

تحلیل تنش دیرین در پهنه برشی پانه‌ای شکل شاه‌آباد (خاور ایران)؛ به منظور مقایسه الگوهای دگرریختی در کواترنری و عهدحاضر

محمد امیر علیمی

دانشجوی دکتری زمین شناسی، گرایش زمین ساخت، دانشگاه بیرجند

محمد مهدی خطیب

استاد، گروه زمین شناسی، دانشگاه بیرجند

تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۹

malimi@ut.ac.ir

چکیده

پهنه برشی شاه‌آباد در منطقه شمال خاور بیرجند یک پهنه برشی راست بر پانه‌ای شکل با حاشیه‌های ناموازی می‌باشد. مقایسه آرایش محورهای تنش در کواترنری با استفاده از تحلیل خش‌لغزهای گسلی و ساختارهای جوان نشان می‌دهد که ساختارهای کواترنری مانند تاقدیس شاه‌آباد، تاقدیس مرک، شکستگی‌های کششی و نوارهای دگرریختی محمدسلطان نیز می‌تواند به علت تعداد مراحل زمین ساختی حداقلی که بر آنها وارد آمده در تعیین تنش‌های محلی مفید باشند. الگوهای تنش در پهنه برشی شاه‌آباد به علت پانه‌ای شکل بودن آن تغییر می‌کند. تنش زمین ساختی ناحیه‌ای وارد بر منطقه که ناشی از حرکت شمال-شمال خاوری بخش‌های مرکزی ایران نسبت به افغانستان می‌باشد، تنش اصلی بوده و از کواترنری تا به حال تغییری نداشته است. همچنین اثر دگرریختی این همگرایی به صورت محلی با شکل‌گیری چین‌های لرزه‌ای شاه‌آباد و لغزش در امتداد گسل‌های راستالغز کوچ و شاه‌آباد نمود دارد.

کلمات کلیدی: پهنه برشی پانه‌ای شکل، تنش دیرین، روش وارون‌سازی چند مرتبه‌ای، کواترنری، خاور ایران.

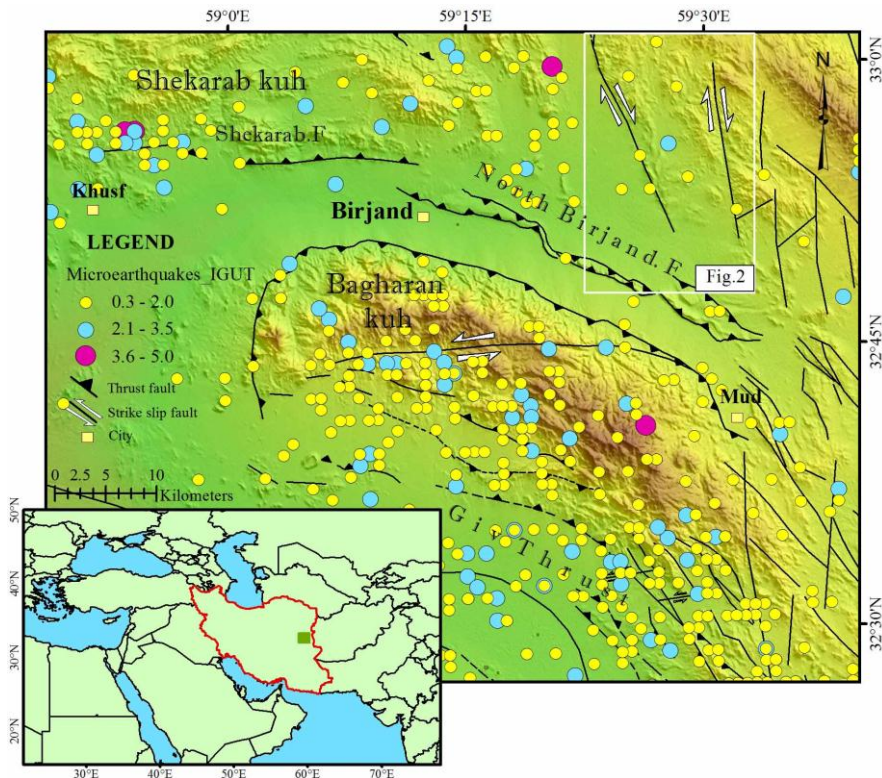
مقدمه

گستره نیز با جابجایی رسوبات آبرفتی در کواترنر پسین، شکل‌گیری پرتگاه گسلی به ارتفاع ۱۰ متر در واحدهای Q_2 در مجاورت روستای شاه‌آباد و نیز بالآمدگی پادگانه‌های آبرفتی و چین‌خوردگی گراول‌های رودخانه‌ای شاخص شده است (Walker and Khatib, 2006). به نظر می‌رسد چین‌خوردگی مذکور (چین شاه‌آباد) نوعی چین‌خوردگی هم‌لرز بوده که عامل اصلی لرزه‌زایی و رشد آن راندگی‌های مدفون باشند (علیمی و خطیب، ۱۳۸۵).

نتایج حاصل از این تحقیق دو کاربرد مهم دارد: الف- با وجود این‌که مطمئن‌ترین روش تعیین تنش دیرین، تحلیل خش‌لغزهای گسلی است با این تحقیق می‌توان میزان اطمینان استفاده از ساختارهای کواترنری را در تعیین جهت تنش در مناطقی که یافتن خش‌لغزهای گسلی دشوار است مشخص نمود و علل تغییرات احتمالی این روش‌ها را بررسی کرد. ب- مقایسه بین ویژگی دگرریختی‌های زمین شناسی و زمین لرزه‌های امروزی نشان می‌دهد که الگوهای زمین ساختی معمولاً در ترشیری پسین، کواترنری پیشین و عهدحاضر تغییر نمی‌کند (Tchalenko and Berberian, 1975). با وجود این در برخی موارد رفتار گسل‌ها در کواترنر پیشین با عهدحاضر متفاوت است (Breberian, 1981). بنابراین با مقایسه جهت تنش دیرین و تنش بدست آمده از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های سده اخیر می‌توان مشخص نمود که آیا جهت اعمال تنش در طول زمان تغییر کرده است؟ اگر جهت تنش در طی کواترنری با جهت تنش امروزی هم‌خوانی ندارد، چگونه تنش وارده بر روندهای گسلی فعال تاثیر می‌گذارد و آیا می‌توان رشد گسل در آینده را پیش‌بینی کرد و یا همین روندها می‌تواند کاندید شکست‌های احتمالی بعدی باشد.

مطالعات نوین زمین شناختی نشان می‌دهد که سنگ‌کره در زمان و مکان در حال فرگشت بوده است از این رو پی‌بردن به جهت تنش‌های دیرین برای تفسیر چگونگی پیدایش ساختارها و مراحل دگرریختی از اهمیت فراوانی برخوردار است. پیش از این بازسازی تنش دیرین بر مبنای تحلیل داده‌های زمین ساخت شکننده با استفاده از گسل‌های هم‌یوغ (Anderson, 1956)، سطوح حرکتی گسل‌ها (Arthaud, 1969)، روش دو وجهی عمود برهم (Angelier and Mechler, 1977)، روش برگشتی (Carey and Brunner, 1974; Angelier, 1990; Ramsey and Lisle, 2000)، روش وارون‌سازی چند مرتبه‌ای (Yamaji, 2000) صورت پذیرفته است. نمونه‌هایی از تعیین وضعیت تنش در ایران نیز با مطالعه تنش نوزمین ساختی لبه جنوبی البرز مرکزی به کمک روش برگشتی (عباسی، ۱۳۸۳)، تعیین الگوهای زمین ساختی از ژوراسیک تا عهدحاضر در حوضه رسوبی کپه-داغ با روش دو وجهی عمود برهم (نواب پور، ۱۳۸۵) و بررسی تغییرات شکل میدان تنش در اطراف حفره‌های فروکش و محل فرار آب از زیر تاج سد لار در البرز مرکزی با بهره‌گیری از روش وارون‌سازی چند مرتبه‌ای (الیاسی، ۱۳۸۸) انجام شده است.

