

تحلیل هندسی، جنبشی و تعیین متغیرهای واتنش بر پایه رگه‌های کششی سیگموئیدال در پهنه برشی بوشاد (افیولیت‌ملاژ جنوب بیرجند، خاور ایران)

ناصر نعیمی قصابیان^{۱*}، محمدمهدی خطیب^۲، طاهره قاسمی رزوه^۳، حمید نظری^۴ و محمودرضا هیبات^۵

^۱ دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، مشهد، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۳ دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

^۴ استادیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۵ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۰۵

چکیده

پهنه برشی بوشاد (BSZ) با درازای حدود ۴۵ کیلومتر، پهنای ۹/۲ کیلومتر و روند تقریباً خاوری-باختری (N90E) در جنوب بیرجند جای دارد. این پهنه برشی بخش‌هایی از افیولیت‌ملاژ دگرگون شده جنوب بیرجند را زیر تأثیر قرار داده است. اولین مرحله دگرریختی به صورت دگرشکلی چندفازی همزمان با دگرگونی در شرایط دگرریختی شکل‌پذیر، به هنگام بسته شدن کافت خاور ایران و جایگیری افیولیت‌ملاژ بیرجند رخ داده است. فازهای دگرریختی $D_1 - D_2$ مربوط به اولین مرحله دگرشکلی است. فاز دگرریختی D_3 پس از یک دوره رسوب‌گذاری و فرسایش در شرایط شکل‌پذیر-شکنا، همزمان با تشکیل رگه‌های کششی نردبانی است. گسل‌های راستالغز، راندگی و چین‌های مرتبط با گسل در شرایط دگرریختی شکنا وابسته به رخدادهای زمین‌ساختی D_4 ، در اثر تازه‌ترین فاز تنش N55E در منطقه شکل گرفته است. درجه همگرایی این پهنه برشی $R=0/3$ است که نشان از شکل‌گیری آن در یک دستگاه ترافشاری چپ‌گرد از نوع همگرای مایل لغز (Slightly oblique-convergent) دارد.

کلیدواژه‌ها: پهنه برشی بوشاد، افیولیت‌ملاژ بیرجند، متغیرهای واتنش، پهنه برشی ترافشاری، زمین‌درز سیستم.

*نویسنده مسئول: ناصر نعیمی قصابیان

E-mail: naser.naimi@birjand.ac.ir

۱- پیش‌نویس

پهنه برشی بوشاد با موقعیت جغرافیایی $26^{\circ} 04' 04''$ تا $25^{\circ} 26' 59''$ طول خاوری و $32^{\circ} 53' 53''$ تا $32^{\circ} 26' 44''$ عرض شمالی، در رشته‌کوه باقران در جنوب شهر بیرجند (معروف به افیولیت‌ملاژ بیرجند) جای دارد. این پهنه برشی با پهنای متوسط ۹/۲ کیلومتر و جابه‌جایی افقی حدود ۱۰/۳۳ کیلومتر از دید زمین‌ساختی فعال است و تاکنون دچار چرخشی حدود ۴۸ درجه در جهت خلاف عقربه‌های ساعت شده است. دست‌یابی به سیر تحولی و روشن شدن روند تغییر شکل‌های ایجاد شده در این پهنه، در درک فرایند تکامل و بسته شدن حوضه خاور ایران کمک شایانی خواهد کرد. به‌طور کلی فعالیت و چگونگی حرکت گسل بوشاد (راستالغز با مؤلفه شیب‌لغز وارون)، سبب افزایش ارتفاع در بخش مرکزی افیولیت‌ملاژ جنوب بیرجند شده است. پهنه برشی بوشاد را خطیب (۱۳۶۸) با مطالعه و بررسی‌های صحرائی در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود شناسایی کرده و طی ۱۸ سال گذشته این پهنه مورد توجه بسیاری قرار گرفته است (خطیب و زرین‌کوب، ۱۳۷۸ و ۱۳۷۹؛ خلیل‌زاده، ۱۳۸۶؛ Khatib & Zarrinkoub, 2007)؛ ولی تاکنون مطالعه جامعی در مورد بررسی و تحلیل واتنش با استفاده از رگه‌های کششی سیگموئیدال انجام نشده است که در این مقاله سعی شده است به این مهم پرداخته شود.

عناصر ساختاری برداشت شده در صحرا عبارتند از صفحات گسلی، چین‌ها، ریزچین‌ها، خش‌لغزها روی سطوح گسلی، سطوح لایه‌بندی، برگوارگی‌ها، رگه‌ها، ساختارهای پلکانی. افزون بر برداشت ویژگی‌های این عناصر به ارتباط آنها با یکدیگر و ارتباط واحدهای سنگی محل قرارگیری آنها نیز توجه شده است.

۲- موقعیت زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی

پهنه برشی بوشاد (BSZ) با روند کلی خاوری-باختری، یکی از ساختارهای مهم است که افیولیت‌ملاژ جنوب بیرجند را به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم می‌کند. این پهنه برشی حدود ۴۵ کیلومتر طول دارد که روند چیره آن N90E است و به سوی باختری

روند آن N78E می‌شود و جهت شیب پهنه گسلی به سوی شمال است (شکل ۱). رشته‌کوه جنوب بیرجند یکی از شاخه‌های تمایل یافته از پهنه سیستم به درون پهنه لوت است (آقائباتی، ۱۳۸۳). خطیب (۱۳۷۷) افیولیت‌ملاژ جنوب بیرجند را یکی از پایانه‌های زمین‌درز سیستم معرفی می‌کند.

پهنه برشی بوشاد شرایطی مناسب، برای فرایندهای دگرسانی و متاسوماتیزم سنگ‌های مسیر برش را فراهم کرده است. همخوانی هندسی رخنمون‌های دگرسانی با عناصر ساختاری وابسته به پهنه‌برشی، بیانگر نقش کنترلی این ساختارهاست. بیشترین شدت دگرسانی در بخش مرکزی پهنه‌برشی چپ‌گرد بوشاد، دیده می‌شود (خطیب و زرین‌کوب، ۱۳۷۹).

به‌طور کلی واحدهای چینه-زمین‌ساختی پهنه برشی بوشاد را می‌توان به ۳ دسته تقسیم کرد: (۱) آمیزه افیولیتی؛ (۲) رسوبات رخساره فلیشی؛ (۳) سنگ‌های آتشفشانی رسوبی و رسوبات جوان‌تر.

۲-۱. آمیزه افیولیتی

واحدهای آمیزه افیولیتی حدود ۶۰٪ رخنمون‌های سنگی را در ناحیه جنوب بیرجند به خود اختصاص می‌دهد و به دلیل تحمل برش زیاد و ملاژ زمین‌ساختی، نظم بخش‌های مختلف آن از بین رفته است.

۲-۲. رخساره فلیشی

رخساره‌های فلیش در افیولیت‌ملاژ جنوب بیرجند دو گونه هستند:

(۱) فیلش‌های کرتاسه پسین که به صورت تناوبی از شیل و ماسه‌سنگ و شیل سیلیسی، شیل ماسه‌ای با تداخل‌هایی از آهک نازک لایه هستند، در لایه‌لای آمیزه افیولیتی قرار دارند و تحت تأثیر دگرگونی به اسلیت و فلیت تبدیل شده‌اند.

(۲) در حاشیه شمالی رشته‌کوه جنوب بیرجند واحد آمیزه افیولیتی به صورت شیل، ماسه‌سنگ و شیل ماسه‌ای، شیل فلیتی و آهک‌های ماسه‌ای و شیل‌های ارغوانی با مرز گسلی هستند. سن این واحدها پالئوسن-ائوسن است که دچار دگرگونی کمتری شده‌اند.

۲-۳. سنگ‌های آتشفشانی رسوبی و رسوبات جوان تر

سنگ‌های آتشفشانی رسوبی با ترکیب آندزیت، آگلومرا، داسیت، توف داسیتی، مارن، توف اتوسن و سنگ‌های آهکی اتوسن و رسوبات قدیمی‌تر را پوشانده‌اند. این واحد سنگی در بخش جنوبی منطقه گسترش زیادی دارند.

واحد‌های آتشفشانی رسوبی نئوزن به‌صورت ناپیوستگی زاویه‌دار روی واحد‌های قدیمی‌تر در بخش‌های مختلف منطقه قرار گرفته‌اند.

