

# میدان تنش کواترنری در گستره حوضه رسوبی ماهنشان - میانه، شمال باختر ایران

مهتاب افلاکی<sup>۱</sup>، اسماعیل شبانیان<sup>۱</sup> و زینب داودی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، ایران

<sup>۲</sup>استادیار، گروه زمین شناسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۲۸

## چکیده

حوضه سنوزویک ماهنشان - میانه، در جنوب باختری پایانه جنوبی گسل تبریز، میان دو قلمرو زمین ساختمانی شمال باختر و شمال ایران جای دارد که متأثر از دو رژیم زمین ساختمانی و وضعیت تنش متفاوت هستند. از این رو، شناخت وضعیت تنش در گستره ماهنشان - میانه، یک روش کلیدی برای تعیین مرز گذار میان این دو قلمرو زمین ساختمانی است. در این پژوهش وضعیت تنش کواترنری گستره با استفاده از روش وارون سازی داده های جنبشی گسل ها (صفحه گسل و بردار لغزش آن)، برداشت شده در ۲۵ ایستگاه در گستره حوضه رسوبی سنوزویک ماهنشان - میانه، بررسی شده است. نتایج، راستای محور بیشینه فشار افقی کواترنری را در بخش های مختلف گستره، شمال خاور - جنوب باختر (N049~) و رژیم تنش حاکم بر منطقه را فشارشی و هماهنگ با تنش ناشی از همگرایی عربی - اوراسیا نشان می دهد.

**کلیدواژه ها:** داده های جنبشی گسل ها، وضعیت تنش کواترنری، حوضه رسوبی ماهنشان - میانه، شمال باختر ایران.

**\*نویسنده مسئول:** مهتاب افلاکی

E-mail: aflaki@iasbs.ac.ir

## ۱- پیش نوشتار

مطالعات جی پی اس (GPS)، میدان سرعت شمال باختر ایران را نسبت به اوراسیای ثابت از ۱۲ تا ۱۵ میلی متر بر سال نشان می دهد (Nilforoushan et al., 2003; Vernant et al., 2004; Masson et al., 2006; Reilinger et al., 2006; Vernant and Chéry, 2006; Djamour et al., 2011). راستای این بردارهای سرعت در نواحی باختر و شمال باختر زنجان کم و بیش شمالی - جنوبی است. با نزدیک شدن به بلندی های قفقاز و صفحه آناطولی، بردارهای سرعت به ترتیب به سوی شمال خاور و شمال باختر تغییر جهت می دهند (Reilinger et al., 2006; Djamour et al., 2011) که به نوبه خود سبب فشارش شمال خاوری در گستره قفقاز و لغزش رو به باختر صفحه آناطولی (در راستای گسل های راستالغز چپ بر با راستای شمال خاور و گسل های راستالغز راست بر با راستای شمال باختر، مانند گسل شمال آناطولی) شده است (Cisternas and Phillip, 1997; Vernant et al., 2004; Reilinger et al., 2006). به همین سبب، در گستره شمال باختر ایران دو پهنه زمین ساختمانی با رژیم تنش متفاوت حاکم است: گستره با بیشینه فشارش افقی شمال باختر - جنوب خاور و گستره با بیشینه فشارش افقی شمال خاور - جنوب باختر. گسل شمال تبریز که موازی گسل شمال آناطولی است، همانند آن، در قلمرو زمین ساختمانی متأثر از بیشینه فشارش افقی با راستای شمال باختر - جنوب خاور جای دارد. در برابر آن، گستره های متأثر از بیشینه تنش افقی شمال خاور - جنوب باختری، در شمال باختر ایران، محدود به بلندی های البرز باختری و تالش هستند. گستره زنجان - میانه در پهنه گذار میان این دو قلمروی زمین ساختمانی در شمال باختر ایران قرار گرفته است؛ ولی تاکنون مرز آنها به درستی شناخته نشده و مورد پرسش است. مدل سازی های ژئودتیک بر پایه داده های لرزه ای و جی پی اس نیز به دلیل پراکنده بودن داده ها و بزرگی فواصل میان ایستگاهی منظور شده در مدل ها، توانایی حل این مسئله را نداشته و پاسخ های متفاوتی ارائه داده اند؛ به گونه ای که رژیم دگرشکلی چیره در این پهنه گذار از کشش شمال خاور - جنوب باختری تا فشارش شمال باختر - جنوب خاوری پیشنهاد شده است (Zarifi et al., 2014; Masson et al., 2014) (شکل ۱). بنابراین، هنوز مشخص نیست که مرز این دو قلمرو کجاست و رژیم زمین ساختمانی فعال در آن چگونه است. در این پژوهش تلاش شده است با مطالعه تصاویر ماهواره ای (لندست و بینگ مپ، به ترتیب با اندازه پیکسل ۱۵ و ۱ متر) و برداشت میدانی گسل ها در گستره حوضه رسوبی سنوزویک ماهنشان - میانه و استفاده از وارون سازی

داده های جنبشی گسلی، الگوی میدان تنش امروزی در گستره شمال باختر استان زنجان بررسی شود. برای تحلیل تنش در گستره مورد مطالعه از نرم افزار اف کالک (Fcal) (Carey-Gailhardis and Mercier, 1987) استفاده شده است. دستاورد این بررسی به بازسازی بهتر تصویر ژئودینامیک گستره شمال باختر ایران کمک خواهد کرد.

## ۲- زمین شناسی منطقه

حوضه رسوبی ماهنشان - میانه، میان طول های جغرافیایی ۴۷/۴۰ و ۴۸ درجه خاوری و عرض های جغرافیایی ۳۶/۹ و ۳۷/۲۵ درجه شمالی، یک حوضه کشیده با راستای عمومی شمال باختری است که با جنبش های پس از میوسن دگرریخت شده است (شکل ۲). عرض حوضه از مرکز به سوی شمال و جنوب کاهش می یابد. درون این حوضه بیشتر واحدهای هم ارز سازند سرخ بالایی (به سن میوسن) و در پیرامون آن نهشته های جوان پلیو - کواترنری برونزد دارند (شکل ۲). کهن ترین واحدهای سنگی گستره شامل رخنمون هایی از سنگ های دگرگون پر کامبرین سازند کهر و کربنات ها و دولومیت های سازند روت به سن پرمین هستند که با مرزهای گسلی در بخش جنوب باختر حوضه دیده می شوند. رخنمون هایی از واحدهای آواری سازنده سرخ زیرین (الیگوسن) و آهک های الیگو - میوسن سازند قم نیز در دو سوی حوضه در بخش جنوبی رخنمون دارند (شکل ۲). مطالعه توالی رسوبی منطقه (Afshar, 1965) به خشکی زایی و ایجاد ناپیوستگی در کف سازند سرخ زیرین (الیگوسن پایانی)، افزایش تدریجی ژرفای حوضه تا نهشته شدن کربنات های سازند قم (الیگومیوسن)، پسروی دریا و نهشته شدن سازند آواری - تبخیری سرخ بالایی (میوسن پایانی) و در پایان چین خوردگی، بالا آمدگی و فرسایش شدید میوسن میانی (Ballato et al., 2016) اشاره دارد که سبب ایجاد ناپیوستگی زاویه دار در میان نهشته های قاره ای میوسن بالایی و سازندهای کهن تر شده است. ساختارهای اصلی گستره، از جمله چین های جدایشی و چین های پیشروی گسلی با راستای عمومی شمال باختر، مرتبط با این فاز دگرریختی و فشارش شمال خاوری هستند (Afshar, 1965)؛ باقرنژاد و همکاران، ۱۳۹۴). هر چند رخنمونی از نهشته های آواری پلیوسن درون حوضه رسوبی ماهنشان - میانه دیده نمی شود؛ با توجه به ستبرای و شیب زیاد این نهشته ها در لبه های حوضه و درگیر شدن آنها در فاز اصلی دگرشکلی گمان می رود که این واحدها در کل منطقه گسترش داشته اند و سپس در طی فرایش حوضه فرسایش یافته و از منطقه حذف شده اند.