در این تحقیق، تحلیل تنش کواترنری در پهنه برشی پانه‌ای شاه‌آباد، خاور ایران، بررسی شده است. این پهنه برشی در فاصله ۲۵ کیلومتری شمال-خاور بیرجند واقع است که به‌عنوان یکی از سرچشمه‌های لرزه‌ای مهم منطقه شناخته می‌شود. فعالیت امروزی این پهنه با ثبت زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی کوچک تا متوسط مشهود است (شکل ۱). فعالیت نوزمین ساختی در این



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در خاور ایران، گسلش فعال و لرزه خیزی در پیرامون پهنه برشی شاه‌آباد نمایش داده شده است. کانون سطحی زمین لرزه‌های رویداده در بازه زمانی ۲۰۰۶-۲۰۱۴ از فهرست اطلاعاتی موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IGUT) استخراج شده است. کادر سفید رنگ موقعیت شکل ۲ را نشان می‌دهد.

جایگاه زمین شناسی - زمین ساختی منطقه

منطقه مورد مطالعه در شمال‌خاور بیرجند در محدوده عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ}05'$ تا $33^{\circ}50'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $55^{\circ}55'$ تا $59^{\circ}25'$ خاوری بخشی از ایالت ساختاری سیستان می‌باشد. در ایالت سیستان، رژیم فشارشی از کرتاسه فوقانی شروع شده و در پایان پالئوژن با مؤلفه برشی همراه شده است. این رژیم ترافشارشی در کواترن نیز ادامه داشته که باعث ایجاد روندهای ساختاری خاصی شده است (Camp and Griffis, 1982). این ایالت ساختاری متشکل از زنجیره‌ای از گسل‌های راستالغز با آرایش نردبانی بوده، لذا می‌توان این منطقه را متأثر از فرآیندهای حاکم بر سامانه‌های گسلی راستالغز در نظر گرفت (Walker and Jackson, 2004). اکثر پهنه‌های برشی خاور ایران، حاشیه‌های موازی یا تقریباً موازی دارند اما تعدادی از پهنه‌های برشی دارای حاشیه‌های ناموازی یا پانه‌ای شکل می‌باشند.

گسل‌های فعال در اطراف بیرجند ارتباط نزدیکی با ساختارهای زمین شناسی قدیمی دارد بطوری‌که بر روی تصاویر ماهواره‌ای در جنوب و شمال منطقه، چین خوردگی‌های مرتبط با گسلش در واحدهای نئوژن (سامانه چین گیو و شمال بیرجند) و به موازات رشته کوه باقران نمایان شده‌اند (Walker and Khatib, 2006) (شکل ۱). این رشته کوه، مجموعه سنگی زمین ساختی از آمیزه فیولیتی با قطعات سنگ‌کره اقیانوسی و نهشته‌های پلاژیک آذرآوری و آواری از اواخر کرتاسه تا کواترن بوده که تحت تاثیر یکی از اربب-های گسل راستالغز راست‌بر اسماعیل‌آباد-نه باختری قرار گرفته است و روند خاوری-باختری دارد. همچنین در شمال بیرجند، در کوهستان شکراب راندگی‌هایی به موازات کوهستان قدیمی به سوی دشت رشد کرده‌اند. بنابراین با توجه به وجود رخنمون واحدهای کرتاسه تا ترشیر و کواترن در امتداد

روندهای اصلی می‌توان زمان دگرریختی را از کرتاسه تا کواترن دانست که در راستای روندهای اصلی در این منطقه صورت گرفته است. در حالی‌که در مقایسه با گسل‌های فعال اطراف بیرجند، گسل‌های امتدادلغز در پهنه برشی شاه‌آباد ارتباطی با ساختارهای زمین شناسی قدیمی ندارند و تنها رخنمون-هایی از واحدهای نئوژن و کواترنی در راستای این پهنه وجود دارد. از این رو تعیین جهت تنش کواترنی به منظور درک روند فرگشت فرآیند کوهزایی در منطقه ضرورت دارد.

پهنه برشی شاه‌آباد در شمال‌خاور بیرجند یک پهنه برشی پانه‌ای شکل با حاشیه‌های ناموازی، به طول ۲۶-۲۰ و عرض ۱۷-۹ کیلومتر می‌باشد که در سمت باختر توسط گسل راست‌بر شاه‌آباد با روند شمال-باختر- جنوب-خاور (S26E) و در خاور توسط گسل راست‌بر کوچ با روند شمالی- جنوبی (S08E) و شیب به سمت شمال‌خاور محدود گردیده و موجب دگرریختی در منطقه و پیدایش عناصر ساختاری ویژه‌ای شده است (علمی، ۱۳۸۵) (شکل ۲). ساختارها بیشتر به صورت گسل‌های راندگی و چین‌خوردگی در نزدیکی گسل شاه‌آباد نمود دارند که به نظر می‌آید به علت زاویه بیشتر این گسل با روند تنش بیشینه کوتاه‌شدگی در این منطقه نیرومندتر عمل کرده باشد. روند عمومی چین‌ها شمال-باختر- جنوب‌خاور با میل به سمت شمال بوده که به علت اضافه شدن مؤلفه برشی به فشارشی مقداری چرخش را نشان می‌دهد. بطور کلی دگرریختی در پهنه برشی شاه‌آباد سازوکار فشاری-برشی راست‌بر دارد.

روش مطالعه

به منظور شناخت آرایش محورهای تنش در کواترنی، از برقراری ارتباط بین ساختارهای اصلی و جهت‌گیری‌های تنش در گذشته به دو صورت بهره گرفته‌ایم.

تحلیل خط‌خس‌های گسلی

تجزیه و تحلیل خس‌لغزهای گسلی مطمئن‌ترین روش در دستیابی به توزیع تنش دیرین می‌باشد به شرط این‌که تحت تاثیر یک تنش معین ایجاد شده باشند. بنابراین بهره‌گیری از آنها در کواترنری منطقی به نظر می‌رسد و کمترین خطا را در پی خواهد داشت. برای دستیابی به این منظور از صفحات گسلی که نهشته‌های پلیوکواترنری را بریده‌اند و در پرتگاه گسلی شاه‌آباد و در محل عبور گسل در مخروط افکنه‌های جوان قابل رؤیت‌اند استفاده شده است. قابل ذکر این‌که در محدوده عبور گسل در پاره‌ای موارد از قلوه‌سنگ‌ها برای اندازه‌گیری خس‌لغزها و صفحات گسلی بهره برده‌ایم.

توجه به این نکته که الگوهای تنش در طی زمان تغییر می‌کنند و بر روی صفحات گسلی چندین جهت خس‌لغز که نتیجه اثر نسل‌های تنش در منطقه است نقش می‌بندد، حائز اهمیت است. برای رسیدن به نتایج قابل قبول در تحلیل تنش دیرین در منطقه مورد مطالعه خس‌لغزهای را در نظر گرفته‌ایم که در اثر یک تنش معین (کواترنری) ایجاد شده‌اند. این خس‌لغزها را می‌توان در منطقه شاه‌آباد در گسل‌هایی که واحدهای Q_2 را بریده‌اند اندازه‌گیری کرد (شکل‌های ۲ و ۳ و-).

ساختارها

استفاده از خس‌لغزهای گسلی با محدودیت‌هایی همراه است؛ چرا که یافتن آنها در واحدهای شیل و ماسه‌ای سخت نشده به آسانی میسر نیست و تمام بخش‌های پهنه برشی را در بر نمی‌گیرد. به همین دلیل از ساختارهای کششی (رگه‌ها) و فشاری (سطح محوری چین‌ها، شکستگی‌های برشی) کواترنری در تحلیل تنش‌های اصلی بهره گرفته‌ایم. این ساختارها در اثر یک تنش معین ایجاد شده‌اند و شکل آنها ناشی از تنش‌های محلی می‌باشد.

جهت تعیین تنش دیرین، در ایستگاه‌هایی که در درون و بیرون پهنه برشی شاه‌آباد انتخاب شده‌اند و در ادامه ذکر می‌شود، برداشت‌های ساختاری به شیوه مستقیم صحرایی صورت پذیرفته و سپس در نرم افزارهای T-Tecto, Stereowin و Multiple Inverse Method (MIM) پردازش شده است. در برخی ایستگاه‌ها جهت تعیین تنش دیرین، چندین روش با هم مقایسه شده‌اند.