پهنه برشی بوشاد، سنگ‌های مجموعه افیولیت ملانژ کوتاه و سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی رسوبی ترشیری را قطع کرده و سبب ایجاد گسل سنگ‌های کاتاکلاستیک، میولنیت و رگه‌های معدنی شده است. خردشدگی سنگ‌های فوق‌بازیک در این پهنه از یک سو و افزایش دما در اثر برش از سوی دیگر شرایط مناسبی را برای رخداد فرایندهای سرپانتینیته و لیستونیتی شدن فراهم کرده است (خطیب و زرین کوب، ۱۳۸۳). به‌طوری که پهنه‌های سرپانتینیته و لیستونیتی، نشانگر عملکرد پهنه برشی و مشخص‌کننده گستره پهنه برش است. گسل سنگ‌های میولنیتی به‌طور چیره در سرپانتینیته‌ها و گسل سنگ‌های کاتاکلاستیک در دیگر سنگ‌های مسیر برش به وجود آمده‌اند.

۳-۳. مراحل دگرریختی پهنه برشی بوشاد

همانند بیشتر کمربند‌های کوهزایی دنیا، افیولیت‌ملانژ جنوب بیرجند تحت تأثیر مراحل مختلف دگرگونی و دگرشکلی قرار گرفته است. هر مرحله دگرریختی همراه با عناصر ساختاری در مقیاس‌های میکروسکوپی تا ماکروسکوپی است. میزان تأثیر و ویژگی‌های فاز‌های دگرریختی به نوع و وضعیت دگرگونی سنگ‌ها وابسته است. تفکیک این مراحل دگرریختی و بررسی ارتباط آنها با مراحل دگرگونی می‌تواند نقش مهمی در بازسازی تاریخچه زمین‌ساختی و در نتیجه فرگشت ساختاری کوه‌های جنوب بیرجند داشته باشد.

چهار فاز دگرریختی (D_1 - D_4) در منطقه قابل تشخیص است؛ به‌طوری که دگرریختی D_1 - D_2 در یک پهنه برشی شکل پذیر (Ductile) و دگرریختی D_3 در یک پهنه برشی نیمه‌شکنا (Semi-Brittle) و فاز دگرریختی D_4 در یک پهنه برشی شکنا (Brittle) صورت گرفته است.

۳-۱-۱. برگواره اولیه (S_0)

اثرهایی از برگوارگی اولیه، شامل سطوح لایه‌بندی را می‌توان در سنگ‌های رسوبی و مرز میان واحد‌های آتشفشانی و رسوبی در مقیاس ماکروسکوپی و میکروسکوپی شناسایی کرد. یکی از مهم‌ترین شواهد، سیماهای برگواره اولیه در مقیاس رخنمون، تناوب چرت، شیل رادیولردار و آهک پلاژیک در توالی افیولیت ملانژ جنوب بیرجند است. در برخی مواقع برگوارگی S_1 می‌تواند موازی با برگوارگی اولیه باشد (شکل ۲).

۳-۲. الگوی واتنش در اولین و دومین رویداد دگرریختی پیشرونده (D_1 - D_2)

در اولین مرحله دگرریختی، نیروهای زمین‌ساختی سبب بسته شدن کافت خاور ایران و جایگیری افیولیت‌ها روی توریدایت‌ها، جابه‌جایی آنها به‌صورت ورقه‌های راندگی مجزا، دگرگون شدن رسوبات و سنگ‌های اولیه (در اثر افزایش دما و فشار) و تشکیل برگوارگی نسل اول (S_1)، خطوارگی نسل اول (L_1) و چین‌های نسل اول (F_1) در یک پهنه برشی شکل‌پذیر شده است. آثار دگرگونی به‌صورت لایه‌بندی تفریقی، تبلور دوباره، رشد کانی‌های گارنت و استارولیت دیده می‌شود.

برگوارگی نسل اول شامل کوارتز، بیوتیت، مسکوویت، سریسیت و کلریت است که یک برگوارگی سطح محوری وابسته به اولین نسل چین خوردگی در منطقه است. خطوارگی نسل اول نیز از نوع خطوارگی کانی حاصل از انتظام کانی‌های دگرگونی همچون کلریت، اپیدوت، سریسیت و مسکوویت است. پس از دگرریختی مرحله اول (D_1)، سنگ‌های ناحیه به‌طور پیشرونده تحت تأثیر دومین فاز دگرریختی قرار

گرفته‌اند که بیشترین اثر را در منطقه بر جا گذاشته و نافذترین فاز دگرریختی به شمار می‌رود.

آثار دگرریختی دوم را می‌توان به‌صورت چین خوردگی نسل دوم (F_2)، تشکیل برگوارگی میولنیتی (S_2)، خطوارگی دراز شدگی (Stretching lineation) (L_2)، رانده شدن واحد‌های مختلف افیولیتی همراه با میولنیت، تشکیل نوارهای برشی (c' ، s و c)، بودین‌های نوار برشی (Shear band boudins)، پورفیروبلاست‌های شکسته شده، چرخیده و بودین‌شدگی در یک پهنه برشی دید. چین‌های نسل دوم در اثر چرخش و خمش برگوارگی نسل اول در طول پهنه برشی حاصل شده‌اند.

برگواره‌های نسل دوم حاصل دگرریختی پیشرونده و میولنیتی شدن برگواره‌های نسل اول و در بخش‌هایی نیز از نوع برگوارگی سطح محوری چین‌های نسل دوم هستند؛ این برگواره نیز گاه به موازات لایه‌بندی دیده می‌شود (شکل ۳).

۳-۳. الگوی واتنش در سومین رویداد دگرریختی (D_3)

این رویداد با تشکیل پهنه‌های برشی شکل‌پذیر-شکنا، شرایط پسرونده دگرگونی و کاهش شدت دگرریختی در پهنه‌های برشی منطقه همراه بوده است؛ آثار سومین دگرریختی را می‌توان به‌صورت چین خوردگی نسل سوم (F_3)، تشکیل رگه‌های کششی (open gash)، چرخش آنها در اثر پیشرفت دگرشکلی در یک دستگاه برشی ساده و خطوارگی نسل سوم (L_3) دید. چین‌های نسل سوم (F_3) را می‌توان به‌صورت ریزچین و چین خوردگی کنگره‌ای (crenulation fold) در واحد‌های اسلیتی و فیلیتی دید. این چین‌ها بر پایه تقسیم‌بندی Fluty (1964) به‌صورت چین‌هایی با یال موازی یا بسته هستند و پس از دگرگونی درجه پایین (رخساره شست سبز) با سازوکار خمشی-لغزشی به وجود آمده‌اند (شکل‌های ۴ و ۵). رخ کنگره‌ای (s_3) به عنوان عارضه سطح محوری و خطواره نسل سوم (L_3) به عنوان محور این ریزچین‌ها هستند. رخ کنگره‌ای در مناطق کوهزایی که دگرگونی و دگرریختی در حال نقصان است گسترش می‌یابد و معمولاً نتیجه استحکام و توزیع دوباره کانی‌ها، پس از بیشینه شدت دگرگونی هستند (Ramsay & Huber, 1987) و موقعیت هندسی بیشینه صفحات این نوع برگوارگی N80W,52NE است (شکل ۶).

برگه‌های راندگی به عنوان یکی از عناصر ساختاری اصلی این رویداد دگرریختی هستند که موقعیت هندسی آنها در بخش مرکزی پهنه به‌طور متوسط N80W,26NE و در بخش باختری N10W,25SW است. سوی رانش برگه‌ها از شمال-شمال خاوری به سوی جنوب-جنوب باختری است (خطیب و زرین کوب، ۱۳۸۳).

۳-۴. الگوی واتنش در دگرریختی چهارم (D_4)

در طی این مرحله از دگرریختی، در اثر تنش‌های فشاری، نوارهای شکن (Kink bands)، گسل‌های راندگی و راستالغز (شکل ۷)، رخ شکستگی (fracture cleavage) (S_4)، شکستگی‌های برشی وابسته (P , R , R') و رگه‌های کششی نسل جدید تشکیل می‌شوند (شکل ۸).

چین‌هایی که در این مرحله تشکیل می‌شوند در پهنه‌های برشی به نسبت شکننده در ارتباط مستقیم با گسل‌های راندگی شکل گرفته‌اند (شکل‌های ۹ و ۱۰).

