

چکیده

حوضه رسوبی ماهنشان - میانه یک حوضه باریک در جنوب شهرستان میانه و خاور شهرستان ماهنشان است که روند ساختارهای اصلی چین و راندگی لایه‌های سازند قرمز بالایی درون آن با راستای کشیدگی شمال باختر - جنوب خاور حوضه همخوان است. با توجه به جایگاه این پهنه در مرز گذار میان دو قلمرو تکتونیکی متفاوت گستره شمال باختر ایران، بررسی تحولات ساختاری آن می‌تواند به بازسازی بهتر تاریخچه ژئودینامیکی شمال باختر ایران کمک کند. از این رو، در این پژوهش سعی شده است با کمک تصویرهای ماهواره‌ای، بررسی و برداشت میدانی ساختارها (از جمله هندسه چین خوردگی‌ها و داده‌های هندسی و جنبشی گسله‌ها) و وارون‌سازی داده‌های جنبشی گسله‌ها، تحولات ساختاری دیرین حوضه ماهنشان - میانه بررسی شود. بررسی الگوی سطحی و اندازه‌گیری‌های ساختاری نشان می‌دهد چین‌های اصلی گستره که ناشی از دگرریختی اواخر میوسن میانی هستند، با گامه جوان‌تری از چین‌ها که راستای محوری شمال خاور - جنوب باختر دارند، فرا نهاده شده‌اند. بر پایه شواهد ساختاری و چینه‌شناسی، گامه دوم در بازه زمانی پلیوسن تا کواترنری رخ داده است. وارون‌سازی داده‌های جنبشی گسله‌ها گویای وجود یک رژیم فشارشی دیرین، اواخر پلیوسن - کواترنری، با راستای محور بیشینه فشارش افقی شمال باختر - جنوب خاور در حوضه رسوبی ماهنشان - میانه است که پیش از سامانه تنش امروزی، با راستای شمال خاور - جنوب باختر، بر این گستره چیره بوده است. چنین راستای فشارشی می‌تواند مسبب تشکیل چین‌های گامه دوم در گستره حوضه رسوبی ماهنشان - میانه باشد.

واژگان کلیدی: تنش دیرین، شمال باختر ایران، ماهنشان - میانه، گسل، چین خوردگی فرا نهاده.

شواهد دگرریختی برآمده از تنش دیرین پلیو - کواترنری در حوضه رسوبی ماهنشان - میانه (شمال باختر ایران)

مهتاب افلاکی (نویسنده مسئول)

استادیار، دانشکده علوم زمین دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه

زنجان، زنجان، ایران

aflaki@iasbs.ac.ir

اسماعیل شبانیان

استادیار، دانشکده علوم زمین دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه

زنجان، زنجان، ایران

زینب داودی

استادیار، گروه زمین‌شناسی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)،

قزوین، ایران

۱ - مقدمه

خاور صفحه عربی است. در شمال باختر ایران، به سبب تأثیر پوسته سخت خزر جنوبی از زمان پلیوسن - پلیستوسن [۱۲، ۲۶-۲۷] و فرار فلات آناتولی به سوی باختر [۱۶، ۲۸]، الگوی دگرریختی‌ها، پیچیدگی بیشتری می‌یابد؛ به گونه‌ای که امروزه در گستره شمال باختر ایران دو پهنه زمین‌ساختی با جهت بیشینه فشارش افقی متفاوت شمال خاور - جنوب باختر (در گستره کوه‌های تالش) و شمال باختر - جنوب خاور (در باختر کوه‌های تالش و شمال گسله‌ی شمال تبریز) دیده می‌شود (شکل ۱- الف). با توجه به ابهاماتی که در مرز گذار میان این دو پهنه و