چرخش داده‌ها

در این تحقیق از خس‌لغزهای گسلی کواترنری بهره گرفته‌ایم که در یک بازه زمانی کوتاه زمین شناسی حدود ۲ میلیون سال شکل گرفته‌اند؛ در نتیجه این تاریخ دگرشکلی، پدیده‌هایی مانند چین خوردگی، گسلس و چرخش لایه-ها در ساختارها مشهوداند. بنابراین موقعیت امروزی ساختارهای قابل مشاهده در سطح زمین که نتیجه چنین تاریخ دگرشکلی هستند با موقعیت زمان تشکیل متفاوت است. از آنجایی که همه برداشت‌ها در این تحقیق، از سطح زمین انجام شده و دگرشکلی غالب سنگ‌های منطقه از نوع شکننده بوده است، می‌توان نظریه آندرسن (۱۹۵۱) را برای این بخش از پوسته بالایی معتبر دانست.

در عمل می‌توان با فرض همزمان بودن تشکیل همگی گسل‌ها و بر اساس نظریه آندرسن که تنش اصلی کمینه را در رژیم تنشی فشاری در نزدیکی سطح زمین قائم می‌داند موقعیت محورهای تنش اصلی را به شرایط زمان تشکیل گسل‌ها (تنش کمینه قائم) برگرداند و با کمک گسل‌ها به میزان چرخش در منطقه مورد مطالعه پی برد. برای این منظور، یکایک داده‌های گسلی موجود در منطقه محمدسلطان و شاه‌آباد به اندازه‌ای چرخانده شده که میدان تنش میانگین جدید بدست آمده از موقعیت جدید گسل‌ها دارای تنش اصلی کمینه قائم باشد. محور تنش بیشینه حدود ۱۰-۱۵ درجه چرخش را نشان می‌دهد که می‌توان این میزان را در منطقه تعمیم داد (جدول ۱).

بحث

روش وارون‌سازی چند مرتبه‌ای (MIM)

روش وارون‌سازی چند مرتبه‌ای روشی برای تفکیک مراحل تنش دیرین است. در این روش مقادیر مطلق تنش‌های اصلی بدست نمی‌آید بلکه وضعیت تنش بیان می‌شود. محاسبه شکل بیضوی تنش (Φ) یا همان اختلاف مقادیر تنش اصلی ($\Phi = \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$)، بیانگر وضعیت تنش سه‌بعدی در یک نقطه از جسم است که تاثیر آن در سامانه‌های گسلی توسط پژوهشگران زیادی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است (Bott, 1959; Angelier and mechler, 1977; Armijo et al., 1982; Reches and Dietrich, 1983). تعیین شکل نسبی بیضوی تنش یک مزیت است که در یافتن رژیم تنش کاربرد دارد. رژیم‌های زمین ساختی که بنابر محاسبه Φ بدست می‌آیند توسط محققین یا توصیف شده‌اند (Angelier, 1984) یا به صورت تصویری به‌نمایش در آمده‌اند (Zoback, 1989).

اثر اعمال تنش روی واحدهای سنگی در وضعیت شکننده با آرایه منظمی از خطوط موازی (خط‌خس) در جهت حداکثر تنش برشی ثبت می‌شود (Bott, 1959; Wallace, 1951) که این موضوع از پیش‌فرض‌های مهم در روش وارون‌سازی است.

مبنای روش وارون‌سازی چند مرتبه‌ای بر تفکیک میدان‌های تنش محلی استوار است بر این اساس رژیم‌های تنش فشاری و کششی همزمان نمی‌توانند عمل کنند و تنها می‌توان مناطق کشش و فشارش را به صورت محلی یا در یک سامانه برشی ملاحظه نمود. در این روش، فرضیات مهمی برای یک مدل مکانیکی مناسب در نظر گرفته می‌شود:

الف- جنبش زمین ساختی که باعث حرکت گسل‌ها شده تحت یک تنسور خاص همگن ایجاد شده است. ب- خواص فیزیکی سنگ همگن بوده و جهت خس‌لغزهای طبیعی روی صفحه گسل جهت تنش برشی بیشینه را نشان می‌دهد. ج- جنبش زمین ساختی که موجب شکل‌گیری گسل‌ها شده یک رویداد آنی بوده و صفحات گسلی در حین این رویداد زمین ساختی، دچار هیچ چرخشی نشده‌اند. د- در این رویداد مشخص زمین ساختی هیچ تغییر حجمی در توده سنگ روی نداده است. ه- حرکت یک گسل اثری بر سمت لغزش صفحات گسلی دیگر ندارد.

در این پژوهش جهت تحلیل داده‌ها در نرم‌افزار MIM از دو روش تحلیل تنش دیرین بر پایه خس‌لغزهای گسل اصلی و نیز گسل خوردگی همزمان با چین در لایه‌های کج شده بهره برده‌ایم. این نرم‌افزار قادر به تفکیک داده‌های همگن از ناهمگن است که از چندین نسل تنش در منطقه ایجاد شده‌اند.

به منظور تحلیل وارون‌سازی چند مرتبه‌ای، خس‌لغزهای گسلی برداشت شده از منطقه بایستی پایدار شوند یعنی داده‌هایی که تحت یک تنش معین لغزیده‌اند نمایش داده شوند. در پایدار کردن داده‌ها با روش آزمون و خطا تعداد گسل‌ها را در هر خوشه آن قدر کم و زیاد می‌کنیم تا تغییرات فراسنج-های موقعیت محورهای تنش و شکل میدان تنش در آنها به حداقل ممکن برسد. این کار عملاً با تاثیر عدد K در نرم افزار امکان پذیر است. مقدار K که درجه خوشه‌ای شدن را از نظر آماری نشان می‌دهد می‌تواند بین ۲ تا ۷ متغیر باشد. بنابراین برای هر دسته گسلی پارامتر K مناسب در فضای چهاربعدی (4D) را به نحوی که زیر مجموعه‌ها قابل شناسایی باشد اعمال می‌کنیم (Yamaji, 2000) که مناسب‌ترین حالت برای تحلیل داده‌های مورد مطالعه $k=5$ به دست آمد. روش محاسبه تنسور تنش در این نرم‌افزار روش جستجوی شبکه‌ای است که تنسور عمومی تنش را که بیشترین هماهنگی را با داده‌ها دارد به‌نمایش می‌گذارد. سپس تنش برشی محاسبه شده به واسطه این تنسور با جهت بیشینه برشی اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود و زوایای بین آنها با

محورهای تنش حداکثر و نیز استریوگرام تفکیک مراحل تنش به نمایش در آمده و نتیجه در (جدول ۲) آمده است.

در این ایستگاه سه مرتبه، مرحله تنش تفکیک شد. یکی از مراحل جهت تنش σ_1 را N205 معرفی می کند که تقریباً عمود بر محور چین است.

تحلیل تنش دیرین بر پایه لغزش گسلی در پهنه برشی محمدسلطان (S₂)

در این پهنه برشی واحدهای ماسه سنگی زرد رنگ با میان لایه های شیل دیده می شود که همراه سنگ های ولکانیکی آندزیتی و آذرآوری توف متحمل دگربرختی شده اند و نهشته های کواترنری نیز کج شدگی نشان می دهند. در تعیین وضعیت تنش در این ایستگاه، بر پایه لغزش گسلی و با استفاده از روش وارون سازی چند مرتبه ای سه خوشه شناسایی شد (شکل ۵ ج) که نتیجه در (جدول ۳) آمده است.

الگوهای جنبشی و عناصر ساختاری در پهنه های برشی

پهنه های برشی با دیواره های همگرا یا واگرا می توانند در پایانه پهنه های برشی شکل گیرند. توزیع دگربرختی در انتهای نزدیک شونده این پهنه ها الزاماً ناهمگن بوده و میزان واکنش در آنها بالاست بطوری که دگربرختی به صورت محلی و جزء بندی لغزشی نمود می یابد (Ramsay and Huber, 1987).

توزیع دگربرختی بدان معنی است که قسمتهای مختلف یک پهنه، مسیرهای دگربرختی مختلفی را دنبال می کنند که نتیجه تغییر در نسبت برش ساده به برش محض می باشد (سامانی و همکاران، ۱۳۹۱). در مناطق برشی آرایش های مزدوج و یا منفردی شکل می گیرند که می توان از آنها برای تعیین جایجایی و جهت تنش قدیمی استفاده کرد (Ramsay, 2000). اما نکته اساسی این که بازسازی تنش دیرین در این پهنه ها به علت چرخش ساختارها و نیز تغییر الگوهای تنش بایستی با دقت انجام پذیرد.