خطواره نسل چهارم (L_4) در اثر دو سازوکار به وجود آمده‌اند: یک نوع خش لغز روی صفحات لغزشی، به موازات سوی حرکت اصلی پهنه برش و نوع دیگر از تقاطع کشیدگی کانی‌ها و رخ شکستگی. گسل‌های راندگی حاصل از این رویداد به‌طور متوسط دارای موقعیت N35W,30NE هستند و در اثر عملکرد آنها، بلوک‌های گسلی به وجود آمده از تقاطع شکستگی‌های برشی وابسته روی یکدیگر رانده شده‌اند؛ سوی حرکت راندگی‌ها به‌طور چیره از شمال خاوری به سوی جنوب باختری است.

۴- تحلیل جنبشی پهنه برشی بوشاد

برای تحلیل جنبشی و تعیین سوی برش در پهنه برشی بوشاد از شاخص‌هایی مانند جهت‌یابی برگوارگی، رگه‌های کششی نردبانی و چرخش آنها در یک دستگاه برش ساده، نوارهای برشی s-c و نیز تحلیل کینماتیکی گسل‌های شکننده استفاده شده است.

۴-۱. بر پایه جهت‌یابی برگوارگی

افزون بر همه ساختارهای فرعی که ممکن است در پهنه‌های برشی دیده شود، تقریباً همه پهنه‌های برشی دارای نوعی برگوارگی هستند. با توجه به اینکه برگوارگی پهنه برش را می‌توان موازی سطح XY بیضوی کرنش در نظر گرفت، تمرکز قطب این سطوح می‌تواند سوی بیشینه کوتاه‌شدگی (Z) را نشان دهد. بر پایه شکل تمرکز، قطب برگوارگی‌ها به ترتیب فراوانی ۰۶۱/۳۱، ۰۰۱/۶۵، ۲۸۶/۳۷ و ۳۱۶/۲۸ است که دست کم چهار نسل برگوارگی را نشان می‌دهند (شکل ۱۱).

۴-۲. بر پایه جهت‌یابی رگه‌های کششی نردبانی و سیگموئیدال

رگه‌های نردبانی سیگموئیدال (sigmoidal en echelon veins)، رگه‌هایی هستند که در یک پهنه برش ساده از نوع شکل‌پذیر-شکنا شکل می‌گیرند و نوک آنها در طی دگرخی پیشرونده رشد می‌کند (شکل ۱۲). از آنجا که نوک این رگه‌ها همیشه عمود بر سوی درازشدگی جزئی گسترش می‌یابند و با مرز پهنه برش زاویه α (زاویه میان روند بیشینه تنش و دیواره پهنه برشی) می‌سازند. با مقایسه سوی رشته‌کانی‌ها در میانه و حاشیه می‌توان به میزان چرخش در طی دگرخی پی برد؛ از سوی دیگر رابطه ساده میان زاویه چرخش (ψ) و زاویه‌ای وجود دارد که برگوارگی با سوی پهنه برش می‌سازد (ϕ):

$$\tan 2\phi = \frac{2}{\gamma} \quad (1)$$

بر پایه Karantz (1995) جهت‌یابی اولیه عناصر ساختاری در یک پهنه برش به میزان برش (γ) و درجه همگرایی یا واگرایی (R) (نسبت مؤلفه همگرایی یا واگرایی پهنه برش به مؤلفه راستالغز) بستگی دارد.

با استفاده از روابط و نمودارهای ارائه شده توسط Karantz (1995) (شکل‌های ۱۳ تا ۱۵)، می‌توان دیگر متغیرهای واتنش همچون عرض پهنه برش (α^1) به موازات محور γ ، واتنش قائم یا ستبرشدگی پهنه برش (α) به موازات محور z ، کشیدگی یا کوتاه‌شدگی پهنه برش (S_p) به موازات محور γ (شکل ۱۶)، مقدار محور بزرگ بیضوی واتنش (S_{pmax})، مقدار محور کوچک بیضوی واتنش (S_{pmin}) و نیز نسبت بیضوی واتنش (R') را به دست آورد. با توجه به میزان برش در رگه‌های نردبانی سیگموئیدال، دیگر متغیرهای واتنش به دست آمده است (جدول ۱).

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\gamma}{a^2 + \gamma^2 - 1} \right) \quad (2)$$

$$SH_{max} = (1 - \gamma \tan \phi)^{-0.5} \quad (3)$$

$$SH_{min} = (1 + \gamma \tan \phi)^{-0.5} \quad (4)$$

بر پایه روابط و نمودارهای ارائه شده در بالا و محاسبه روند σ_1 و میزان چرخش با استفاده از رگه‌های کششی دیده شده در بخش‌های مختلف پهنه برشی بوشاد (شکل ۱۷)، به ترتیب از خاور به باختر می‌توان متغیرهای واتنش را در پهنه برشی طبق جدول ۱ به دست آورد.

۴-۳. بر پایه جهت‌یابی رگه‌های کششی و کششی چین خورده

رگه‌های کششی پس از تشکیل در اثر ادامه برش می‌چرخند و در راستای محور کوتاه بیضوی واتنش دچار چین‌خوردگی متقارن و در راستای محور بزرگ بیضوی واتنش دچار کشش و بودین‌شدگی متقارن می‌شوند (Barker, 1990). چنانچه این رگه‌ها در کنار هم باشند می‌توان سوی برش و حتی میزان چرخش را به دست آورد (شکل ۱۸).

۴-۴. بر پایه تحلیل کینماتیکی گسل‌ها

برای تفکیک فازهای تنش دیرین و تجزیه و تحلیل داده‌های لغزشی گسل در پهنه برشی بوشاد، داده‌های برداشت شده در برگزیده واحدهای مختلف سنگی به سن کرتاسه بالایی تا عهد حاضر هستند. ۱۴۸ صفحه لغزش گسلی و خش‌لغزهای مربوط برداشت شده است که تحولات تنش را در واحدهای سنگی در مکان‌های مختلف نشان می‌دهند. بر پایه داده‌های به دست آمده و با روش برگشتی تحلیل لغزش گسل که در آن، موقعیت سطوح لغزش، بردار لغزش، متغیر شکل بیضوی تنش و زاویه اصطکاک درونی توده سنگ دخالت دارد، میدان تنش و جهت‌گیری محورهای اصلی تنش در گستره مورد مطالعه تجزیه و تحلیل شده است. بر پایه تجزیه و تحلیل داده‌های لغزشی گسل، در طی کرتاسه بالایی تا عهد حاضر میدان‌های تنش به شرح زیر در کوه‌های باقران قابل تفکیک هستند (شکل‌های ۱۹ و ۲۰):

۱) فاز تنش با میانگین بیشینه تنش افقی $N270 \pm 10$ و یک رژیم زمین‌ساختی فشاری که تنها در واحدهای پریدوتیت و لیستونیت منطقه ثبت شده و می‌توان گفت مرتبط با بسته شدن کافت و جایگیری افیولیت‌ملائرها در خاور ایران است.

۲) فاز تنش با میانگین بیشینه تنش افقی σ_1 ، $N330 \pm 10$ و یک رژیم زمین‌ساختی ترا فشاری راست‌گرد.

۳) فاز تنش با میانگین بیشینه تنش افقی σ_1 ، $N350 \pm 10$ و یک رژیم زمین‌ساختی فشاری-برشی.

۴) فاز تنش با میانگین بیشینه تنش افقی σ_1 ، $N055 \pm 10$ و یک رژیم زمین‌ساختی ترافشاری چپ‌گرد.

که بر پایه گسلش در نهشته‌های پلیو-کواترنری منطقه و نیز سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌ها، در حال حاضر جدیدترین فاز تنش با میانگین بیشینه تنش افقی را می‌توان به پلیو-کواترنری و ۳ فاز دیگر را به پیش از پلیو-کواترنری نسبت داد که به تدریج در جهت عقربه‌های ساعت چرخیده و به مقدار کنونی خود رسیده است.