### ۳- گسل‌های حوضه سنوزویک ماهنشان - میانه

راستای مرزهای خاوری و باختری حوضه رسوبی ماهنشان - میانه از ۱۳۰ درجه در بخش شمالی و جنوبی حوضه تا ۱۷۰ درجه در بخش مرکزی تغییر می‌کند. مرز شمالی حوضه نیز راستای عمومی خاوری - باختری دارد. بررسی دورسنجی تصویرهای ماهواره‌ای و مشاهدات میدانی نشان می‌دهد که هر دو مرز خاوری و باختری حوضه رسوبی ماهنشان - میانه، در بیشتر طول خود، گسلی است (شکل‌های ۲ و ۳). در بخش‌های داخلی حوضه نیز گسل‌های اصلی با راستای شمال باختر - جنوب خاور و گسل‌های فرعی با راستای شمال خاور - جنوب باختر (کم‌و بیش عمود بر هم) دیده می‌شود.

#### ۳-۱. گسل‌های مرزی

مرزهای گسلی خاوری و باختری حوضه، همروند با راستای عمومی چین‌های مرتبط با گسل درون حوضه هستند. گسل مرز خاوری حوضه، پرشیب تا شاقولی با شیب به سوی جنوب باختر است و گسل مرز باختری شیب میانه رو به شمال خاور دارد (شکل ۳- الف). الگوی خمش دیده شده در واحدهای آواری پلیوسن، در فرودواره این گسل‌ها، فعالیت پس از پلیوسن و رانده‌شدگی رو به بیرون حوضه را برای هر دو گسل نشان می‌دهد؛ لایه‌های آواری پلیوسن، در مرز خاوری حوضه، شیب زیاد به سوی خاور دارند که با دور شدن از حوضه به تدریج افقی می‌شوند. رخنمونی از این واحدها درون حوضه دیده نمی‌شود؛ ولی با رسیدن به مرز باختری دوباره ستبرای چشمگیری از نهشته‌های پلیوسن دیده می‌شود که با یک ناپوستگی زاویه‌دار روی سازند سرخ بالایی ظاهر می‌شوند. شواهد میدانی، رانده‌گی به سوی باختر سازند سرخ بالایی و خمیدگی واحدهای سنگی پلیوسن را در فرودواره گسل مرز باختری نشان می‌دهد (شکل‌های ۳- ب و ج).

#### ۳-۲. گسل‌های درون حوضه

در تصویرهای ماهواره‌ای، دو دسته گسل درون حوضه‌ای دیده می‌شود. دسته چیره گسل‌ها (دسته اول) راستای شمال باختر - جنوب خاور دارد و با راستای کلی مرزهای حوضه موازی است؛ دسته دیگر (دسته دوم)، دربرگیرنده گسل‌های با فراوانی بسیار کمتر و راستای عمومی خاوری - باختری تا شمال خاور - جنوب باختر است. دسته اول گسل‌ها که طول بیش از ۱۰ کیلومتر دارند، دست کم از پایان میوسن، در نتیجه همگرایی شمال خاوری، فعال بوده‌اند و سبب شکل گرفتن چین‌های جدایشی و چین‌های پیشروی گسلی (باقرزاد و همکاران، ۱۳۹۴) در لایه‌های سازند سرخ بالایی شده‌اند (شکل ۴). شیب این گسل‌ها در بخش‌های مختلف منطقه (بسته به جایگاه ساختاری) می‌تواند رو به شمال خاور، شاقولی، یا رو به جنوب باختر باشد. برخی از این گسل‌ها پادگانه‌های رودخانه‌ای و مخروط‌افکنه‌ای کواترنری را با سازوکار واژگون بریده‌اند (شکل ۵).

گسل‌های دسته دوم، با طول بیشینه ۱۷ کیلومتر، بیشتر در بخش‌های شمالی حوضه دیده می‌شوند. نمونه‌ای از این گسل‌ها در جنوب باختر روستای قویولار (شکل ۲) لایه‌های پلیوکواترنری را بریده است.

از آنجا که در محدوده مورد مطالعه بیشتر واحدهای سازند سرخ بالایی رخنمون دارند، شواهد فعالیت کواترنری تنها در موارد کمی دیده می‌شود که گسل‌ها پادگانه‌های رودخانه‌ای قزل‌اوزن و یا سطوح مخروط‌افکنه‌های فرایش یافته کهن را متأثر کرده‌اند. به همین سبب، برای تعیین سن نسبی فعالیت گسل‌ها، چند ایستگاه کمکی با شواهد گسلش کواترنری در جنوب حوضه ماهنشان - میانه انتخاب شده است (شکل ۶). این داده‌ها برای تشخیص و تأیید جوان‌ترین نسل حرکت‌های دیده شده در رخنمون‌های سنگی (پیش از کواترنری) استفاده شده است.

### ۴- روش وارون‌سازی داده‌های جنبشی گسل‌ها

وارون‌سازی داده‌های گسلی (صفحه گسل و بردار لغزش آن) روشی کارآمد و جوان، با پیشینه کمتر از نیم قرن (Carey and Brunier, 1974; Carey, 1979; Angelier, 1979 and 1984)، برای تعیین تانسور تنش کاهش یافته

(reduced stress tensor) است. از آنجا که وضعیت خش‌لغزش روی یک صفحه گسل (روند و میل خش‌لغزش و سوی برش) به موقعیت فضایی صفحه گسل نسبت به محورهای اصلی تنش ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ) و شکل میدان تنش  $R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$  یا  $\varphi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$  بستگی دارد (Ritz and Taboada, 1993; Angelier, 1979)؛ روش‌های وارون‌سازی تنش نیز بر پایه اندازه‌گیری سطوح گسل دارای خش‌لغزش و کاهش زاویه ناهمخوانی میان خش‌لغزش به دست آمده ( $\tau$ ) و برداشت شده (S) روی سطوح گسلی استوار هستند (Carey and Brunier, 1974; Carey, 1979; Angelier, 1979, 1984 and 1990). در ادامه به نکاتی چند پیرامون برداشت‌های میدانی، آماده‌سازی و تحلیل داده‌ها اشاره می‌شود.