عناصر ساختاری در یک دستگاه برشی ساده شامل ساختارهای انقباضی نظیر چین ها، گسل های راندگی یا معکوس به موازات محور بزرگ بیضوی واکنش، ساختارهای انبساطی نظیر شکستگی های کششی و گسل های عادی به موازات محور کوچک، گسل های راستالغز چپبر و راست بر بطور تقریباً متقارن نسبت به محور کشیدگی بیضوی واکنش شکل گرفته اند. فضاهای کششی شکستگی ها با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت برش بوجود می آید. این شکستگی ها در واقع همان شکستگی T در پهنه برشی بوده که فضای کششی دوکی شکلی یا شکستگی های کششی را به وجود می آورند (Wilcox et al., 1973).

آرایش شکستگی های کششی و رگه ها به گونه ای است که σ_1 روی صفحه شکستگی و σ_3 عمود بر آن می باشد. در شکستگی های برشی نیز σ_1 زاویه حدود ۳۰ درجه با صفحه شکستگی می سازد و σ_3 عمود بر آن است. به منظور تعیین تنش دیرین در پهنه برشی پانه ای شاه آباد با استفاده از ساختارهای کواترنری، ایستگاه های زیر انتخاب شده اند.

ایستگاه چشمه میر (S₃)

در این ایستگاه برداشت شکستگی های موجود در واحدهای آبرفتی کواترنری (Q₁) در امتداد گسل شاه آباد صورت گرفت و با کمک نرم افزار T-tectو جهت تنش بیشینه N170 به دست آمد (شکل ۶).

ایستگاه مرک (S₄)

این ایستگاه نیز در امتداد گسل شاه آباد انتخاب و با کمک شکستگی های هم پیوغ که در واحدهای Q₁ اندازه گیری شده اند مقدار σ_1 ، N280 به دست آمد (شکل ۶).

عنوان زاویه نابرازش معرفی می شود که یکی از مشکلاتی است که چنین محاسباتی را با دشواری روبرو می کند. برای حل این مشکل، لازم است تنسور تنش محاسبه شود. اندازه زاویه نابرازش تا ۳۰ درجه قابل قبول بوده و بیش از این مقدار، از محاسبه حذف شده است. بعلاوه توزیع زاویه نابرازش باید از منحنی گوسی نیز پیروی کند که با افزایش زاویه نابرازش شماره کمتری از اندازه گیری ها مورد پذیرش برنامه قرار می گیرد.

در این نرم افزار خوشه ها با رنگ های متفاوتی نمایش داده می شوند. هر رنگ معرف مجموعه ای از داده های آماری است که تحت اثر یک میدان تنش معین لغزیده شده اند (Yamaji, 2000). تجمع این خوشه ها با موقعیت و رنگ یکسان یک مرحله تلقی می شوند. مشخصات نقاط دنباله دار برای استریونت σ_1 بدین صورت است که سر آنها موقعیت محور σ_1 ، سوی دنباله موقعیت محور σ_3 ، طول دم شاخص میل محور σ_2 (بین ۰ تا ۹۰ درجه) را نشان می دهد.

شکل میدان تنش توسط کدهای رنگی مشخص می شود. نوسان شکل میدان تنش بین دو حد نهایی صفر تا یک به ترتیب با رنگ های نیلی تا سرخ مشخص شده است.

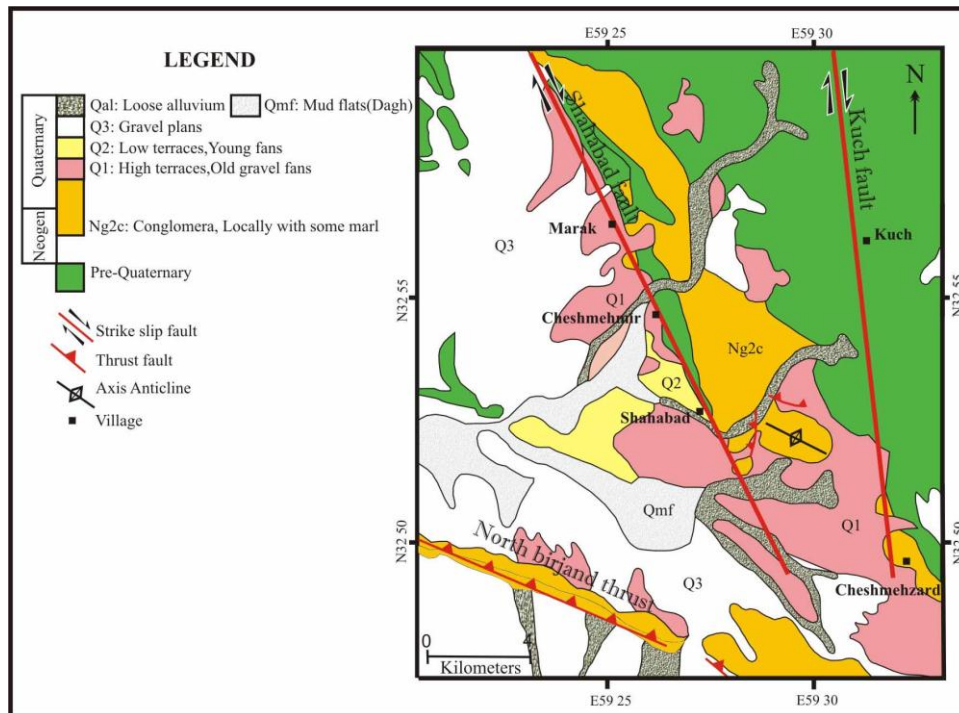
تحلیل تنش دیرین بر پایه لایه های کج شده در تاقدیس شاه آباد

روش تحلیل تنش دیرین بر پایه لایه های کج شده بر اساس این واقعیت استوار است که گسل خوردگی همزمان با چین، مجموعه ای از لغزش های گسلی ناهمگن را ایجاد می کند که امروز برای ما قابل مشاهده است (Yamaji et al., 2000; 2005). در روش مذکور فرض بر این است که تنش دیرین که گسل خوردگی را ایجاد می کند روی لایه های چین خورده بطور یکنواخت عمل می کند. بنابراین مجموعه گسلی را داریم که قبل از چین خوردگی یا همزمان با آن ایجاد شده اند و با برگردان کج شدگی می توانیم نسبت تنش های تفاضلی (Φ) $= \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$ و جهات تنش را بدست آوریم.

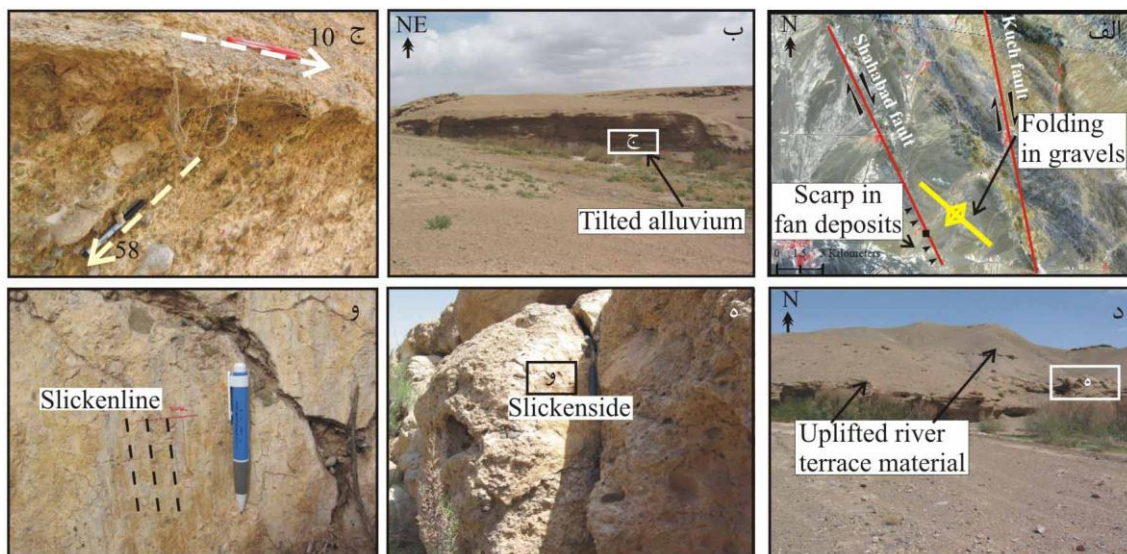
تحلیل تنش دیرین بر پایه لایه های کج شده در ایستگاه تاقدیس شاه آباد بررسی شده است. این چین خوردگی به عنوان یکی از شواهد زمین ریخت شناسی جوان، در رسوبات آبرفتی و سنگ جوش نئوژن، در پهنه برشی شاه آباد توسعه یافته و در تصاویر ماهواره ای Aster به صورت سایه روشن هایی (به علت رخنمون مارن ها در هسته چین) دیده می شود (شکل ۳- الف). کج شدگی گراول های آبرفتی سطحی که در ارتفاع ۵ تا ۷ متری بالای سطح تراز این رودخانه قرار دارند شاهدهی بر بالآمدگی منطقه است (شکل ۳- د).