۵- نتیجه‌گیری

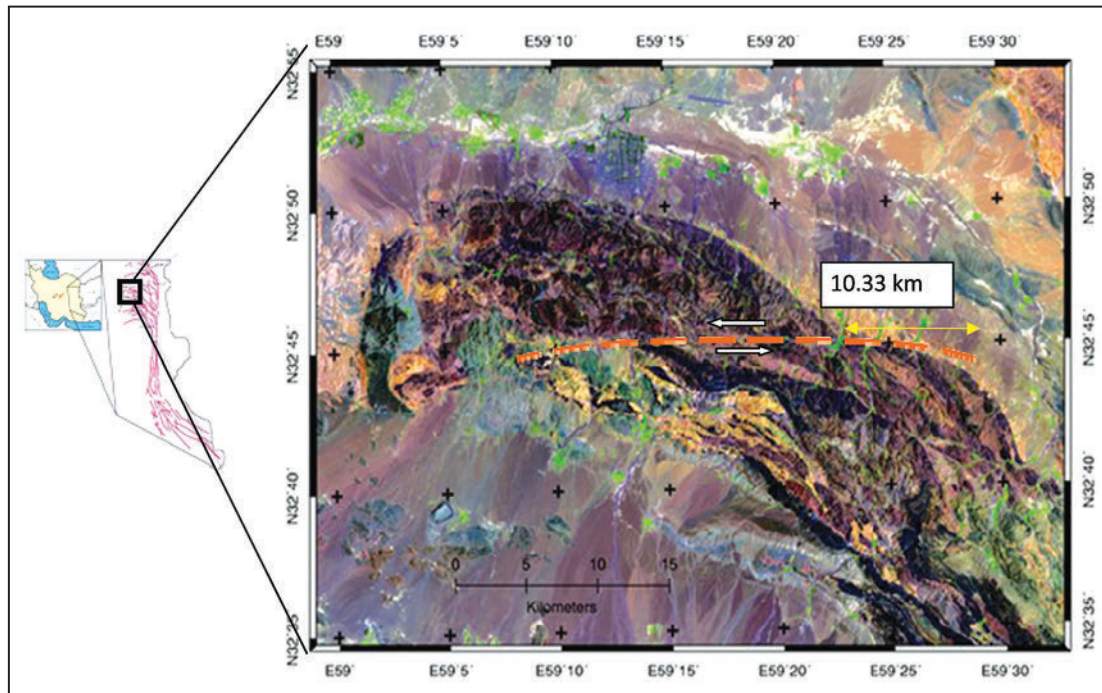
- بر پایه گسلش در نهشته‌های پلیو-کواترنری منطقه و نیز سازوکار ژرفی زمین‌لرزه‌ها، در حال حاضر جدیدترین فاز تنش با میانگین بیشینه تنش افقی σ_1 ، $N055 \pm 10$ و یک رژیم زمین‌ساخت ترافشاری چپ‌گرد است.

- بر پایه تجزیه و تحلیل کینماتیکی، سنگ‌های منطقه دچار ۴ مرحله دگرخی شده‌اند. مراحل اول و دوم به صورت شکل‌پذیر و پیشرونده در اثر فازهای اول و دوم تنش، مرحله سوم دگرخی به صورت نیمه‌شکنا (sub-brittle) در اثر عملکرد فاز سوم تنش و مرحله چهارم دگرخی در اثر جدیدترین فاز تنش به صورت شکننده (brittle) رفتار کرده است.

- بر پایه درجه همگرایی حاصل از روابط و نمودارهای Karantz (1999) پهنه برشی بوشاد، در حال حاضر بیانگر الگوی جنبشی یک پهنه برشی ترافشاری چپ‌گرد متأثر از جدیدترین فاز تنش (فاز چهارم) است. عملکرد این سامانه برشی موجب چرخش‌های درونی در اجزا و ساخت‌های آن در جهت خلاف عقربه‌های ساعت شده است.

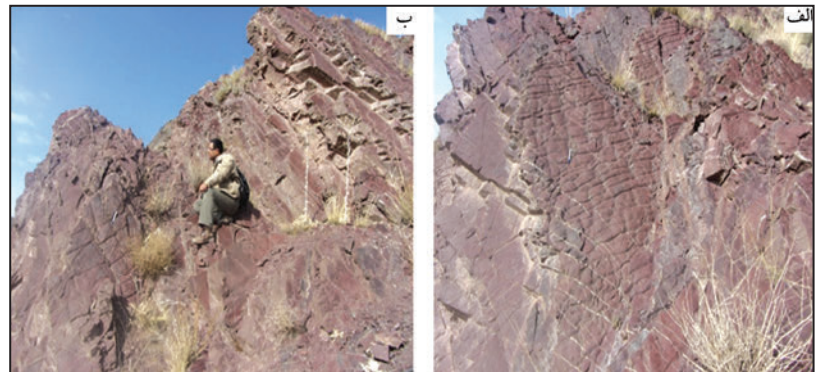
- مطالعه رگه‌های کششی نردبانی و سیگموئیدال نشان‌دهنده بیشینه چرخش ۶۰ تا ۷۴ درجه‌ای بر خلاف جهت عقربه‌های ساعت در بخش میانی و بیانگر پیشرونده بودن فرایند حرکت در این پهنه برشی است.

- بر پایه متغیرهای واتنش به دست آمده بیشترین مقدار برش، چرخش و ایجاد فضای باز و رگه‌های کششی مربوط به بخش میانی پهنه است. به طوری که در بخش مرکزی این پهنه برش، شدت دگرسانی (لیستونیتی، سرپانتینیتی، رودنگیتی) بیشینه است.

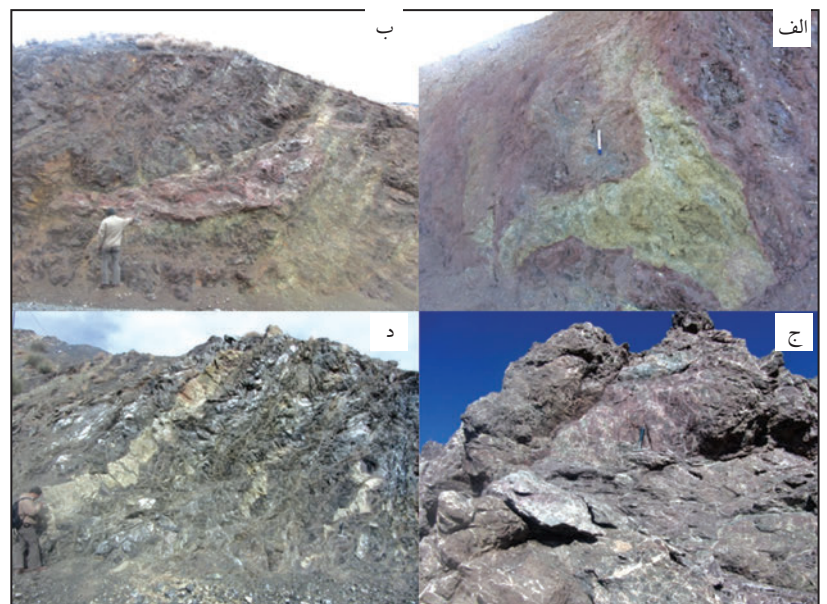


شکل ۱- موقعیت پهنه برشی پوشاد در افیولیت‌مالانژ جنوب بیرجند.

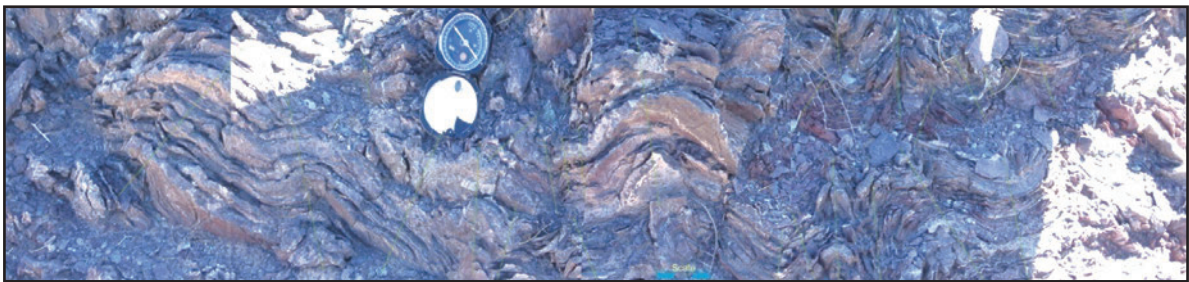
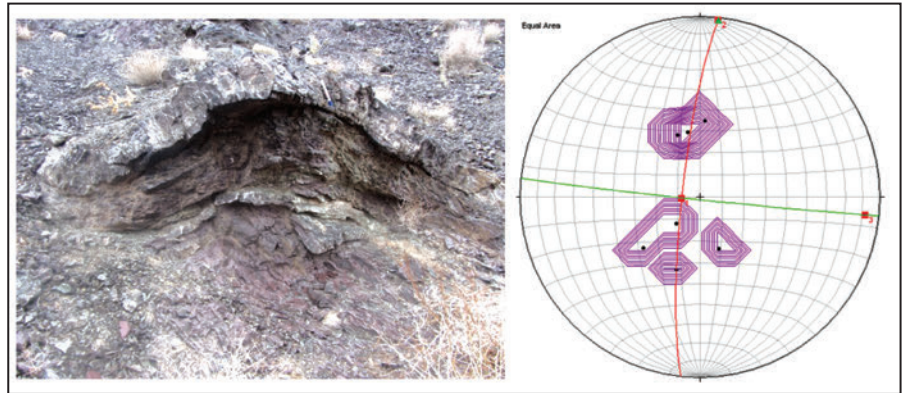
شکل ۲- الف و ب) نماهایی از تناوب چرت و شیل رادیولردار شواهدی از برگوارگی اولیه.