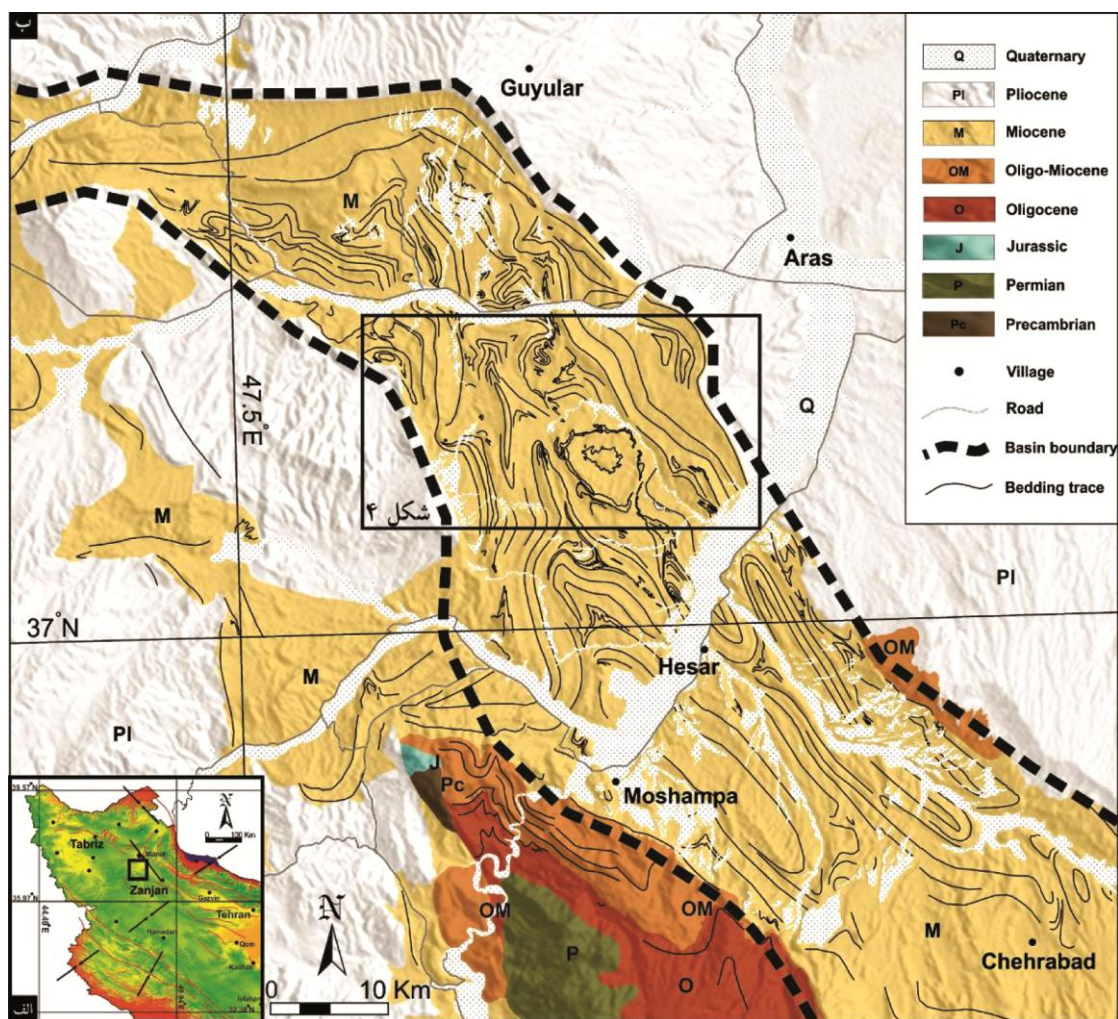
پژوهش‌های ساختاری که در زمینه وارون‌سازی داده‌های گسلی در بخش‌های مختلف ایران از جمله زاگرس [۱-۳]، البرز [۴]، کپه‌داغ [۵-۶]، مکران [۷-۸]، ایران مرکزی [۹]، و شمال باختر ایران [۱۰-۱۴] انجام شده است نه تنها در ترکیب با روش‌های ژئودتیکی [۱۵-۲۵] و ژئوفیزیکی [۱۲] اطلاعات ارزشمندی برای درک مدل ژئودینامیک امروزه ایران فراهم کرده است، بلکه در بازسازی تاریخچه تکتونیکی ایران نیز بسیار مؤثر بوده است. این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که دگرریختی امروزی در بیشتر گستره ایران، متأثر از همگرایی به سمت شمال

نمونه ۱۰-۱۱]، بررسی شده است.