رخنمون لایه های این تاقدیس و نیز تغییر شیب گراول های جوان کواترنری در نیمرخ رودخانه ای شاه آباد قابل مشاهده است (شکل های ۳- ب و ج) میانگین موقعیت یال باختری این تاقدیس S30E, 23SW و محور آن S54W, 05 می باشد که با استناد به نحوه آرایش قطب لایه بندی ۷۱ داده (پیمایش در جهتی تقریباً عمود بر محور چین) در استریونت از نوع استوانه ای تعیین شده است (شکل ۴- د). چین خوردگی در شاه آباد به صورت سازوکار خمشی لغزشی بین لایه های ماسه سنگی، سنگ جوش نئوژن و نیز گراول های آبرفتی جوان تر عمل کرده است. این لغزش به صورت یک سری گسل های راندگی کوچک بین لایه ای نمود می یابد (شکل ۴- ج) که با برداشت موقعیت هندسی و خش لغز تعداد ۲۵ گسلش معکوس و رسم استریوگرام آنها، صفحه گسلی میانگین منتج شده، گسلی معکوس با موقعیت S47E, 48SW می باشد (شکل ۴- ه) که تقریباً هم امتداد با لایه بندی و در جهت شیب لایه بندی عمل کرده است.

تحلیل تنش دیرین بر پایه لایه های کج شده در چین شاه آباد با کمک نرم افزار MIM انجام شد که در (شکل های ۵- الف و ب) به صورت جهت گیری



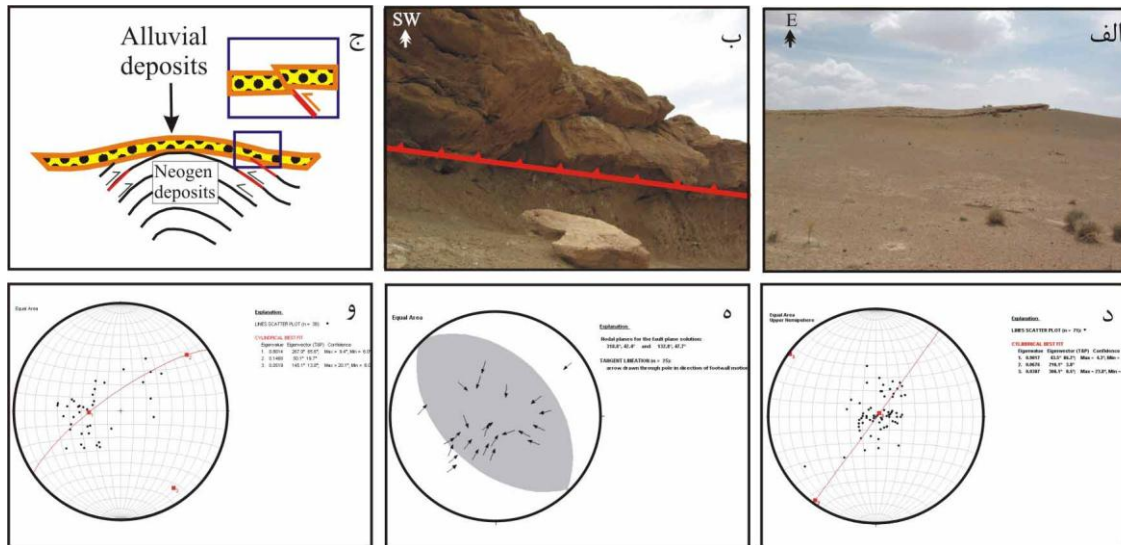
شکل ۲. واحدهای نتوژن و کواترنری، ساختارهای اصلی در پهنه برشی شاه‌آباد نشان داده شده است.



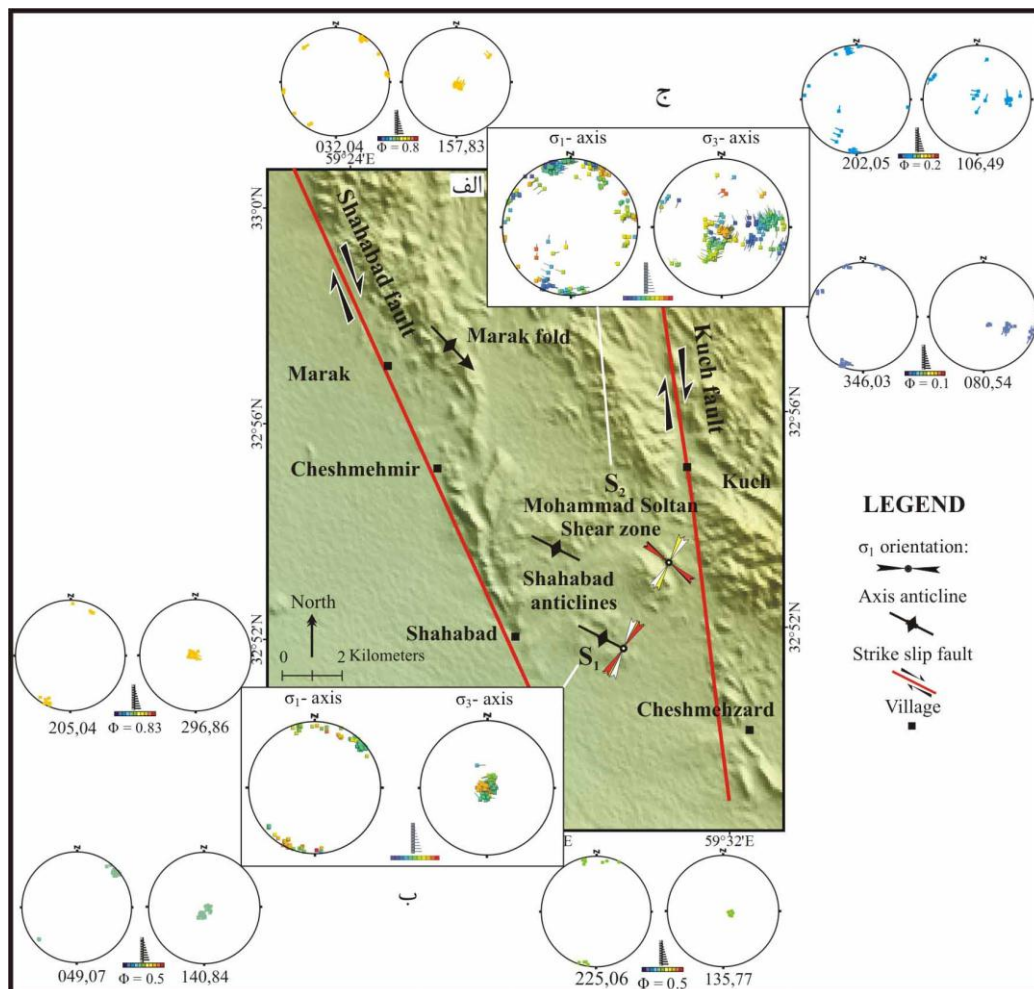
شکل ۳. الف- در تصویر ماهواره‌ای Aster از پهنه برشی شاه‌آباد تاقدیس جوان به صورت سایه روشن و پرتگاه گسلی در محل روستای شاه‌آباد در رسوبات مخروط افکنه‌ای قابل مشاهده هستند. ب- رسوبات آبرفتی کج‌شده در مسیر رودخانه شاه‌آباد. ج- تغییر شیب گراول‌های قدیمی و جوان در امتداد برش رودخانه شاه‌آباد. د- پادگانه‌های رودخانه‌ای بالا آمده و کج شده که بر روی ماسه سنگ‌ها و مارن‌های نتوژن گذاشته شده‌اند. ه- رویه گسلی در واحد های Q2. و- خش‌لغزهای گسلی.