شکل ۳- الف تا د) شواهدی از دگرریختی D_1 - D_2 در مقیاس رخنمون از نوع شکل‌پذیر که به شدت برشی و سرپانتینیزه و میلونیتی شده‌اند.

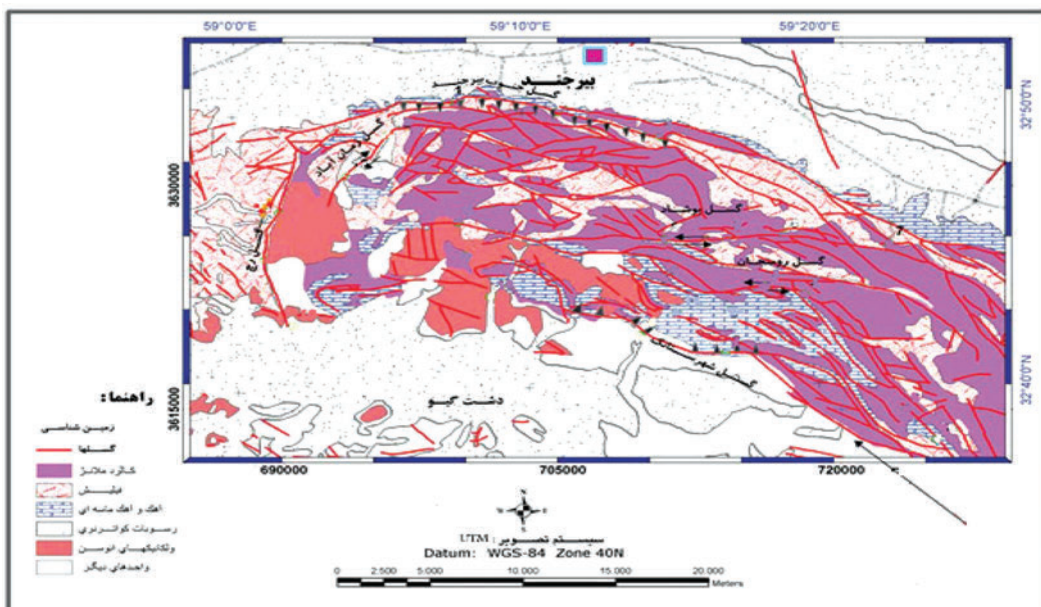
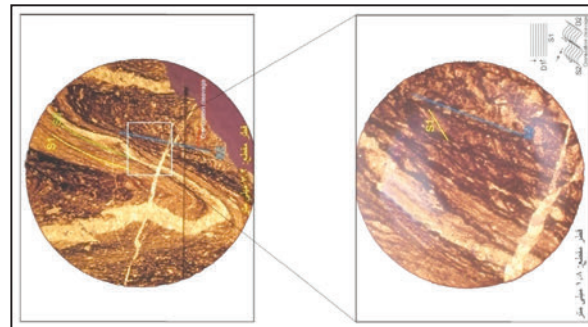


شکل ۴- چین نسل سوم به همراه تصویر استریوگراف چین.



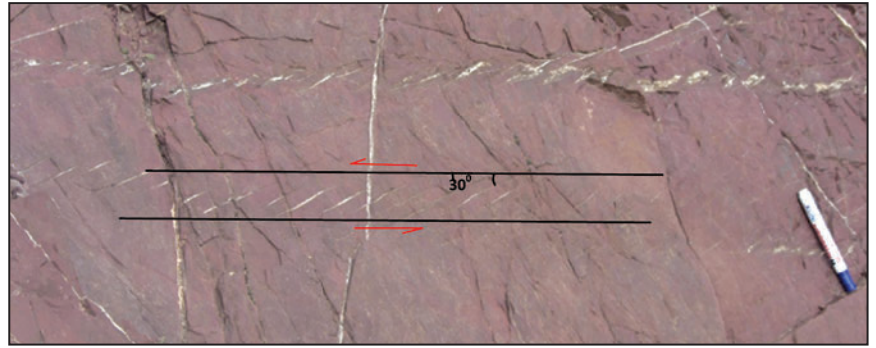
شکل ۵- ریز چین با دو یال بریده شده قائم در واحد شیل ارغوانی.

شکل ۶- کلیواژ کنگره‌ای که در اثر انحلال فشاری همزمان با چین خوردگی در یال چین تشکیل شده است.

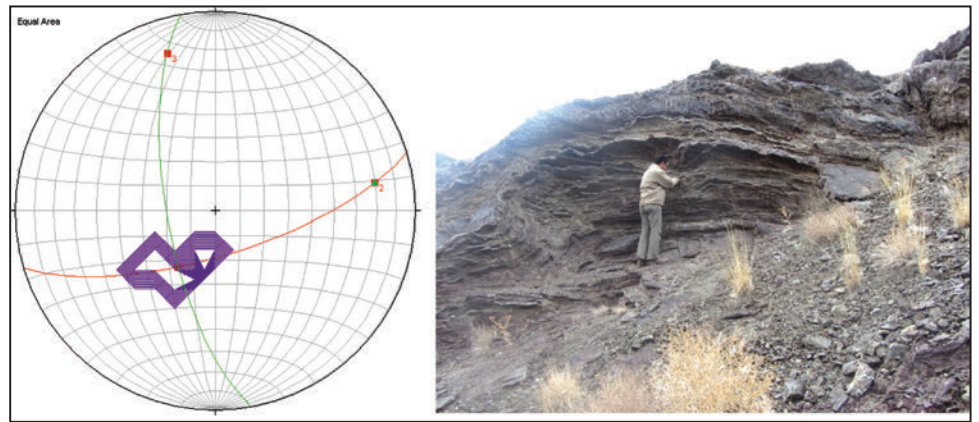


شکل ۷- گسل های اصلی رانده و راستالغز در پهنه بوشاد.

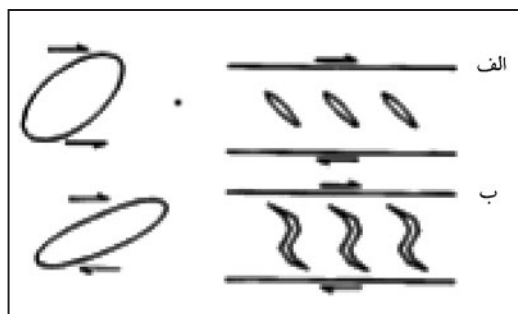
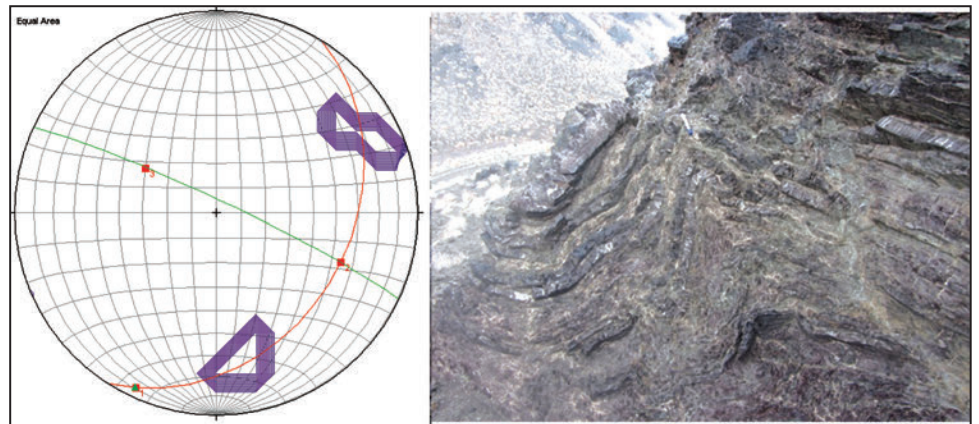
شکل ۸- رگه‌های کششی مرتبط با فاز دگربختی چهارم، رگه‌های کششی نسل چهارم با زاویه تقریباً ۳۰ درجه نسبت به دیواره پهنه برشی تشکیل شده‌اند.