۲- زمین‌شناسی گسترده‌ی مورد مطالعه

حوضه رسوبی سنوزوئیک ماهنشان- میانه در گستره شمال باختری ایران (شکل ۱)، یک حوضه چین خورده با دگربرختی جوان است که در آن نهشته‌های دریاچه‌ای و رودخانه‌ای مربوط به سازند قرمز بالایی [۲۹] در راستای کلی شمال باختر- جنوب خاور در سطح رخنمون یافته‌اند (شکل ۱). در حوضه رسوبی ماهنشان- میانه تنها واحدهای میوسن سازند قرمز بالایی برونزد دارند. پیرامون این حوضه بیشتر با نهشته‌های جوان پلیوسن- کواترنری پوشیده شده است. کهن‌ترین واحدهای سنگی

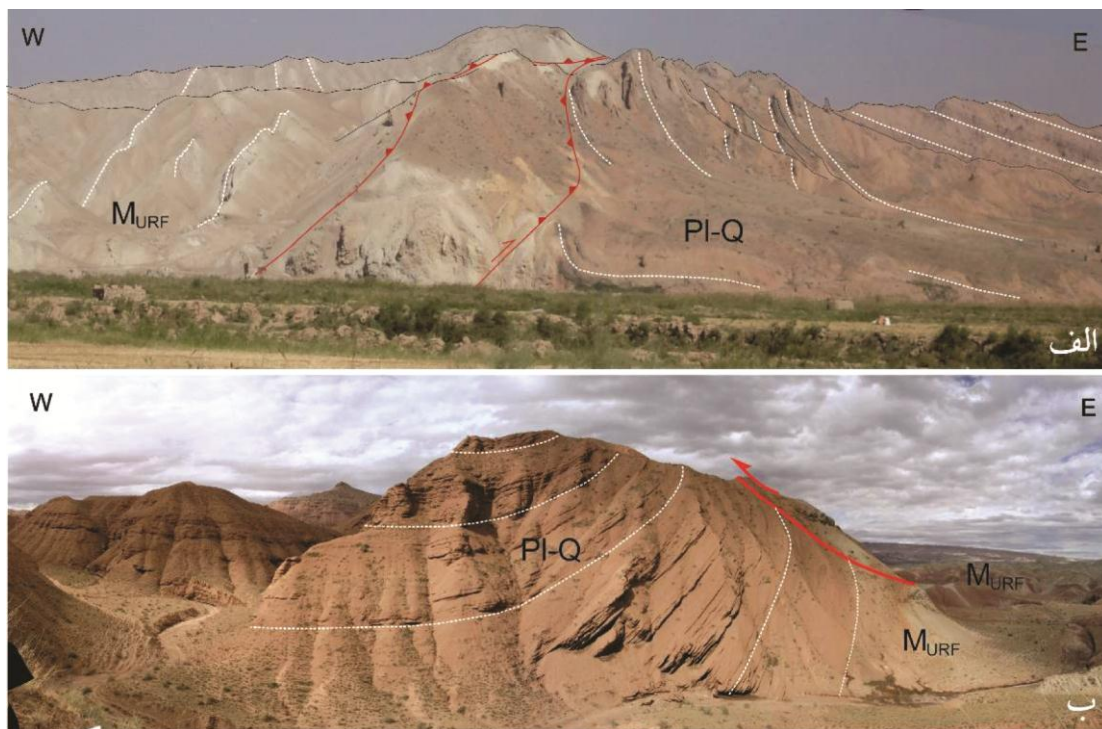
نقش بلوک خزر جنوبی در تکتونیک شمال- شمال باختر ایران وجود دارد، پژوهش‌های ساختاری می‌تواند ابزار مناسبی برای درک بهتر تاریخچه تکوین پس از میوسن گستره شمال باختر ایران و شناسایی فرآیندهای ژئودینامیک در حال رویداد باشد. از این رو، در این پژوهش با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای، برداشت میدانی ساختارها (از جمله داده‌های جنبشی گسله‌ها و هندسه چین خوردگی‌ها) و تلفیق نتایج حاصل از تحلیل هندسی چین‌ها و تنش دیرین حاصل از وارون‌سازی داده‌های جنبشی گسله‌ها در حوضه رسوبی سنوزوئیک ماهنشان- میانه، تاریخچه تکوین پس از میوسن این گستره از شمال باختر ایران، پیش از چیرگی سامانه تنش شمال خاور- جنوب باختر امروزی [برای



شکل (۱): نقشه زمین‌شناسی گسترده‌ی حوضه رسوبی سنوزوئیک ماهنشان- میانه. بر پایه تصویرهای ماهواره‌ای و نقشه‌های زمین‌شناسی برگه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ میانه [۳۰] و ماهنشان [۳۱]. موقعیت شکل (۴) بر روی این نقشه مشخص شده است.