جدول ۱. مشخصات محورهای اصلی تنش با راستا (Az) و زاویه میل (Plg) پیش و پس از چرخش داده‌ها بر اساس نظریه آندرسن مشخص شده اند.

میزان چرخش تنش اصلی کمینه-درجه	پس از چرخش		پیش از چرخش		محدوده
	σ_3 Az/Plg	σ_1 Az/Plg	σ_3 Az/Plg	σ_1 Az/Plg	
۵۸	۱۲۹/۹۰	۲۳۳/۰۰	۰۳۵/۳۲	۲۴۴/۵۵	محمد سلطان
۵۰	۱۱۸/۹۰	۲۲۵/۰۰	۰۴۵/۴۰	۲۴۰/۵۰	شاه‌آباد



شکل ۴. الف- تاقدیس شاه‌آباد در واحدهای نئوژن و کواترنری ب- گسل‌های راندگی کوچک بین لایه‌ای ج- مدل چین‌خوردگی در منطقه شاه‌آباد که رشد چین‌خوردگی با سازوکار خمشی-لغزشی بین لایه‌ها را نشان می‌دهد. مدل فوق بدون مقیاس است. د- استریوگرام داده‌های لایه بندی تاقدیس شاه‌آباد نوع چین را استوانه‌ای و محور آن را S4W,05 نشان می‌دهد. ه- استریوگرام، صفحه گسلی میانگین حاصل از ۲۵ گسل راندگی همراه با چین شاه‌آباد را نشان می‌دهد. و- استریوگرام داده‌های لایه‌بندی تاقدیس مرک در جاده اسدیه نوع چین را استوانه‌ای و محور آن را S35E,14 معرفی می‌کند.



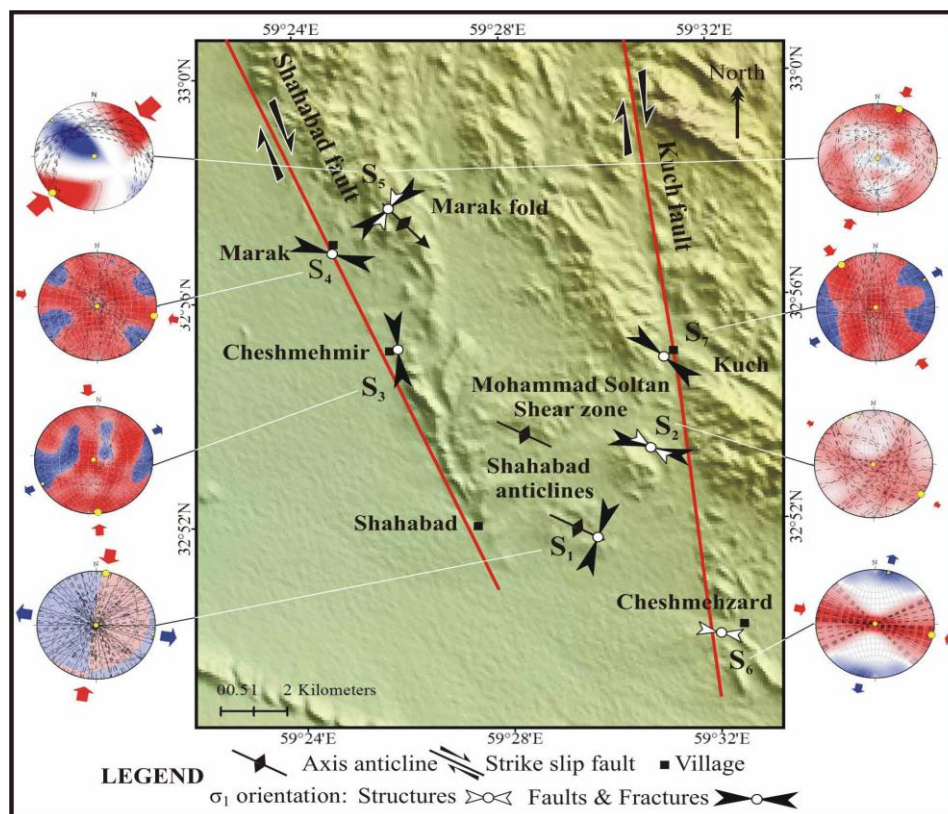
شکل ۵. الف- جهت‌گیری محورهای تنش حداکثر نتیجه شده از تفکیک مراحل تنش در پهنه برشی شاه‌آباد نمایش داده شده است. ب- تفکیک مراحل تنش دیرین بر پایه لایه‌های کج شده در تاقدیس شاه‌آباد ج- تفکیک مراحل تنش دیرین با استفاده از خوش‌لغزهای گسلی در پهنه برشی محمدسلطان.

جدول ۲. تفکیک مراحل تنش بر پایه لایه‌های کچ شده در تاق‌دیس شاه‌آباد به‌روش وارون‌سازی چند مرتبه‌ای مشخص شده‌اند.

خوشه	σ_1 Az/Plg	σ_3 Az/Plg	Φ
۱	۰۴۹/۰۷	۱۴۰/۸۴	۰/۴
۲	۲۲۵/۰۶	۱۳۵/۷۷	۰/۵
۳	۲۰۵/۰۴	۲۹۶/۸۶	۰/۸۳

جدول ۳. تفکیک مراحل تنش بر پایه لغزش گسلی در پهنه برشی محمد سلطان با کمک روش وارون‌سازی چند مرتبه‌ای مشخص شده‌اند.

خوشه	σ_1 Az/Plg	σ_3 Az/Plg	Φ
۱	۳۴۶/۰۳	۰۸۰/۵۴	۰/۱
۲	۲۰۲/۰۵	۱۰۶/۴۹	۰/۲
۳	۰۳۲/۰۴	۱۵۷/۸۳	۰/۸



شکل ۶. جهت‌گیری محورهای تنش حداکثر به‌دست آمده از ساختار و خش‌لغزهای گسلی در پهنه برشی شاه‌آباد نمایش داده شده است. در استریوپلات‌های نمایش داده شده، وضعیت محورهای تنش و جهات حداکثر فشارش و کشش در امتداد گسل‌های کوچ و شاه‌آباد با کمک نرم افزار T-Tecto بدست آمده است.



شکل ۷. الف- شکستگی‌های کششی در واحدهای کواترنری در پهنه برشی محمدسلطان که با کلسیت پر شده‌اند. ب- باندهای دگرریختی در ایستگاه چشمه زرد ج- باز شدگی‌های کششی در واحدهای نئوژن در پهنه برشی محمدسلطان که به‌منظور تعیین سوی برش و جهت محور تنش حداکثر استفاده شده است.

ایستگاه تاقدیس مرک (S₅)

در مسیر جاده مرک به اسدآباد تاقدیس مرک در واحدهای سنگ جوش نئوژن-کواترنری وجود دارد که پس از اندازه‌گیری لایه‌بندی استریوپلات آن رسم شد (شکل ۴-۵). چین از نوع استوانه‌ای و محور چین N35E, 14 به‌دست آمد. با کمک شکستگی‌های برداشت شده همراه این چین و لایه‌بندی، جهت σ_1 229-202 N می‌باشد که تقریباً عمود بر محور چین است (شکل ۶).

ایستگاه چشمه زرد (S₆)

در این ایستگاه که در امتداد گسل کوچ انتخاب گردیده است باندهای دگرریختی در مجموعه‌های هم‌یوغ در واحدهای نئوژن شکل گرفته‌اند (شکل ۷-ب). باندهای دگرریختی نوع خاصی از شکستگی‌های برشی هستند و در پهنه‌های برشی یافت می‌شوند که با کمک آنها جهت تنش حداکثر N100 بدست آمد (شکل ۶).

ایستگاه کوچ (S₇)

گسل کوچ، نوعی گسل امتدادلغز راست‌بر به طول ۲۴ کیلومتر می‌باشد که دیواره خاوری پهنه برشی شاه‌آباد را تشکیل می‌دهد و واحدهای کواترنری را تحت تاثیر فعالیت خود قرار داده است. در این ایستگاه با استفاده از شکستگی‌های برشی جهت تنش بیشینه N323 بدست آمد (شکل ۶).