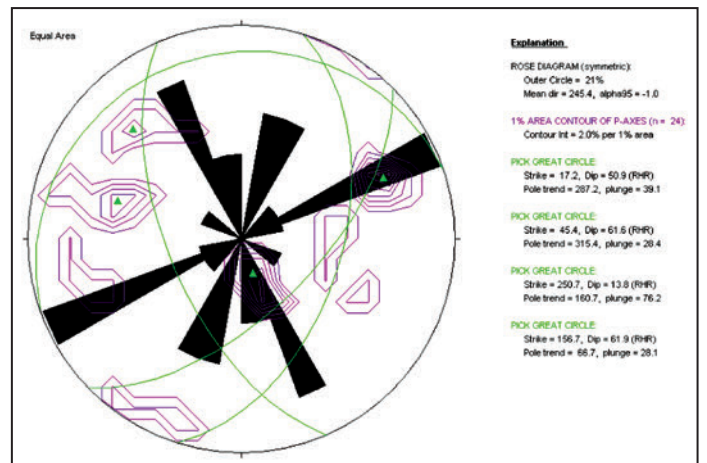
شکل ۹- چین‌خوردگی مرتبط با گسلش در فاز دگربختی چهارم به همراه تصویر استریوگراف چین.



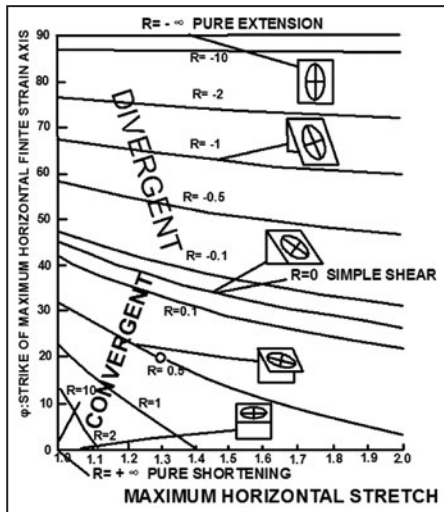
شکل ۱۰- چین‌خوردگی لایه‌ها در فاز دگربختی چهارم به همراه تصویر استریوگراف چین.



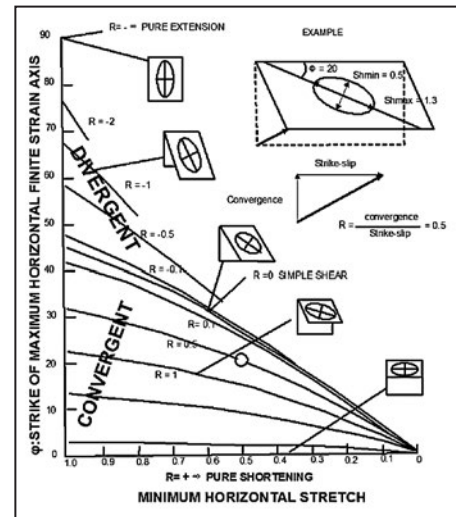
شکل ۱۲- الف) چگونگی تشکیل رگه‌های نردبانی در یک پهنه برشی ساده از نوع شکل‌پذیر- شکنا؛ ب) رشد نوک این رگه‌ها در طی مراحل دگربختی پیشرونده.



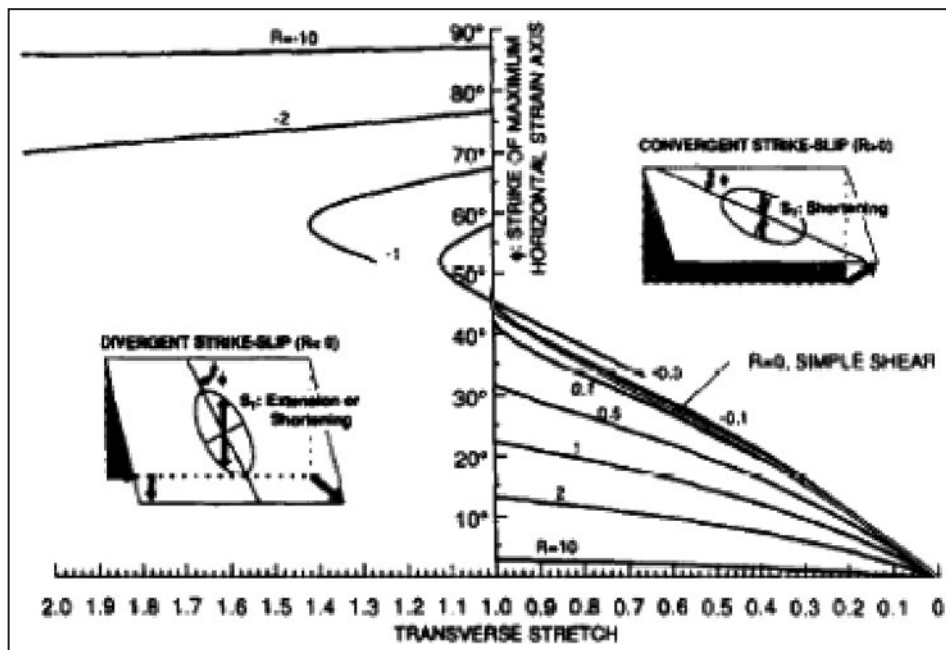
شکل ۱۱- تصویر استریوگراف نسل‌های مختلف بر گوارگی در امتداد پهنه برشی پوشاد.



شکل ۱۴- نمودار برای محاسبه S_H , R , ψ (برگرفته از Krantz (1995)).

