیران با توجه به حساسیت ریزساختارهای کانی‌ها کلسیت نسبت به دمای دگرشکلی، می‌توان از این کانی‌ها استفاده کرد. با توجه به سنگ‌های کربناتی در منطقه مورد مطالعه، کانی‌ها کلسیت دارای ماکل‌های دگرشکلی در محدوده تغییرشکل برشی مورد مطالعه فراوان بوده و براساس هندسه و ریخت‌شناسی آن‌ها شرایط دمایی دگرشکلی در منطقه و تغییرات آن قابل اندازه‌گیری و بررسی بود. با توجه به تقسیم‌بندی انواع ماکل‌های دوقلویی کلسیت توسط Ferril و Weiss (1991) در منطقه انجیره - چکاب دانه‌های کلسیت در حاشیه‌های کرنش دارای رشته‌های ماکل مستقیم و ضخیم (Type II)، دارای بیشترین فراوانی هستند. براساس این ساختارها، دمای دگرشکلی دانه‌های کلسیت در حدود 150° - 200° سانتی‌گراد برآورد می‌شود (شکل ۱۰- الف و ب).

جدول ۱. جزئیات اندازه‌های طول رشته‌ها و طول خطوط پایه برای هر افزایش. همانطور که دیده می‌شود با توجه به همگن بودن شکل بلور اسفالریت تغییر چندانی در اندازه طول پایه دیده نمی‌شود

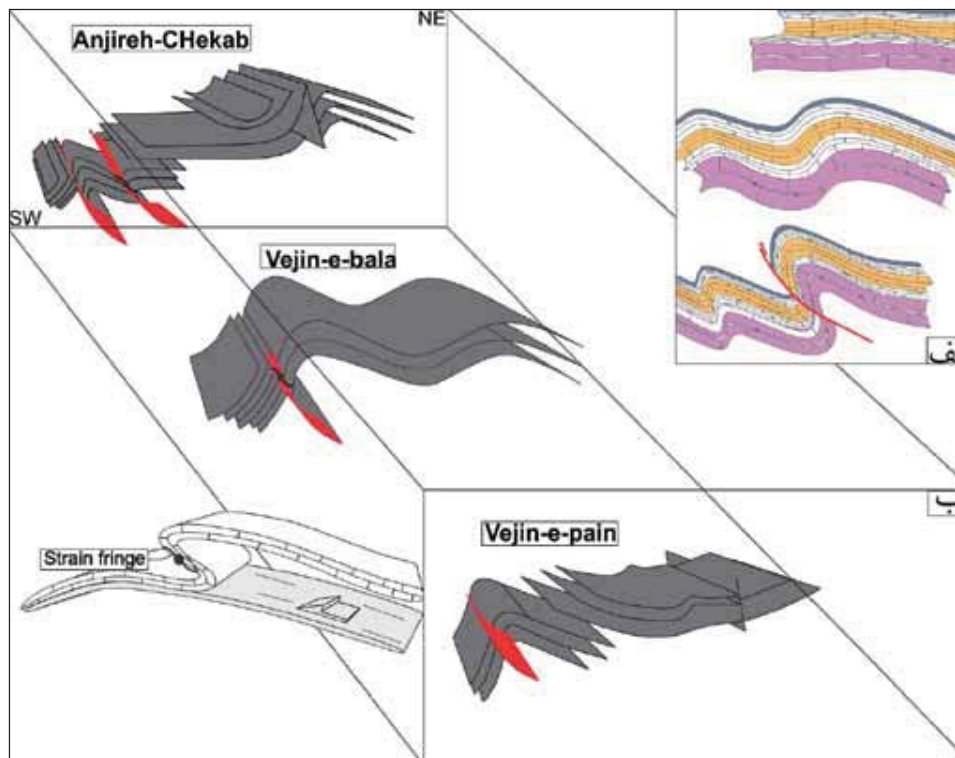
e_{ii}	$\Delta l \cos \alpha$ (cm)	Θ (درجه)	ΔL	L_{sp} (cm)	تعداد افزایش
۰/۱۱	۰/۰۰۹۴	۱۵۰	۰/۰۰۹۸	۰/۰۷۳۲	ΔL_1
۰/۰۸	۰/۰۰۶۳	۲۷۰	۰/۰۰۷۱	۰/۰۷۴۵	ΔL_2
۰/۰۶	۰/۰۰۴۴	۳۴۰	۰/۰۰۵۴	۰/۰۷۴۸	ΔL_3
۰/۰۶	۰/۰۰۱۷	۶۷۰	۰/۰۰۴۵	۰/۰۷۳۱	ΔL_4
۰/۲۶	۰/۰۰۰۳	۸۹۰	۰/۰۱۹۶	۰/۰۷۴۵	ΔL_5
۰/۰۷	۰/۰۰۱۹	۶۹۰	۰/۰۰۵۴	۰/۰۷۵۰	ΔL_6
۰/۰۹	۰/۰۰۶۲	۳۰۰	۰/۰۰۷۲	۰/۰۷۳۵	ΔL_7
۰/۰۵	۰/۰۰۴۲	۶۰	۰/۰۰۴۳	۰/۰۷۳۳	ΔL_8
۰/۰۷	۰/۰۰۵۷	۰	۰/۰۰۵۷	۰/۰۷۵۴	ΔL_9