ایستگاه پهنه برشی محمدسلطان (S₂)

در پهنه‌های برشی شکننده-شکل‌پذیر آرایش رگه‌ای نردبانی شکلی دیده می‌شود که این شکستگی‌ها توسط کلسیت پر شده‌اند و به بازشدگی‌های کششی معروفند. این شکستگی‌ها نشان از سازوکار دگرریختی شکننده دارند که در عمق کمی از سطح زمین تشکیل شده‌اند و با کمک آنها می‌توان راستای پهنه برشی و جهت حداکثر تنش را بدست آورد (شکل ۷-ج).

برای تعیین وضعیت تنش در این پهنه از عناصر ساختاری کششی استفاده شده است (شکل ۷-الف). جهت فشارش با استفاده از شکستگی‌های کششی N305 بدست آمد (شکل ۶).

بررسی وضعیت تنش در تحلیل تنش های محلی منطقه

به‌منظور تعیین تنش دیرین در پهنه برشی پانه‌ای شاه‌آباد از خش‌لغزهای گسلی و نیز ساختارهایی چون چین‌های با آرایش نردبانی، رگه‌های کششی و شکستگی‌های برشی، در واحدهای کواترنری، استفاده شده که نتایج بدست آمده در (جدول ۴) خلاصه شده است.

در ایستگاه شاه‌آباد راستای تنش دیرین با استفاده از خش‌لغز گسلی و ساختار، اختلاف ۲۰-۱۰ درجه را نشان می‌دهد که با موضوعیت چرخش عناصر ساختاری در پهنه برشی قابل توجیه است. به‌علت جوان بودن تاقدیس شاه‌آباد میزان این چرخش زیاد نیست و فاکتور قابل اعتمادی در تعیین وضعیت تنش محلی می‌باشد.

این مورد را می‌توان در چین‌خوردگی جاده اسدیه نیز بررسی کرد. در این ایستگاه نتایج به‌دست آمده از خش‌لغز گسلی و ساختار انطباق خوبی دارند. در ایستگاه محمدسلطان مراحل تنش بدست آمده گویای دو جهت فشارش کلی NE-SW و NW-SE می‌باشند.

الگوهای دگرریختی در پهنه‌های برشی با دیواره‌های ناموازی به‌وسیله آزمایشات تجربی بررسی شده است (Mandal et al., 2002). مطالعات نشان می‌دهد که بیضی واکنش در نقاط مختلف این پهنه‌ها وضعیت متفاوتی دارند و این الگو نسبت به پهنه‌های برشی با دیواره‌های موازی پیچیده‌تر است چرا که عوامل مختلفی نظیر موافق یا مخالف بودن وضعیت دیواره‌ها نسبت به جهت

حرکت دیواره (راست‌بر یا چپ‌بر) و نیز زاویه‌ای که دیواره‌های پهنه پانه‌ای با یکدیگر می‌سازند در شکل‌گیری این الگوها موثرند (شکل ۸-الف).

بررسی خط‌گذرهای تنش وارده بر پهنه‌های برشی پانه‌ای شکل نشان می‌دهد که روندهای تنش در نقاط مختلف این پهنه‌ها متفاوت بوده و در محل دیواره‌های نزدیک شونده از پیچیدگی بیشتری برخوردار است (شکل ۸-ب).

روندهای تنش های زمین ساختی بر اساس سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های خاور ایران، دو مرحله تنش فشارشی N216 و N339 را نشان می‌دهد (شجاع طاهری و صادقی، ۱۳۸۵) (شکل‌های ۹ الف و ب).

مراحل تنش بر پایه ساختار و خش‌لغزهای گسلی در منطقه مورد مطالعه همخوانی خوبی با مراحل تنش به‌دست آمده از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های ثبت شده در خاور ایران دارد (شکل ۹-ج). جهت NE-SW با جهت تنش زمین ساختی ناحیه‌ای و با همگرایی کنده‌های لوت و هلمند هماهنگی دارد. جهت NW-SE مربوط به حرکات زمین ساختی محلی می‌باشد چرا که توزیع تنش در پهنه‌های برشی پانه‌ای به‌صورت ناهمگن بوده و در نتیجه میادین تنش در بخش‌های نزدیک شونده و دور شونده، در حاشیه‌های گسلی دیواره‌ها و نیز درون این پهنه‌ها با یکدیگر متفاوتند (شکل ۹-ب). این امر اختلاف نتایج به‌دست آمده از چین‌خوردگی کواترنری در دو ایستگاه شاه‌آباد و جاده اسدیه را توجیه می‌کند. این تغییر جهت تنش را می‌توان به جزءبندی واکنش نسبت داد. تنش زمین ساختی ناحیه‌ای وارد بر منطقه که ناشی از حرکت NNE بخش‌های مرکزی ایران نسبت به افغانستان می‌باشد (Vernant et al., 2004) تنش اصلی بوده اما دگرریختی توزیع شده، در مناطقی به‌صورت راستالغز (گسل‌های شاه‌آباد و کوچ) و در مناطق دیگر به‌صورت رانندگی عمل کرده است.

در امتداد گسل‌های شاه‌آباد و کوچ جهت تنش، به‌علت تغییر الگوهای تنش، متغیر است و تنش وارده بر منطقه به‌صورت دگرریختی‌های محلی نمود می‌یابد که ساختارهایی نظیر چین‌ها و گسل‌ها عامل این دگرریختی‌ها شمرده می‌شوند.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار، با استفاده از خش‌لغزهای گسلی و سایر ساختارهای موجود، وضعیت‌های تنش دیرین در پهنه برشی پانه‌ای شاه‌آباد در محدوده زمانی کواترنری بررسی شد و نتیجه این‌که در صورت عدم مشاهده خش‌لغز گسلی، دیگر ساختارها می‌توانند ابزار مناسبی جهت تعیین وضعیت تنش به‌شمار روند. این موضوع در تاقدیس‌های شاه‌آباد، مرک و پهنه برشی محمد-سلطان با دسترسی به هر دو روش امکان پذیر بوده است.

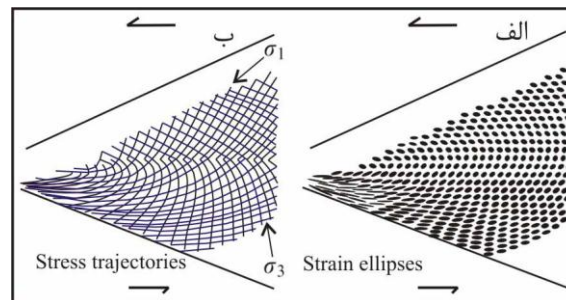
مقایسه مراحل تنش به‌دست آمده در این تحقیق با نتایج حاصله از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های خاور ایران نشان می‌دهد که موقعیت تنش زمین ساختی ناحیه‌ای وارد بر منطقه شمال‌خاور بیرجند، از کواترنری تا به‌حال تغییر چندانی نداشته و توزیع تنش به‌صورت لغزش یا خزش رخ داده است. بنابر این مستهلک شدن انرژی وارد بر منطقه در راستای سطوح ضعف موجود و چین‌های لرزه‌ای صورت می‌گیرد و می‌توان در مطالعات تحلیل خطر زمین‌لرزه، این پهنه برشی را به‌عنوان سرچشمه لرزه‌زای خطی و مستعد برای ایجاد رویدادهای لرزه‌ای آینده در راستای گسل‌های امتدادلغز و رانندگی‌های پنهان در نظر گرفت.

سپاسگزاری

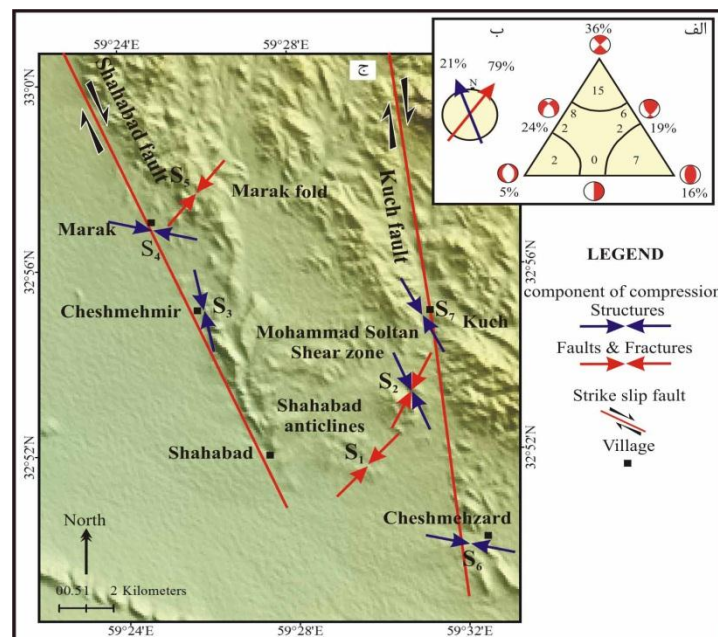
بدین‌وسیله از گروه زمین شناسی دانشگاه بیرجند که امکانات این پژوهش را فراهم آوردند و نیز از همراهی آقای رضا پیلهور در بازدیدهای صحرائی تشکر می‌شود.