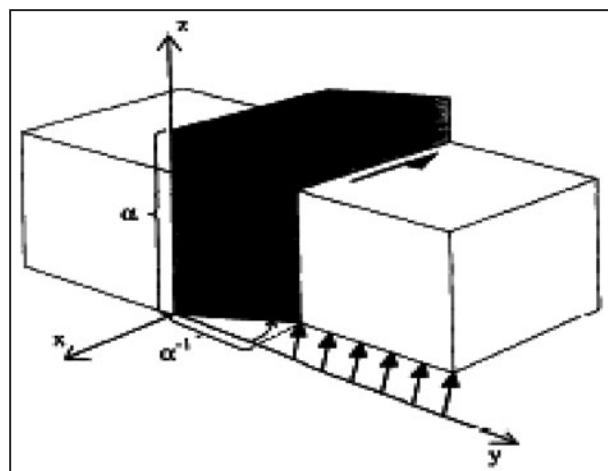


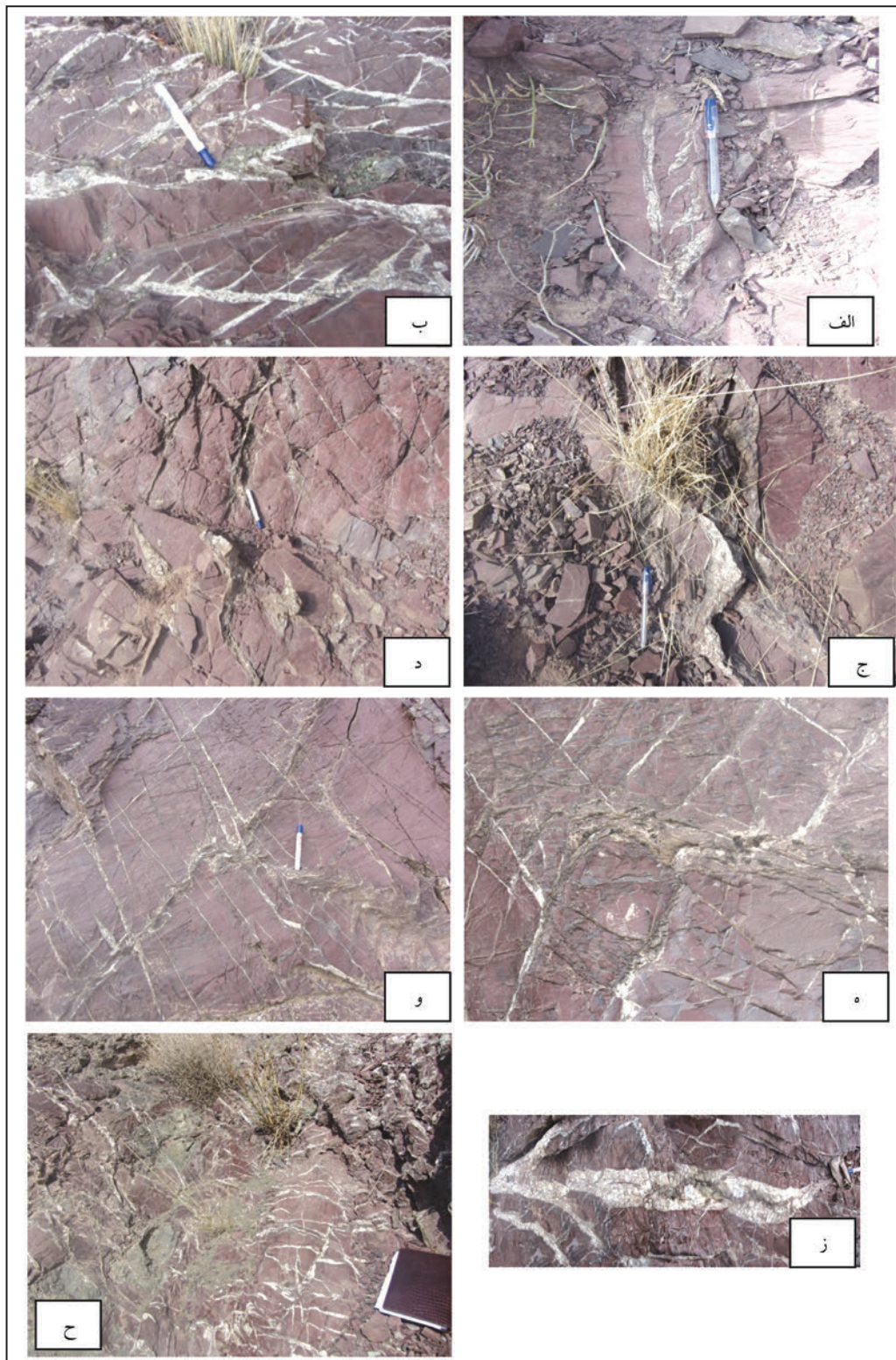
شکل ۱۳- نمودار برای محاسبه S_H , R , ψ (برگرفته از Krantz (1995)).



شکل ۱۵- نمودار برای محاسبه S_T , R , ψ (برگرفته از Krantz (1995)).

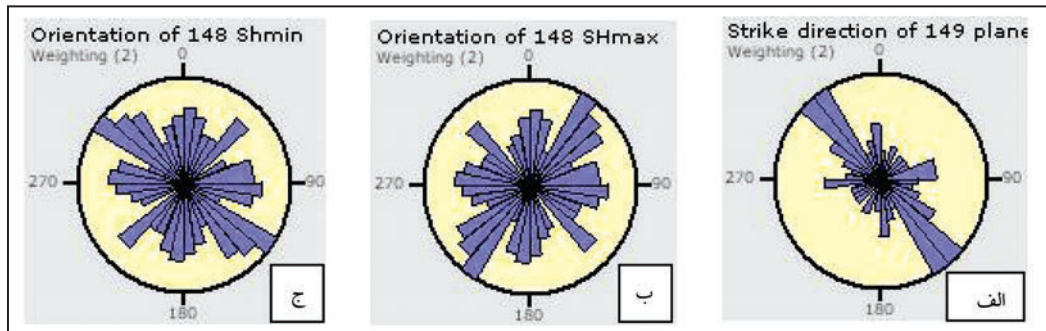
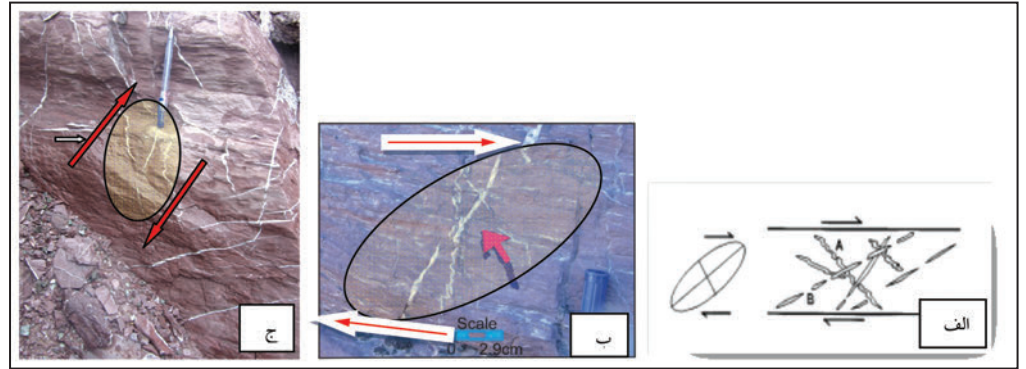
شکل ۱۶- متغیرهای واتنش مربوط به مدل ترافشاری (برگرفته از Sanderson & Marchini (1984))؛ به دست آمده در جدول ۱ (برای اطلاعات بیشتر به متن مراجعه شود).



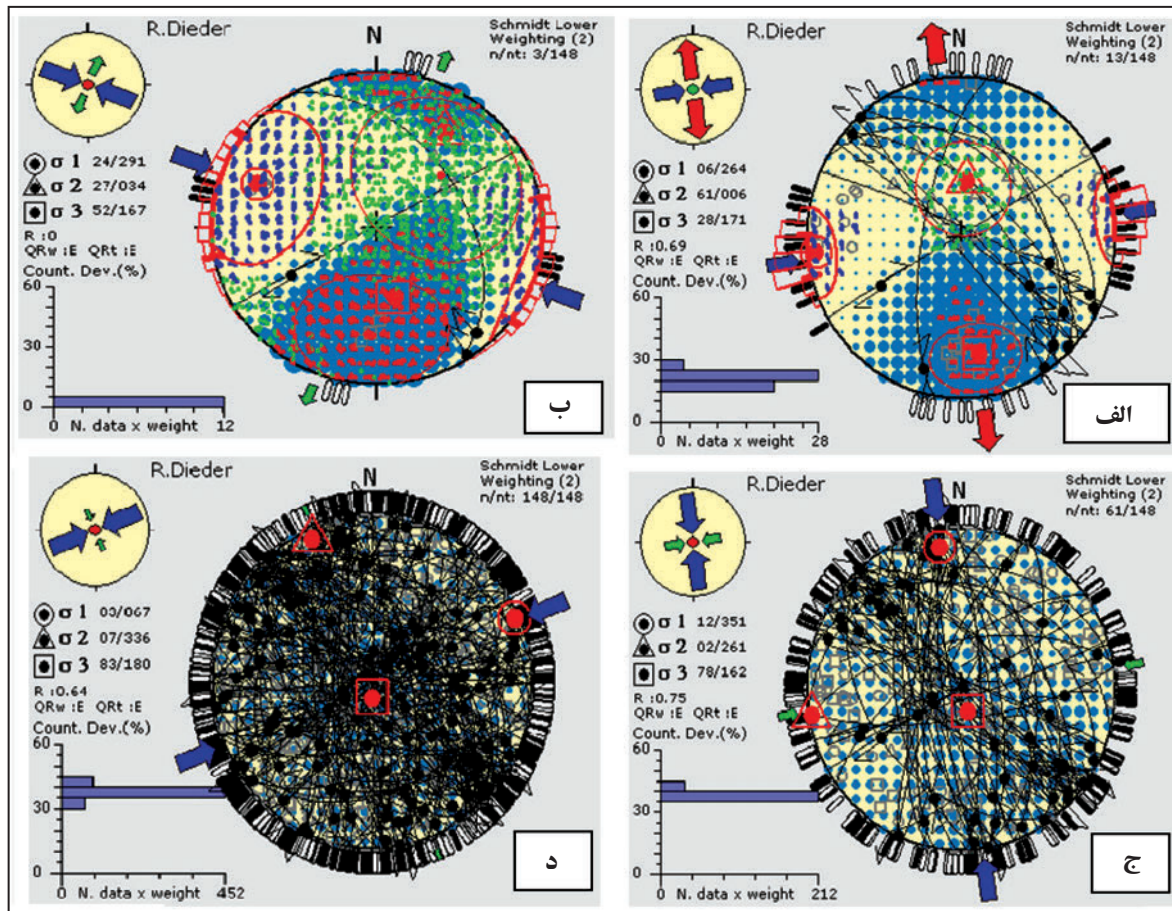


شکل ۱۷- الف تا ح) نماهایی از رگه‌های کششی و تغییر شکل آنها در اثر برش ساده پیشرونده در طی مراحل دگرشکلی سوم و چهارم.