1. AutoCAD
2. Twinning

علی ناکینی و همکاران



شکل ۱۰. الف) طبقه‌بندی دگرشکلی دوقلویی. چهار نوع دوقلویی که می‌توان براساس این طبقه‌بندی شرایط دمایی را تشخیص داد (Weiss, 1954; Ferril, 1991) ب) دو نمونه از دوقلویی کلسیت در حاشیه اسفالریت‌ها. همانطور که مشاهده می‌شود دوقلویی از نوع ۲ می‌باشند



شکل ۱۱. الف) مراحل نحوه چین خوردگی معادن انجیره-تیران. ب) مدل سه بعدی از برش‌های ساختاری معادن انجیره-تیران و چگونگی قرارگیری حاشیه‌های کرنش در بال برگشته طاقدیس‌های فرادیوارهای

نتیجه‌گیری

برگشته چین و حرکت برشی آن در اثر ایجاد گسل معکوس در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. با استفاده از روش *object centre path* کینماتیک دگرریختی حاشیه‌های کرنش و تغییرات آن بررسی شد. دوقلوبی کلسیت شرایط دمایی دگرشکلی در منطقه را بالاتر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. این مطالعه مشخص می‌کند که با شناسایی حاشیه کرنش و بررسی نحوه رشد، جهت‌گیری و هندسه فیبرها می‌توان به الگوی دگرریختی برشی پی برد و از این رو تغییرات تدریجی جهت تنش‌های وارده را تعیین کرد. حاشیه کرنش کانی‌ها اسفالریت موجود در یال برگشته طاقدیس در منطقه مورد مطالعه، حرکت سمت شمال بر روی بخش جنوبی را نشان می‌دهد که شاهدهی برای روند تکامل طاقدیس برگشته در فرادیواره گسل معکوس می‌باشند (شکل ۱۱- ب). لازم به ذکر است که تعیین الگوی تکوین ساختاری، ارتباط مواد معدنی و جایگاه آن در ساختمان زمین‌شناسی را آسان می‌سازد.

سپاسگزاری

از دانشگاه تربیت مدرس به دلیل امکان انجام برداشت صحرائی این پژوهش قدردانی می‌شود. از معاونت محترم معدن روی تیران در فراهم ساختن امکانات اسکان و همه افرادی که به نحوی ما را در انجام این پژوهش یاری رساندند بویژه از خانم مهندس جابری برای در اختیار گذاشتن اطلاعات مورد نیاز صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- ناکینی، ع.، محجل، م.، یارمحمدی، ع.، ۱۳۹۴. الگوی چین خوردگی Break Thrust Fold در معادن انجیره-وجین تیران، باختر اصفهان. فصلنامه علوم زمین، شماره ۹۵، بهار ۹۴ صفحه ۲۳۱ تا ۲۴۱ (زمین ساخت).