جدول ۴. جهت فشارش بدست آمده از خش لغزهای گسلی و ساختار در پهنه برشی شاه‌آباد مشخص شده اند..

جهت فشارش AZ	روش تعیین تنش دیرین		نشانه	ایستگاه
	ساختار	خش لغز گسلی		
۲۰۵-۲۳۰		لایه های کج شده (MIM)	S ₁	شاه آباد
۱۹۵-۲۱۰	محور تاقدیس شاه آباد			
۲۰۰-۲۱۰-۳۴۰		خش لغز گسلی (MIM)	S ₂	محمد سلطان
۳۰۵	شکستگی های کششی			
۱۷۰	شکستگی های برشی		S ₃	چشمه میر
۲۸۰	شکستگی های برشی		S ₄	مرک
۲۰۲	شکستگی های برشی		S ₅	جاده اسدیه
۲۲۵	محور تاقدیس مرک			
۲۲۹		لایه های کج شده		
۱۰۰	باندهای دگرریختی		S ₆	چشمه زرد
۳۲۳	شکستگی های برشی		S ₇	کوج



شکل ۸. الف- توزیع بیضی‌های واتنش در پهنه برشی پانه‌ای (Mandal et al., 2002). ب- خط‌گذرهای تنش رسم شده در پهنه برشی الگوی الف.



شکل ۹. الف- نمودار مثلثی فرولیک (Frohlich, 1992) توزیع سازوکارهای راستالغز، شیب‌لغز، راستالغز مایل و شیب‌لغز مایل، با استفاده از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های ثبت شده در خاور ایران، را نشان می‌دهد. اعداد داخل مثلث تعداد و اعداد خارج مثلث درصد هر نوع سازوکار را مشخص می‌کنند. ب- میانگین دو روند غالب تنش فشارشی در خاور ایران به همراه درصد آنها، با استفاده از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های ثبت شده در خاور ایران، بدست آمده است (شجاع طاهری و صادقی، ۱۳۸۵). ج- بردارهای فشارشی بدست آمده از ساختار و خش-لغزهای گسلی در پهنه برشی شاه‌آباد نشان داده شده است که همخوانی خوبی با مراحل تنش بدست آمده از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های ثبت شده در خاور ایران دارد.

منابع

- الیاسی. م، ۱۳۸۸، تحلیل تنش دیرین در اطراف سد لار (البرز مرکزی) به منظور شناخت ساختارهای موثر در فرار آب، مجله فیزیک زمین و فضا، شماره ۳۵، ص ۱۷-۳۰. نواب پور. پ، ۱۳۸۵، پیش درآمدی بر آرایش تنش‌های دیرینه در گستره کپه داغ پس از تریاس، مجله علوم زمین، شماره ۵۹، ص ۱۷۶-۱۸۳. علمیمی. م. ا، ۱۳۸۵، تحلیل خطر زمین‌لرزه، گسلش فعال، مهاجرت صفحات گسلی با استفاده از GIS در منطقه شمال خاور بیرجند، پایان نامه کارشناسی ارشد، ص ۶۵-۱۱۶.
- عباسی. م. ر، و شبانی بروجنی. ا، ۱۳۸۳، تعیین وضعیت تنش به کمک روش برگشتی از صفحه‌های گسلی لبه جنوبی البرز مرکزی، مجله علوم زمین، شماره ۵۵، ص ۲-۱۷.
- شجاع طاهری. ج، و صادقی. ح، ۱۳۸۵، مشخصه‌های تنش زمین ساختی در فلات ایران با استفاده از تعیین سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های ثبت شده، مجله علوم زمین، شماره ۵۹، ص ۱۰۲-۱۲۰.
- سامانی. ب، فقیه. ع، و چرچی. ع، ۱۳۹۱، بررسی الگوی دگرشکلی با استفاده از تحلیل استرین نهایی و عدد تاوایی جنبش شناختی در پهنه دگرشکل شده چشمه سفید، کمربند دگرگونی سنندج-سیرجان، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره ۵، ص ۲۶-۲۰.
- Anderson. E.M., 1951, The dynamics of faulting and dyke formation with application to Britain, Edinburgh, Oliver and Boyd.
- Angelier. J., 1984, Tectonic analysis of fault slip data sets, J. Geophys, Vol: 89, p: 5835- 5848.
- Angelier. J. and Mechler. P., 1977, Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales Également utilisable en tectonique et enseismologie: la methode des diedres droits, Bull. Soc. Geol. France, Vol:19, p:1309-1318.
- Armijo. R., Carey. E. and Cisternas. A., 1982, The inverse problem in microtectonic and the separation of tectonic phases, Tectonophysics, Vol:182, p:145-160.
- Arthaud. P., 1969, Méthode de déformation graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles, Bull. Soc. Geol, Vol:7, p:729-737.
- Berberian. M., 1981, Active faulting and tectonics of Iran, in Zagros-Hindu Kush-Himalaya Geodynamic Evolution, AGU, Geodynamics Series, Vol:3, p:33-69.
- Bott. M.H.P., 1959, The mechanics of oblique slip faulting, Geological Magazine, Vol:96, p:109-117.
- Camp. V.E. and Griffis. R.J., 1982, Character genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran, Lithos, Vol:15, p:221-239.
- Carey. E. and Brunier. B., 1974, Analyse theorique et numerique d'un modele mecanique elementaire applique a l'etude d'une population de failles, Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Vol:279, p:891-894.
- Frohlich. C., 1992, Triangle diagrams: Ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms, Phys. Earth Planet. Int., Vol:75, p:193-198.
- Mandal. N., Susanta. K. and Chandam. C., 2002, Flow and strain patterns at the termination of tapered shear zones, Journal of Structural Geology, Vol:24, p:297-309.
- Ramasy. J.G. and Lisle. R.J., 2000, The techniques of modern structural geology. Volume 3: Fault slip analysis and stress tensor calculations, Academic press, Vol:32, p:785-810.
- Ramsay. J.G. and Huber. M.I., 1987, The techniques of modern structural geology. Volume 2: Folds and fractures, Academic press, London, p:309-700.
- Reches. Z. and Dietrich. J.H., 1983, Faulting of rocks in three dimensional strain fields. I, failure of rocks in polyaxial, servocontrol experiments, Tectonophysics, Vol:95, p:111-132.
- Tchalenko. J.S. and Berberian. M., 1975, Dasht-e-Bayaz fault, Iran: earthquake and related structures in bedrock, Geol. Soc. Am. Bull, Vol:86, p:703-709.
- Vernant. P., Nilforoushan. F., Hatzfeld. D., Abassi. M.R., Vigny. C., Masson. F., Nankali. H., Martinod. J., Ashtiani. A., Bayer. R., Tavakoli. F. and Chery. J., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman, J.Geophys, Vol:157, p:381-398.
- Walker. R. and Jackson. J., 2004, Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran, Tectonics, Vol:23, TC5010.
- Walker. R. and Khatib. M. M., 2006, Active faulting in the Birjand region of NE Iran, Tectonics, Vol:25, TC4016.
- Wallace. R.E., 1951, Geometry of shearing stress and relationship to faulting, Journal of Geology, Vol:59, p:111-130.
- Wilcox. R.E., Harding. T.P. and Seeley. D.R., 1973, Basic wrench tectonics, AAPG Bulletin, Vol:57, p:74-96.
- Yamaji. A., 2000, The multiple method: a new technique separate stresses from heterogeneous fault-slip data, Journal of Structural Geology, Vol:22, p:441-452.
- Yamaji. A., Satoshi. T. and Makoto. O., 2005, Bedding tilt test for paleostress analysis, Journal of Structural Geology, Vol:27, p:161-170.
- Zoback. M.L., 1989, State of stress and modern deformation of the basin and range province, J.Geophys, Vol:94, p:7105-7128.