#### ۴-۱. نکات مورد توجه در برداشت‌های میدانی

تعداد و دقت برداشت‌های میدانی نقش بسزایی در افزایش کیفیت تانسور تنش به دست آمده دارند. از سوی دیگر، هر چه گستره مورد مطالعه پیچیدگی کمتری داشته باشد، برای نمونه، واحدهای سنگی جوان‌تر باشند، رخدادهای زمین‌ساختی کمتری گستره را متأثر کرده باشد، توالی سنی سنگ‌های رسوبی پهنه کامل‌تر باشد و چرخش‌های ساختاری پیرامون محور افقی (چین‌خوردگی) یا شاقولی کمتر رخ داده باشد، تعیین تانسور تنش ساده‌تر و کیفیت آن بهتر خواهد بود. به همین سبب، در برداشت‌های میدانی که به منظور بررسی تنش دیرین انجام می‌شود، افزون بر برداشت داده‌های گسلی و شناسایی نسل‌های لغزش دیرین (روی سطوح گسل با بیش از یک نسل خش‌لغزش)، به شواهد زمین‌شناسی و ساختاری دیگر از جمله روابط بریده‌شدگی سطوح گسل، موقعیت لایه‌بندی، سن واحدهای سنگی گسل خورده، توالی رخدادهای درگریختی گستره و پیوند ساختاری میان رگه‌ها، درزه‌ها و محور چین‌ها هم باید توجه شود.

در شرایطی که گسلش ناشی از یک رژیم زمین‌ساختی باشد، برای تعیین یک تانسور تنش با کیفیت خوب، به ۱۰ تا ۲۰ داده گسلی با توزیع مناسب نیاز است. توزیع نامناسب داده‌ها - حتی به تعداد زیاد - سبب ایجاد خطا در تانسور تنش و کاهش کیفیت آن می‌شود. اگر داده‌های گسلی با جهت‌یابی متفاوت کمتر از ۴ عدد باشد، بر پایه روابط ریاضی به کار رفته در محاسبات، تانسور تنش به دست نخواهد آمد و تنها برآوردی از جهت‌یابی محورهای اصلی تنش به دست می‌آید؛ این قاعده برای همه نرم‌افزارهای محاسبه تنش به روش وارون‌سازی (از روش‌های ترسیمی هیچگاه تانسور به دست نمی‌آید)، برقرار است. در گستره‌های متأثر از دو یا چند فاز زمین‌ساختی، داده‌های گسلی برداشت شده ناهمگن خواهند بود و این ناهمگنی با تعدد فازها پیوندی مستقیم دارد (Shabanian et al., 2010). در چنین مواردی، به مراتب تعداد داده بیشتری برای دست‌یابی به تانسورهای تنش خوب نیاز است (Saintot and Angelier, 2000; Hippolyte et al., 2012).

#### ۴-۲. نکات مورد توجه در آماده‌سازی و تحلیل داده‌های برداشت شده

در گستره‌های با بیش از یک رژیم زمین‌ساختی، نخست بر پایه شواهد زمین‌شناسی و مکانیکی (Saintot and Angelier, 2000; Shabanian et al., 2010; Navabpour et al., 2011; Hippolyte et al., 2012) داده‌های ناهمگن به دسته داده‌های همگن جدا می‌شوند. در یک دسته داده گسلی همگن با تعداد و توزیع مناسب، یکی از محورهای تنش، با توجه به رژیم زمین‌ساختی، نزدیک به شاقولی به دست خواهد آمد (Zoback et al., 1989). در شرایطی مانند کج‌شدگی بعدی واحدهای سنگی، داده‌های گسلی با توجه به وضعیت لایه‌بندی به موقعیت پیش از کج‌شدگی چرخانده (Back-tilting or unfolding) می‌شوند. همیشه باید دلیل ساختاری خوبی برای انتخاب مرجع چرخش داده‌ها وجود داشته باشد و پس از چرخش نیز متغیرهای شکل میدان تنش، موقعیت محورهای اصلی تنش و هندسه داده‌های گسلی توجیه ساختاری - زمین‌ساختی داشته باشد.

کیفیت نتایج پایانی از خوب (A) تا متوسط (B) و ضعیف (C) بر پایه معیارهایی مانند تعداد و توزیع داده‌ها، همخوانی جنبشی - هندسی، پایداری مکانیکی تانسور و شکل میدان تنش مشخص می‌شود.

ناهمخوانی و نمودار گل سرخی راستای صفحه‌های گسلی پردازش شده، در جدول ۱ و شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.

### ۶- نتیجه‌گیری

نتایج وارون‌سازی داده‌های جنبشی گسل‌های کواترنری در ۱۹ ایستگاه در گستره ماهانشان-میانه (جدول ۱ و شکل‌های ۸ و ۹)، راستای میانگین محور تنش بیشینه افقی را به‌طور همگن، شمال‌خاوری ( $N049^{\circ}E$ ) نشان می‌دهد (شکل ۱۰). این موقعیت، بسته به جایگاه ساختاری، ممکن است از  $N018$  تا  $N072$  به‌طور محلی تغییر کند. رژیم تنش، به‌جز در ایستگاه‌های ۴، ۹ و ۱۱ که راستالغز به‌دست آمده است، در همه ایستگاه‌ها فشارشی محض (آرایش آندرسونی واژگون و میانگین شکل میدان  $R=0.58$ ) است.

همخوانی میان راستای فشارش (تنش بیشینه افقی) به‌دست آمده در این گستره با راستای شمال‌خاور-جنوب‌باختر فشارش عمومی در گستره‌های جنوبی و خاوری (سلمانلو، ۱۳۹۳؛ Abbassi and Farbod, 2009; Zarifi et al., 2014)، نشانگر تأثیرپذیری مستقیم گستره ماهانشان-میانه از همگرایی عربستان-اوراسیا و متفاوت بودن آن از قلمرو زمین‌ساختی شمال‌باختر ایران است. این نتایج، قلمرو تأثیر زمین‌ساخت شمال‌باختر را رو به جنوب، به‌پهنه تأثیر گسل شمال‌تبریز محدود می‌کند.

همان‌گونه که در مدل جنبشی پیشنهادی (شکل ۱۱) دیده می‌شود، چون گسل‌های مرزی حوضه ماهانشان-میانه شیب رو به درون حوضه دارند، فشارش شمال‌باختر کواترنری سبب فرایش واحدهای سنگی حوضه ماهانشان-میانه (رشد چین‌ها و گسلش)، فرسایش لایه‌های آواری پلیوسن در گستره حوضه و رخنمون سازند سرخ بالایی در سطح شده است.

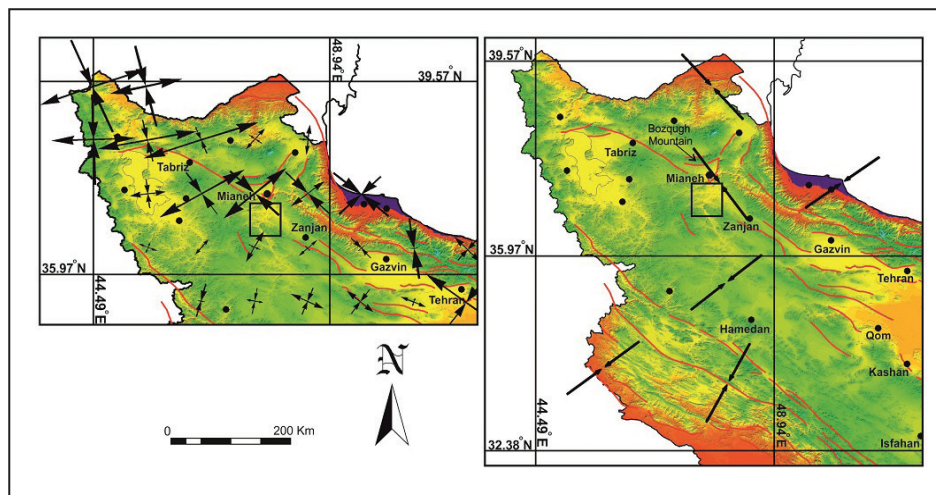
پس از محاسبه تانسور تنش در تک‌تک ایستگاه‌ها، نتایج ایستگاه‌های مختلف از دید ویژگی‌های سن واحدها، هندسه و ویژگی جنبشی گسل‌ها و رژیم تنش مقایسه می‌شود تا تصویری از رژیم زمین‌ساختی گستره مورد مطالعه به‌دست آید.