توالی تبخیری قاعده سازند قرمز بالایی (شامل شیل های ژیس دار، لایه های ژیس و نمک) در بخش های دریایی کم عمق و لاگون ها نهشته شوند. رسوبات آواری با خاستگاه قاره ای میوسن بالایی بخش بالایی این توالی را می سازد [۲۹]. رخداد چین خوردگی و بالآمدگی پایان میوسن و فرسایش شدید پس از آن سبب حذف بخش گسترده ای از واحدهای قبلی و ایجاد ناپوستگی زاویه داری شد که با کنگلومرای قاره ای اواخر میوسن، حدود ۱۰/۷ میلیون سال پیش [۳۲] تا پلیوسن پوشیده شد. ستبرای زیاد نهشته های پلیوسن بیرون از حوضه ماهنشان-میانه و در نزدیکی مرزهای خاوری و باختری با مرز گسلی فشارشی (شکل ۲) نشان می دهد که این واحد در کل منطقه گسترش داشته و فرسایش برآمده از رخداد فرسایش بعدی در راستای حوضه ماهنشان-میانه سبب از بین رفتن کامل نهشته های پلیوسن و رخنمون لایه های سازند قرمز بالایی در سرتاسر حوضه رسوبی شده است. به همین سبب بیرون از حوضه و با دور شدن از مرزهای حوضه، از مقدار شیب لایه های آواری پلیوسن کاسته می شود (شکل ۲-الف).

پیرامون حوضه شامل رخنمون هایی از سنگ های دگرگون پرکامبرین سازند کهار و کربنات ها و دولومیت های سازند روت به سن پرمین هستند که با مرزهای گسلی در بخش جنوب باختر حوضه قرار گرفته اند [۱۱]. رخنمون هایی از واحدهای آواری الیگوسن سازندهای قرمز زیرین و آهک های الیگوسن-میوسن سازند قم نیز در دو طرف بخش جنوبی حوضه دیده می شود (شکل ۱). این توالی رسوبی سنوزوئیک (الیگوسن تا پلیوسن-کواترنری) که رخنمون های غالب منطقه را تشکیل می دهد، نشانگر چند رخداد پس روی دریا، خشکی زایی و ایجاد سطوح ناپوستگی است که با کنگلومراهای پیشروی دریای بعدی پوشیده می شوند [۲۹]. تناوب گدازه ها و آذرآواری های ناشی از فعالیت های گسترده آتش فشانی ائوسن تا اواخر الیگوسن با یک سطح ناپوستگی و کنگلومراهای پیشروی دریای الیگوسن پایانی، پی سازند قرمز زیرین پوشیده شده اند و با افزایش عمق حوضه مارن های خاکستری الیگوسن پایانی و آهک های الیگوسن-میوسن سازند قم بر روی آنها شکل گرفته اند. پس از آن پس روی دریا سبب شد تا



شکل ۲: نمای رو به شمال از گسله فشارشی مرز خاوری (الف) و باختری (ب) حوضه ماهنشان-میانه. خمیدگی واحدهای جوان پلیوسن-کواترنری (PI-Q) در فرودبواره گسله های مرزی و راندگی لایه های کهن تر به سن میوسن سازند قرمز بالای (MURF) در تصویر مشخص است.