روند کلی ساختاری در منطقه تیران، شمال باختری - جنوب خاوری است. واحدهای آهکی-شیلی کرتاسه زیرین در منطقه، الگوی چین خوردگی مشابهی را به نمایش گذاشته‌اند. این سنگ‌ها در سه معدن در امتداد هم به صورت طاقدیس با محور میل‌دار از جنوب خاور به سمت شمال باختر قرار دارند، که میل محور آنها با مقدار کم^۱ به سمت جنوب‌خاور بوده و در همان جهت میل، طاقدیس جنوب خاوری در زیر دشت پنهان می‌شود. این سه معدن از لحاظ چینه‌شناسی و ساختار شباهت کامل با یکدیگر دارند. در سمت جنوب این سه معدن، لایه‌ها دارای شیب زیاد و یا برگشتگی هستند. در داخل ترانشه‌های عمود بر امتداد محور در یال چین این سه معدن، شیب زیاد و برگشتگی بخوبی قابل مشاهده است. در یال شمال خاوری هر سه معدن، شیب لایه‌ها کم بوده و با چین خوردگی ملایم و در قسمت‌هایی به صورت افقی دیده می‌شوند. تمایل^۲ چین خوردگی در منطقه به سمت جنوب باختری است. برداشت‌های ساختاری از این سه معدن در ساختمان طاقدیس بزرگ با میل کم به سمت جنوب خاور قرار دارند (ناکینی و همکاران، ۱۳۹۴). در امتداد یال جنوبی این طاقدیس گسل معکوس بوجود آمده و واحد K₁ در منطقه لولایی طاقدیس بالا آمده و در فرادیواره گسل برونزد پیدا کرده است.

پیشرفت چین خوردگی، باعث تشکیل طاقدیس‌هایی با زاویه بسته و ناودیس‌هایی با زاویه باز و در نهایت ایجاد گسل‌های معکوس در امتداد یال برگشته شده است (شکل ۱۱- الف). نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که این گسل‌ها در مراحل انتهایی چین خوردگی تشکیل می‌شوند. وجود چرخش در جهت رشد فیبرها نشانگر چرخش محورهای تنش در الگوی دگرریختی غیر هم‌محور در طول تکوین یال

1. Shallow
2. Vergence

- Aerden, D.G.A.M., 1996. The pyrite-type strain fringes from Lourdes (France): indicators of Alpine thrust kinematics in the Pyrenees. *Journal of Structural Geology*, 18, 75-91.
- Ferril, D.A., 1991. Calcite twin width and intensities as metamorphic indicators in natural low-temperature deformation of limestone. *Journal of Structural Geology*, 13, 667-675.
- Koehn, D., Hilgers, C., Bons, P.D., and Passchier, C.W., 2000. Numerical simulation of fibre growth in antitaxial strain fringes. *Journal of Structural Geology*, 22, 1311-1324.
- Koehn, D., Aerden, D.G.A.M., Bons, P.D. and Passchier, C.W., 2001. Computer experiments to investigate complex fibre patterns in natural antitaxial strain fringes. *Journal of Metamorphic Geology*, 19, 217-231.
- Kohen, D., Bons, P.D., Hilgers, C., and Passchier, C.W., 2003. Development of antitaxial strain fringes during non-coaxial deformation: an experimental study. *Journal of Structural Geology* 25:263-275.
- Marshak, S., and Pluijm, B., 2004. *Earth structure an introduction to structural geology and tectonics*. University of Illinois and Michigan, 673.
- Mügge, O., 1928. Ueber die Entstehung faseriger Minerale und ihrer Aggregationsformen. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, 58A, 303-348.
- Pabst, A., 1931. Pressure shadows and the measurement of the orientation in rocks. *Journal of the Mineralogical Society of America*, 16, 55-61.
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 2005. *Microtectonics*. Springer Heidelberg, 366.
- Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1983. *The Techniques of Modern Structural Geology 1, Strain Analysis*. Academic Press London, 307.
- Taraz, H., 1968. Geological report and geology map of Anjere-Tiran area, scale:15000, 20.
- Weiss, L.E., 1954. A study of tectonic style: Structural investigation of a marble quartzite complex in southern California. *University California of Publications Geological Sciences*, 30, 1-102.
- Zahedi, M., 1975. *Geological Map of Najafabad*. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Scale 1:100,000.