شکل ۱۸- الف) تصویری نمادین از چگونگی شکل‌گیری رگه‌های کششی و تغییر شکل بعدی آنها در طی برش ساده پیشرونده (برگرفته از (Barker (1990)؛ ب و ج) تعیین سوی برش بر پایه جهت‌یابی رگه‌های کششی چین‌خورده و بودین شده در پهنه بوشاد.



شکل ۱۹- الف) نمودار گل‌سرخ روند صفحات گسلی برداشت شده در پهنه برشی بوشاد؛ ب) محورهای تنش بیشینه در پهنه برشی بوشاد؛ ج) محورهای تنش کمینه در پهنه برشی بوشاد.



شکل ۲۰- وضعیت حالت‌های تنش در پهنه برشی بوشاد به ترتیب در: الف) کرتاسه؛ ب و ج) نئوژن- پالئوژن؛ د) پلیو- کواترنری.

جدول ۱- متغیرهای واکنش به دست آمده برای پهنه برشی بوشاد با استفاده از روابط و نمودارهای ارائه شده توسط (Krantz 1995).

σ_1	x	y	ψ	γ	ϕ	$\cotg \phi$	α	α^{-1}	S_T	S_{Hmax}	S_{Hmin}	R= (convergence /strike-slip)	R'= (SH _{max} /SH _{min})
۲۱۰	۵۹/۳۹۸۷	۳۲/۷۴۹۵	۱۰	۰/۱۸	۴۲	۱/۴۷	۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۹۴	۱/۰۷	۰/۸۹	۰/۳	۱/۲۰
۶۰	۵۹/۳۹۷۱	۳۲/۷۴۹۵	۱۳	۰/۲۳	۳۳	۱/۵۱	۱/۰۷	۰/۹۴	۰/۹۱	۱/۰۹	۰/۸۶	۰/۳	۱/۲۶
۴۵	۵۹/۳۵۱۴	۳۲/۷۵۱۶	۱۰	۰/۱۸	۳۴	۱/۴۷	۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۹۴	۱/۰۷	۰/۸۹	۰/۳	۱/۲۰
۱۷۵	۵۹/۳۵۱۱	۳۲/۷۵۱۸	۴۵	۱/۰۰	۲۵	۲/۱۵	۱/۳۰	۰/۷۷	۰/۶۱	۱/۳۷	۰/۵۶	۰/۳	۲/۴۳
۱۳۵	۵۹/۳۵۳۷	۳۲/۷۵۱۱	۶۰-۷۴	۱/۷۳	۱۹	۲/۸۴	۱/۵۲	۰/۶۶	۰/۴۳	۱/۶۰	۰/۴۱	۰/۳	۳/۹۰
۱۹۵	۵۹/۳۵۳۷	۳۲/۷۵۱۱	۱۱	۰/۱۹	۳۴	۱/۴۹	۱/۰۶	۰/۹۴	۰/۹۳	۱/۰۷	۰/۸۸	۰/۳	۱/۲۲
۲۱۰	۵۹/۳۵۳۷	۳۲/۷۵۱۱	۹	۰/۱۶	۳۴	۱/۴۶	۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۹۴	۱/۰۶	۰/۹۰	۰/۳	۱/۱۸
۹۰	۵۹/۳۵۳۶	۳۲/۷۵۱۴	۱۰	۰/۱۸	۳۴	۱/۴۷	۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۹۴	۱/۰۷	۰/۸۹	۰/۳	۱/۲۰
۱۶۵	۵۹/۳۱۹۱	۳۲/۷۵۷۴	۲۰	۰/۳۶	۳۲	۱/۶۲	۱/۱۱	۰/۹۰	۰/۸۶	۱/۱۴	۰/۷۹	۰/۳	۱/۴۳
کل زون			۴۸/۵	۱/۱۳	۲۴	۲/۲۷	۱/۳۴	۰/۷۵	۰/۵۷	۱/۴۱	۰/۵۳	۰/۳	۲/۶۶

کتابنگاری

- آفانیاتی، س.ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- خطیب، م. م.، ۱۳۶۸- تحلیل ساختاری کوه‌های جنوب بیرجند، دانشگاه تربیت مدرس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
- خطیب، م. م.، ۱۳۷۷- هندسه پایانه گسل‌های امتدادلغز (با نگاهی ویژه به گسل‌های خاور ایران)، رساله دکترا، دانشگاه شهید بهشتی، ۲۲۴ ص.
- خطیب، م. م. و زرین کوب، م. ح.، ۱۳۷۸- رفتار پورفیر و کلاست‌ها در میلویت‌های سرپانتینی پهنه برشی بوشاد، سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شیراز، انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه شیراز.
- خطیب، م. م. و زرین کوب، م. ح.، ۱۳۷۹- کنترل‌کننده‌های ساختاری در دگرسانی سنگ‌های واقع در پهنه برشی بوشاد، چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تبریز، انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تبریز.
- خطیب، م. م. و زرین کوب، م. ح.، ۱۳۸۳- تحلیل هندسی و جنبشی بر گواره‌ها و برگه‌های راندگی در افیولیت- ملانژ جنوب بیرجند، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شاهرود، انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- خلیل‌زاده بجنبد، ب.، ۱۳۸۶- تحلیل هندسی و جنبشی پهنه برشی بوشاد (افیولیت ملانژ جنوب بیرجند)، دانشگاه بیرجند، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

References

- Barker, A. J., 1990- Introduction to metamorphic textures and microstructures , Blackie, Glasgow, 163- 178.
- Fleuty, M. J., 1964- The description of folds, proc. Geol. Ass. London, 75, 461-492.
- Khatib, M. M. & Zarrinkoub, M. H., 2007- Mechanism of rotation & deformation of fault rocks in Boushad transpressional shear zone, east of Iran. Geophysical Research Abstracts, 9, 04054.
- Krantz, R. W., 1995- The transpressional strain model applied to strike-slip, oblique-convergent and oblique-divergent deformation Journal of Structural Geology, Vol. 17, No. 8, 1125-1137.
- Ramsay, J. G. & Huber, M., 1987- The Techniques of Modern Structural Geology. V (2) (fold and fractures), 3th Ed, Academic Press limited, p. 391.
- Sanderson, D. J. & Marchini, W. R. D., 1984- Transpression. J. Struct. Geol. 6, 449-458.

Analysis of geometric and kinematic parameters of strain on the open gash veins within the Boushad shear zone (Birjand Ophiolitic Mélange, Eastern Iran)

N. Naimi-ghassabian ^{1*}, M. M. Khatib ², T. Ghasemi Rozveh ³, H. Nazari ⁴ & M. R. Heyhat ⁵

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, University of Birjand, Birjand; Geological Survey of Iran, Mashhad, Iran

² Professor, Department of Geology, University of Birjand, Birjand, Iran

³ Ph.D. Student, Department of Geology, University of Birjand, Birjand, Iran

⁴ Assistant Professor, Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

⁵ Assistant Professor, Department of Geology, University of Birjand, Birjand, Iran

Received: 2015 January 05

Accepted: 2016 January 25

Abstract

The Boushad shear zone (BSZ) is situated in the south of Birjand with at least 45 km length, about 9.2 Km width and strike N90E. The parts of the ophiolite mélange shear zone south of Birjand have changed by this shear zone. The earliest deformation, a polyphasesynmetamorphic deformation which occurred entirely in ductile conditions, D₁ and D₂ deformation phases are related to this deformation. The D₃ deformation affected the area after a period of sedimentation and erosion, Tension gash veins are formed simultaneously. The Strike-slip faults, thrust faults and fault related folds were classified as structures related to the D₄ tectonic event, the most recent phase of conflict in the region N055 ±10E is formed. Degree of convergence of the shear zone is R = 0.3, that indicating the formation of a dextral Transpression (Slightly oblique-convergent).

Keywords: Boushad shear zone, Birjand ophiolitic mélange, Strain parameters, Transpressional shear zone, Sistan suture.

For Persian Version see pages 37 to 46

*Corresponding author: N. Naimi-ghassabian; E-mail: naser.naimi@birjand.ac.ir