۳- ساختارهای درون حوضه

۳-۱- چین خوردگی

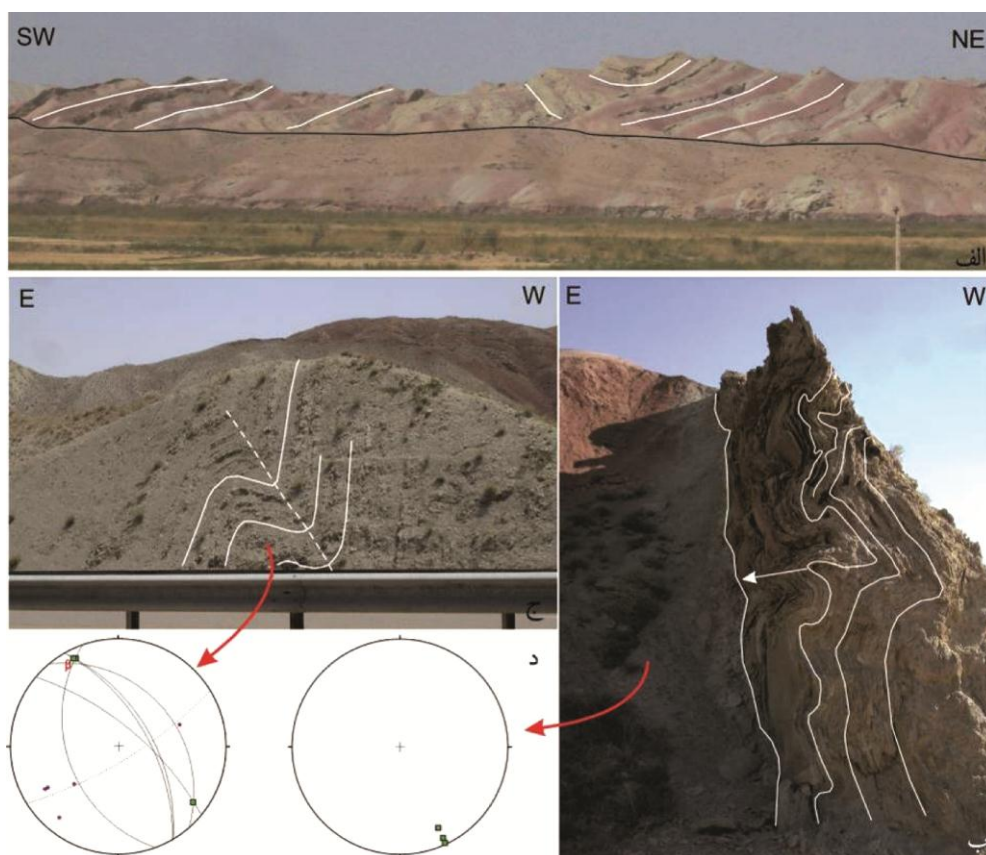
به سبب اختلاف رنگ شاخص در تناوب سنگی سازند قرمز بالایی، الگوی چین خوردگی گستره حوضه ماهنشان به زیبایی در تصویرهای ماهواره‌ای دیده می‌شود. بررسی تصویرهای ماهواره‌ای و برداشت‌های میدانی وجود دو گامه چین خوردگی را در این حوضه نشان می‌دهد.

۳-۱-۱- گامه اول چین خوردگی

این چین خوردگی‌ها که در ارتباط با گسل‌های راندگی و از نوع چین‌های خم گسل و چین‌های جدایشی [۳۳] هستند، در واحدهای سنگی میوسن و کهن‌تر از آن دیده می‌شوند که در این پژوهش «چین‌های گامه اول» نامیده می‌شوند. شواهد این

دگرریختی در نهشته‌های آواری جوان‌تر (پلیوسن)، که با یک مرز ناپیوسته لایه‌های چین خورده میوسن را می‌پوشانند، وجود ندارد و بنابراین، برای رخداد این گامه از چین خوردگی، سن پیش از پلیوسن پیشنهاد می‌شود. راستای عمومی این گامه، هم‌راستا با مرزهای خاوری و باختری حوضه، شمال باختر- جنوب خاور است (شکل ۱).

وجود لایه‌های تبخیری بخش زیرین سازند قرمز بالایی نقش اساسی در کنترل سازوکار جدایشی و تشکیل چین خم گسله در این گامه چین خوردگی داشته است [۲۹، ۳۳]. بنا بر یافته‌های باقرنژاد و همکاران در سال ۱۳۹۳ [۳۳]، چین‌های گامه اول بیشتر شامل مجموعه‌ای از طاق‌دیس‌ها و ناودیس‌های نامتقارن عادی تا برگشته با سطوح محوری پرشیب هستند (شکل ۳).