### ۵- تحلیل تنش گستره ماهانشان-میانه

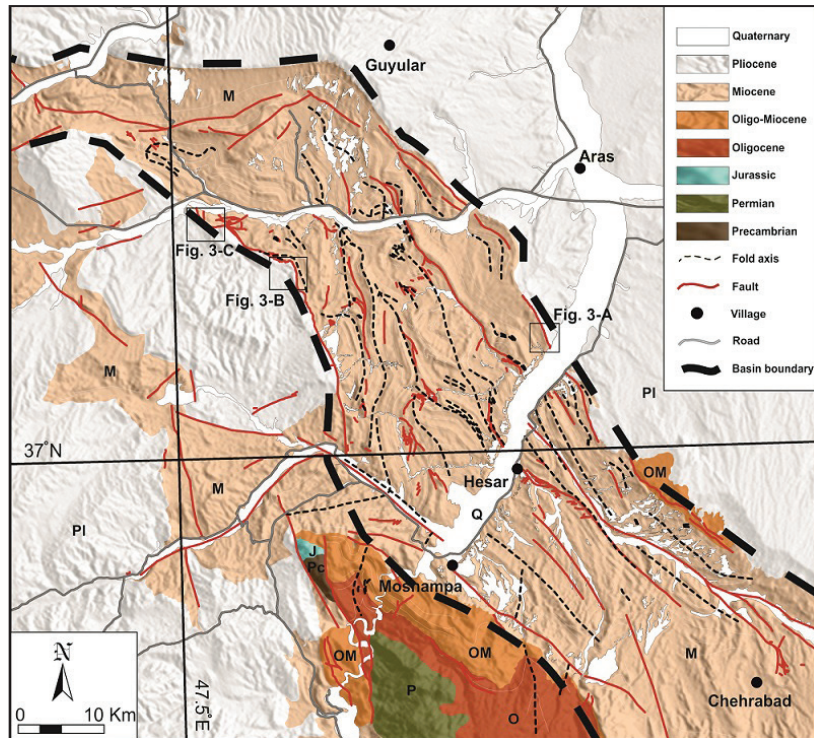
برداشت میدانی داده‌های گسلی در ۲۵ ایستگاه در گستره حوضه رسوبی ماهانشان-میانه انجام شد. از این میان، شواهد گسل‌های جوان که نهشته‌های آواری پلیو-کواترنری و کواترنری را بریده‌اند در ۵ ایستگاه دیده شد. در بیشتر ایستگاه‌ها، به‌سبب رخنمون گسترده واحدهای سنگی به‌سن نئوژن سازند سرخ بالایی در حوضه ماهانشان-میانه، داده‌های جنبشی گسلی در این لایه‌ها برداشت شده‌اند. شکل ۷ چند نمونه از داده‌های جنبشی برداشت شده را در لایه‌های سازند سرخ بالایی و آهکی سازند قم نشان می‌دهد. کهن‌ترین واحد سنگی که داده‌های جنبشی گسل‌ها در آن برداشت شده است، دولومیت به‌سن پرمین رخنمون یافته در مرز جنوب‌باختری حوضه است (شکل ۲).

پس از برداشت، داده‌های هر ایستگاه به‌صورت جداگانه در محیط نرم‌افزار Falc پردازش شده‌اند. پس از دسته‌بندی سنی داده‌ها، جوان‌ترین نسل لغزش در هر ایستگاه مشخص شد؛ شواهد لغزش کواترنری در ۱۹ ایستگاه در منطقه به‌دست آمد (جدول ۱ و شکل‌های ۸ و ۹). برای تأیید پایدانی، نتایج هر ایستگاه با داده‌های به‌دست آمده از ایستگاه‌هایی که در آنها گسل‌های کواترنری مستقیم اندازه‌گیری شده بود، مقایسه شد.

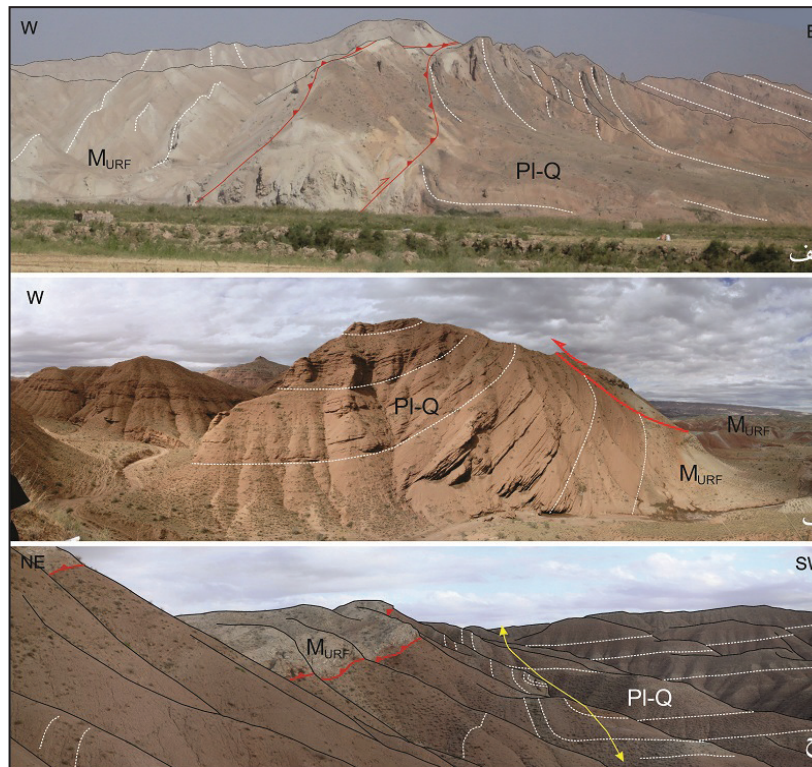
نتایج به‌دست آمده، شامل تصویر استریوگرافیک سطوح گسل و خش‌لغزش آنها در نیمکره زیرین، موقعیت و بزرگای نسبی محورهای اصلی تنش، نمودار موهر برای تنش سه‌محوری پیشنهادی، شکل میدان تنش ( $R$ )، نمودار ستونی توزیع زاویه



شکل ۱- الف) میانگین وزنی محور فشارش بیشینه افقی در پهنه شمال‌باختر ایران (برگرفته از Zarifi et al. (2014) با کمی تغییرات)؛ ب) محورهای تانسور کرنش در شمال‌باختر ایران (برگرفته از Masson et al. (2014) با کمی تغییرات). چهار گوش تیره در هر دو تصویر گستره ماهانشان-میانه را مشخص می‌کند. محورهای تنش در هر دو تصویر بر پایه مدل‌های ژئودتیک به‌دست آمده است.



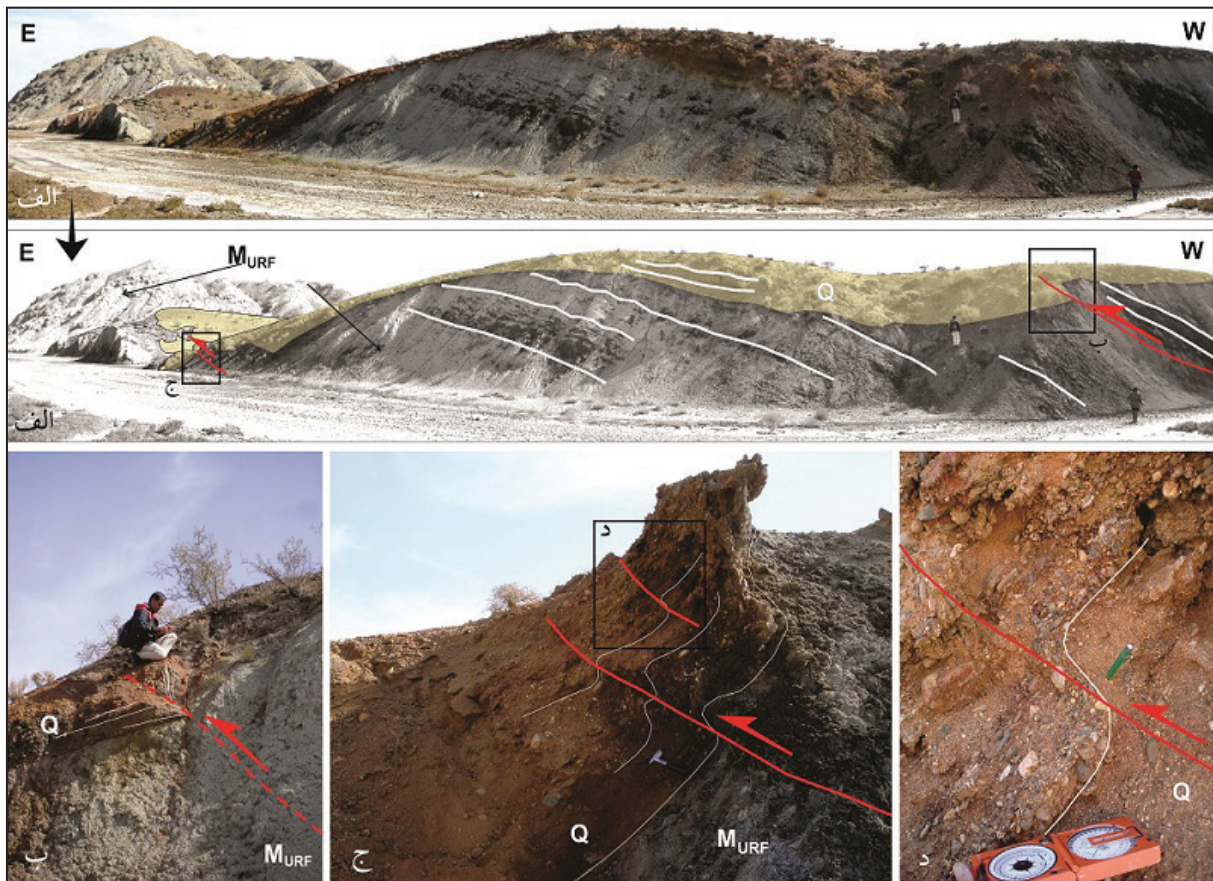
شکل ۲- نقشه زمین شناسی حوضه رسوبی سنوزوئیک ماهنشان-میانه (بر پایه شواهد میدانی، تصویرهای ماهواره‌ای و نقشه‌های زمین شناسی برگه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ (امامی و همکاران، ۱۳۷۷) و ماهنشان (لطفی، ۱۳۸۰) و چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ میانه (Amidi et al., 1979)) همراه با محور چین‌ها و رد سطحی گسل‌های اصلی. مرزهای حوضه با خطچین درشت مشخص شده‌است. جایگاه عکس‌های ارایه شده در شکل ۳ با چهارگوش تیره روی نقشه مشخص شده‌است (بخش‌های الف، ب و ج به ترتیب با چهارگوش‌های ۳-ا، ۳-ب و ۳-ج همخوان است).



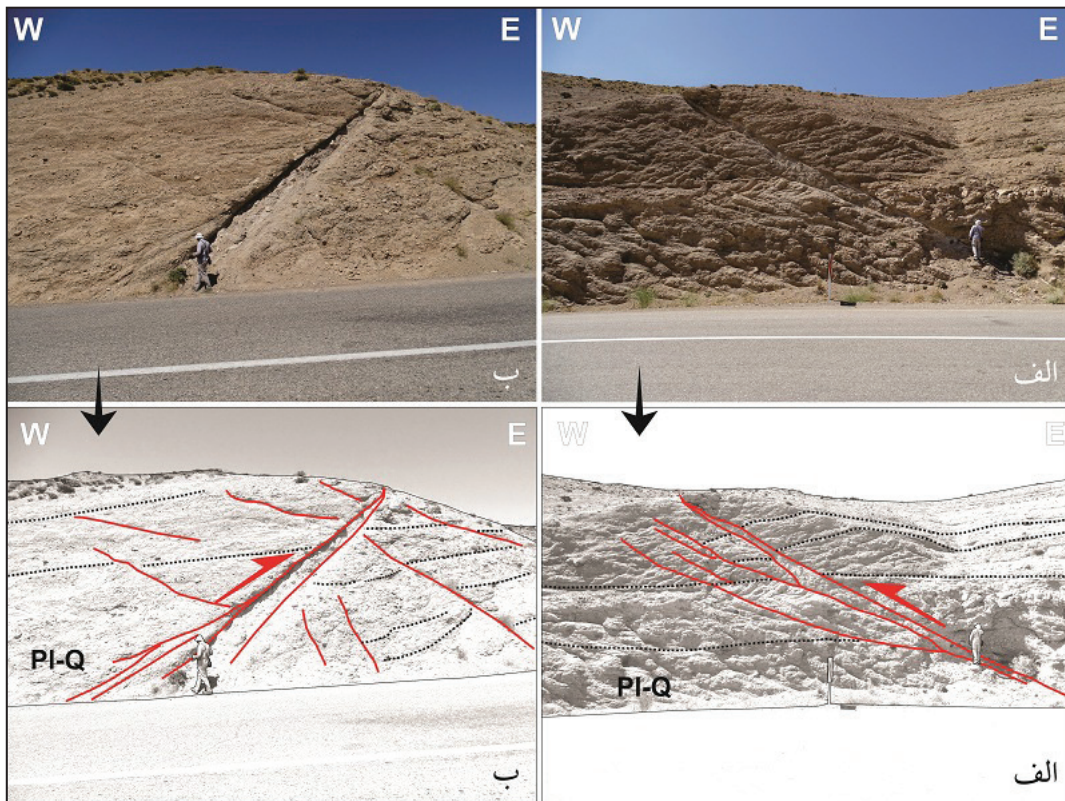
شکل ۳- الف) نمای رو به شمال از مرز خاوری حوضه در دیواره رودخانه قزل‌اوزن. راندگی سازند سرخ بالایی روی واحدهای پلیوسن، آنها را در فرودپواره گسل مرزی به سوی شمال خاور چرخانده است؛ ب) نمای رو به شمال؛ ج) نمای رو به جنوب از گسل مرزی در باختر حوضه. راندگی سازند سرخ بالایی روی واحدهای آواری پلیو-کواترنری، سبب چین‌خوردگی آنها در فرودپواره گسل شده است. جایگاه هر یک از عکس‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. خط چین سفید، اثر لایه بندی؛ خط سرخ، گسل؛ خط زرد، محور چین؛ PI-Q، پلیو کواترنر و M\_URF، میوسن (سازند سرخ بالایی) است.



شکل ۴- نمای رو به جنوب خاور از پهنه راندگی و دگرریختی فرادیواره در تناوب گچ و گل سنگ سازند سرخ بالایی، جاده حصار- مشمپا. خط سفید، اثر لایه‌بندی و خط سرخ، گسل است.



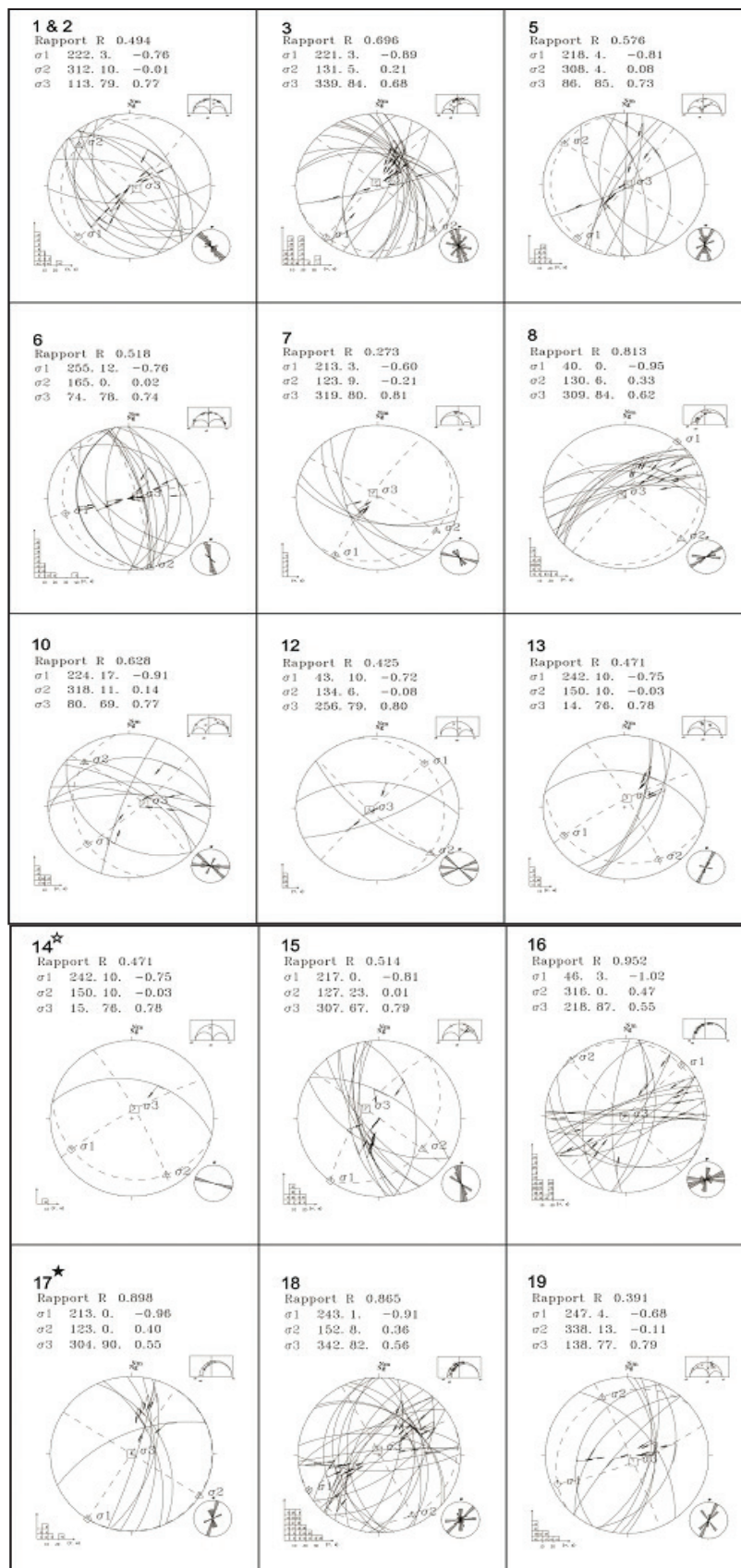
شکل ۵- نمای رو به جنوب از گسلش فشاری در نهشته‌های کواترنری ایستگاه شماره ۷ (جدول ۱ و شکل ۷). خط سفید، اثر لایه‌بندی؛ خط سرخ، گسل و Q، کواترنری است.



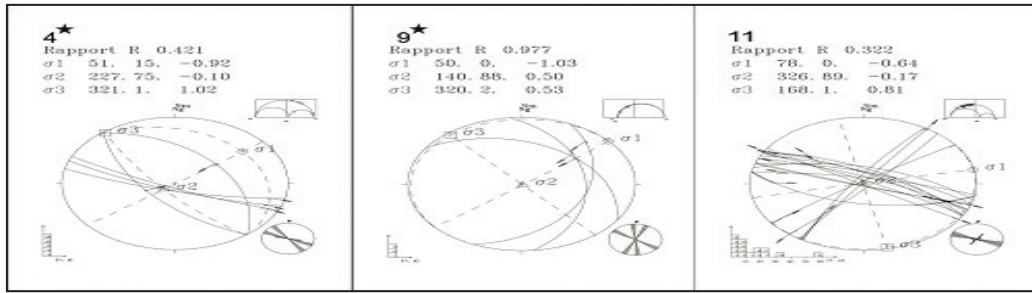
شکل ۶- نمای رو به شمال از گسلش راندگی در نهشته های پلیو- کواترنری در ایستگاه شماره ۱۸ (جدول ۱ و شکل ۷). خط چین سیاه، اثر لایه بندی و خط سرخ، گسل است.



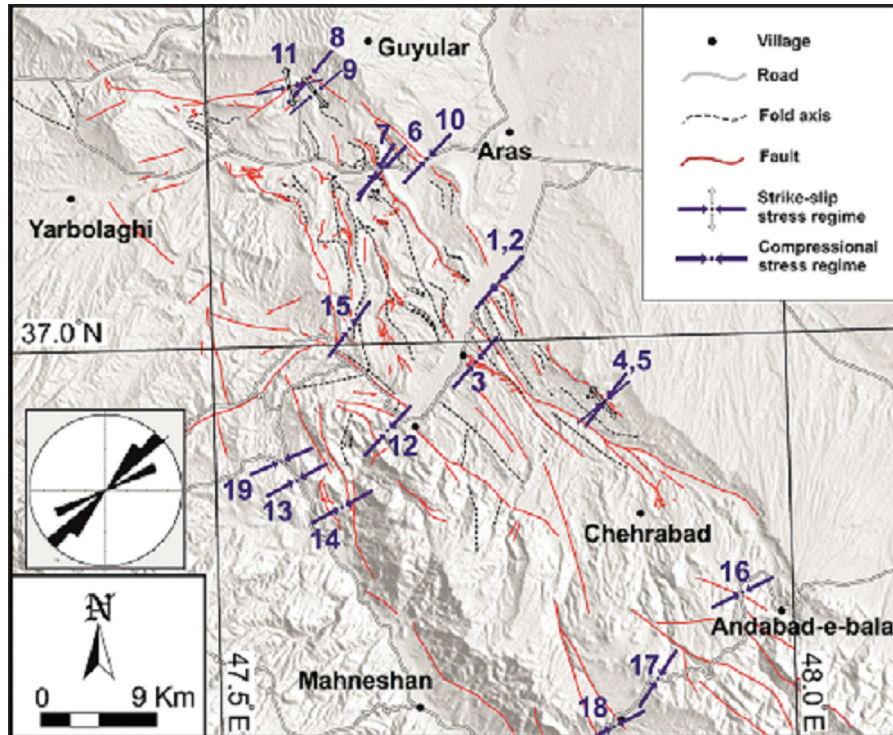
شکل ۷- چند نمونه از: الف و ب) خش لغزش ها و سوی برش به دست آمده روی سطوح گسل راستالغز راست بر در واحدهای کربناته؛ ج و د) گسل های وارون در لایه های تبخیری - تخریبی سازند سرخ بالایی؛ د) نمای زیر سطح گسل وارون.



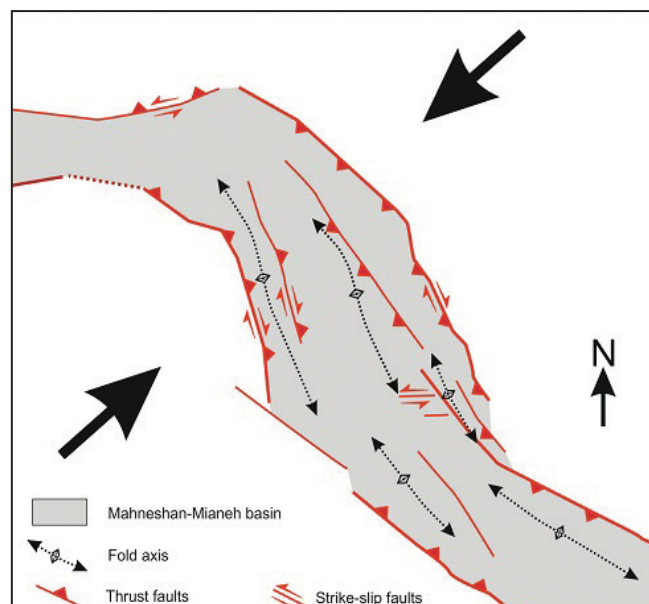
شکل ۸- نتایج رژیم تنش فشارشی به دست آمده از وارون‌سازی داده‌های سطوح گسل خشل‌گذردار در ۱۶ ایستگاه. نتایج شامل استریوگرام نیمکره پایینی سطوح گسل خشل‌گذردار، موقعیت محورهای اصلی تنش، شکل میدان تنش (R) و نمودار ستونی توزیع زاویه ناهمخوانی بردار لغزش اندازه‌گیری شده و به دست آمده است. تنش‌های مقید شده (CF) با ستاره مشخص شده‌اند (Bellier and Zoback, 1995).



شکل ۹- نتایج رژیم تنش راستالغز به دست آمده از وارون سازی داده های سطوح گسل خش لغزدار در ۳ ایستگاه در گستره ماهنشان-میانه. برای آگاهی بیشتر به زیرنویس شکل ۸ بازگردید.



شکل ۱۰- نقشه راستای محور تنش بیشینه افقی (محور فشارش) حاکم در کواترنری، به همراه نمودار گل سرخی راستای تنش بیشینه افقی (به جدول ۱ و شکل های ۸ و ۹ بازگردید).



شکل ۱۱- مدل جنبشی ساده شده حوضه رسوبی ماهنشان-میانه. پیکان های بزرگ راستای میانگین فشارش حاکم در زمان کواترنری گستره را نشان می دهند. گسل های مرزی حوضه شیب رو به درون حوضه دارند و سازوکار آنها فشاری با مؤلفه راستالغز راست بر است.



جدول ۱- ویژگی‌های تانسور تنش کواترنری به دست آمده از وارون‌سازی داده‌های جنبشی گسل‌های کواترنری در گستره ماهنشان- میانه. داده‌ها شامل شماره ایستگاه، روند و میل محوره‌های اصلی تنش ( $\sigma_1$  تا  $\sigma_3$ )، شکل میدان تنش (R)، تعداد داده‌های گسلی پردازش شده در هر ایستگاه (N)، تعداد کل داده‌ها در هر ایستگاه (Nt)، کیفیت تانسور (Q): حرف A تا C به ترتیب معرف کیفیت خوب تا ضعیف برای تحلیل تنش در هر سایت و معرف تانسورهای به دست آمده با کمتر از ۴ راستای گسلی است که با یک محور تنش شاقولی مقید شده است (Bellier and Zoback, 1995)، رژیم تنش (Rm) به دست آمده در هر ایستگاه (C: رژیم فشارشی، S: رژیم راستالغز) و سن چینه‌شناختی لایه‌های رخنمون یافته در هر ایستگاه است.

Site number	Modern stress axis (trend/plunge)								Formation age
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	R	N	N <sub>t</sub>	Q	Rm	
1	222/03	312/10	113/79	0.494	13	23	B	C	Miocene
2	222/03	312/10	113/79	0.494	13	23	B	C	Quaternary
3	221/03	131/05	339/84	0.696	19	46	C	C	Miocene
4	051/15	227/75	321/01	0.421	5	27	CF	S	Oligo-Miocene
5	218/04	308/04	086/85	0.576	9	18	A	C	Oligo-Miocene
6	225/12	165/00	074/78	0.518	14	18	C	C	Miocene
7	213/03	123/09	319/80	0.273	5	5	B	C	Quaternary
8	040/00	130/06	309/84	0.813	13	19	B	C	Miocene
9	050/00	140/88	320/02	0.977	3	6	CF	S	Miocene
10	224/17	318/11	80/69	0.628	8	16	B	C	Miocene
11	078/00	326/89	168/01	0.322	16	23	B	S	Pliocene
12	043/10	134/06	256/79	0.425	3	33	B	C	Miocene
13	242/10	150/10	014/76	0.471	6	7	B	C	Miocene
14	242/10	150/10	015/76	0.471	1	17	CF	C	Permian
15	217/00	127/23	307/67	0.514	11	15	B	C	Miocene
16	064/03	316/00	218/87	0.952	18	63	B	C	Quaternary
17	213/00	123/00	304/90	0.898	7	13	CF	C	Oligocene
18	243/01	152/08	342/82	0.865	25	30	A	C	Plio-Quaternary
19	247/04	338/13	138/77	0.391	10	28	A	C	Miocene

## کتابنگاری

- امامی، ه.، خدابنده، ع.، فریدی، م. و امینی‌آذر، ر. ۱۳۷۷- نقشه زمین‌شناسی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ میانه، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- باقرنژاد، م.، قاسمی، م.ر. و اویسی، ب.، ۱۳۹۴- چین خوردگی جدایشی در گستره میانه- ماهنشان: اندرکنش بین رسوبگذاری در حوضه سازند سرخ بالایی و کوتاه‌شدگی، مجله علوم زمین، شماره ۲۵، ص. ۱۶۹ تا ۱۸۰.
- سلمانلو، ع.، ۱۳۹۳- بررسی تغییرات میدان تنش سنوزوئیک پسین (میوسن- کواترنری) در گستره زنجان و کاربرد آن در ژئودینامیک شمال‌باختر ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ۱۹۳ ص.
- لطفی، م.، ۱۳۸۰- نقشه زمین‌شناسی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ ماهنشان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

## References

- Abbassi, M. R. and Farbod, Y., 2009- Faulting and folding in quaternary deposits of Tehran's piedmont (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 34: 522-531.
- Afshar, F. A., 1965- Geology of Mianeh district of Northwestern Iran. *Bull. Min. Res. Expl. Inst. Turkey*, 64: 57-72.
- Amidi, M., Alavi Tehrani, N., Lotfi, M., Sabzehei, M., Behroozi, A., Lescuyer, J., Riou, R. and Haghipour, A., 1979- Geological map of Mianeh quadrangle. Geological Survey of Iran, Tehran, scale 1:250,000.
- Angelier, J., 1979- Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics* 56: T17-T26.
- Angelier, J., 1984- Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research* 89: 835-848.

- Angelier, J., 1990- Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress-III. A new rapid direct inversion method by analytical means. *Geophys. J. Int.* 103: 363-376.
- Ballato, P., Cifelli, F., Heidarzadeh, M. and Ghassemi, M. R., 2016- Tectono-sedimentary evolution of the northern Iranian Plateau: insights from middle-late Miocene foreland-basin deposits. *Basin Research*, in press.
- Bellier, O. and Zoback, M. L., 1995- Recent state of stress change in the Walker Lane zone, western Basin and Range Province, United States. *Tectonics* 14: 564–593.
- Carey, E. and Brunier, B., 1974- Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles, *C. R. Acad. Sci. Ser. D* 279 : 891–894.
- Carey, E., 1979- Recherche des directions principales de contraintes associées au jeu d'une population de failles. *Rev. Geol. Dyn. Geogr. Phys.* 21 : 57–66.
- Carey-Gailhardis, E. and Mercier, J. L., 1987- A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquake populations: application to Tibetan teleseisms and microseismicity of Southern Peru. *Earth and Planetary Science Letters*, 82: 165-179.
- Cisternas, A. and Philip, H., 1997- Seismotectonics of the Mediterranean region and the Caucasus. In: Giardini, D., Balassanian, S. (Eds.), *Historical and Prehistorical Earthquakes in the Caucasus*. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, Netherlands, pp. 39–77.
- Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H. R. and Tavakoli, F., 2011- NW Iran-eastern Turkey present-day Kinematics: Results from the Iranian permanent GPS network. *Earth and Planetary Science Letters* 307: 27-34.
- Hippolyte J., Bergerat, F., Gordon, M. B., Bellier, O. and Espurt, N., 2012- Keys and pitfalls in mesoscale fault analysis and paleostress reconstructions. *Tectonophysics* 581: 144–162.
- Masson, F., Djamour, Y., Van Gorp, S., Chéry, J., Tatar, M., Tavakoli, F., Nankali, H. and Vernant, P., 2006- Extension in NW Iran driven by the motion of the South Caspian Basin. *Earth and Planetary Science Letters* 252: 180–188.
- Masson, F., Lehujeur, M., Ziegler, Y. and Doubre, C., 2014- Strain rate tensor in Iran from a new GPS velocity field. *Geophysical Journal International* doi: 10.1093/gji/ggt509.
- Navabpour, P., Angelier, J. and Barrier, E., 2011- Brittle tectonic reconstruction of palaeo-extension inherited from Mesozoic rifting in west Zagros (Kermanshah, Iran). *Journal of Geological Society, London* 168: 979-994.
- Nilforoushan, F., Masson, F., Vernant, P., Vigny, C., Martinod, J., Abbassi, M., Nankali, H., Hatzfeld, D., Bayer, R., Tavakoli, F., Ashtiani, A., Doerflinger, E., Daignieres, M., Collard, P. and Chéry, J., 2003- GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran. *Journal of Geodesy* 77: 411–422.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R. and Nadariya, M., 2006- GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research* 111: B05411.
- Ritz, J. F. and Taboada, A., 1993- Revolution stress ellipsoids in brittle tectonics resulting from an uncritical use of inverse methods. *Bull. Soc. Geol. France*. 164: 519-531.
- Saintot, A. and Angelier, J., 2000- Plio-Quaternary paleostress regimes and relation to structural development in the Kertch-Taman peninsulas (Ukraine and Russia). *Journal of Structural Geology* 22: 1049-1064.
- Shabanian, E., Bellier, O., Abbassi, M., Siame, L. and Farbod, F., 2010- Plio-Quaternary stress states in NE Iran: Kopeh Dag and Allah Dag-Binalud mountain ranges. *Tectonophysics* 480: 280–304.
- Vernant, P. and Chéry, J., 2006- Low fault friction in Iran implies localized deformation for the Arabia–Eurasia collision zone. *Earth and Planetary Science Letters* 246: 197–206.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. and Chéry, J., 2004- Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys. J. Int.* 157: 381–398.
- Zarifi, Z., Nilforoushan, F. and Raeesi, M., 2014- Crustal Stress Map of Iran: Insight from Seismic and Geodetic Computations. *Pure and Applied Geophysics* 171: 1219-1236.
- Zoback, M. L., Zoback, D., Adams, J., Assumpcao, M., Bell, S., Bergman, E. A., Blumling, P., Brereton, N. R., Denham, D., Ding, J., Fuchs, K., Gay, N., Gregersen, S., Gupta, K., Gvishiani, A., Jacob, K., Klein, R., Knoll, P., Magee, M., Mercier, J. L., Muller, B. C., Paquin, C., Rajendran, K., Stephanson, O., Suarez, G., Suter, M., Udias, A., Xu, Z. H. and Zhizhin, M., 1989- Global patterns of tectonic stress. *Nature* 341: 291 – 298.

## Quaternary state of stress in the Mahneshan-Mianeh sedimentary basin, NW Iran

M. Aflaki<sup>1\*</sup>, E. Shabanian<sup>1</sup> and Z. Davoodi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Geology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Received: 2016 February 27

Accepted: 2016 July 18

### Abstract

Mahneshan–Mianeh Cenozoic basin, in southern part of SE–termination of North Tabriz Fault, is located between two distinct NW and N Iran tectonic domains affected by different Quaternary tectonic and stress regimes, with a transitional boundary. Determining the Quaternary state of stress in the area of interest is a key to locate the locus of this transition between the two tectonic domains. In this study, Quaternary stress state of the area was studied using the inversion of fault kinematics data (with well-known sense and chronology) measured in 25 sites in the Mahneshan–Mianeh Cenozoic basin. Our results indicate a homogenous modern compressional stress field characterized by a NE-trending horizontal maximum stress axis (~N055) prevailing through Quaternary, and coherent with the direction of the Arabia–Eurasia convergence in Iran.

**Keywords:** Fault kinematics inversion, Quaternary state of stress, Mahneshan–Mianeh sedimentary basin, NW Iran.

For Persian Version see pages 247 to 256

\*Corresponding author: M. Aflaki, E-mail: aflaki@iasbs.ac.ir