شکل (۳): الف) نمای از یک ناودیس گامه اول در سازند قرمز بالایی (URF). ب) نمای رو به جنوب از چین‌های جدایشی^۱ گامه اول در لایه‌های ژیس سازند قرمز بالایی. ج و د) چین‌های پارازیتی واقع در پهلو چین‌های گامه اول و شبکه استریوگرافیک مربوطه. مربع‌های سبز محور چین (د) شبکه استریوگرافیک سمت راست، نقاط بنفش قطب لایه‌بندی (د) شبکه استریوگرافیک سمت چپ) و دوائر بزرگ لایه‌بندی را برای لایه‌های ژیس (ج) و مارن (د) نشان می‌دهند.

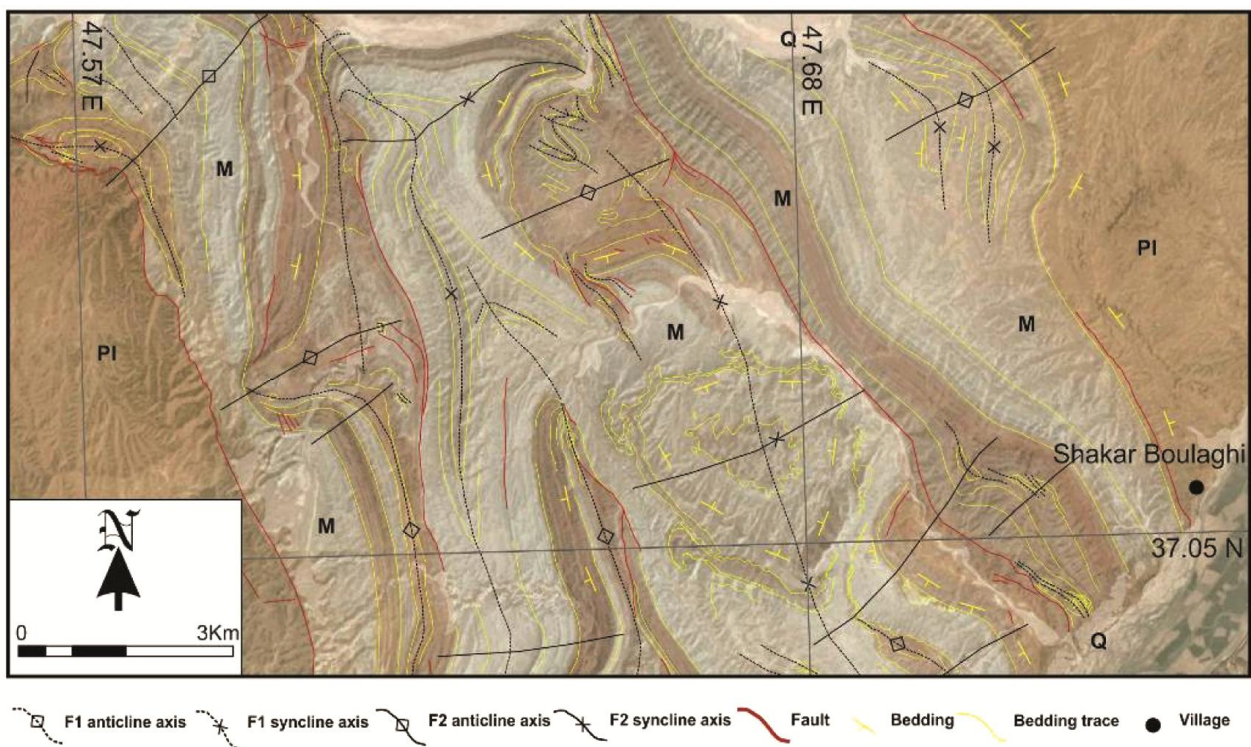
دیگری با روند محوی شمال‌خاور- جنوب‌باختر تا شمال-شمال‌خاور، جنوب- جنوب‌باختر است. از آنجا که این گامه واحدهای جوان پلیوسن را نیز در بخش‌های مرزی گستره حوضه ماهنشان- میانه متأثر کرده است (شکل‌های ۴ و ۵)، رخداد آن را می‌توان به پس از پلیوسن نسبت داد.

بررسی تغییر راستای اثر محوری چین‌های گامه اول و راستای لایه‌بندی در بخش‌های میانی و شمالی حوضه ماهنشان- میانه، شواهد الگوی تداخلی حوضه^۲ و گنبد^۳ و بومرنگی^۴ چین خوردگی فرانهاده^۵ را به زیبایی نشان می‌دهد (شکل‌های ۴ و ۵). الگوی تداخلی حوضه و گنبد به ویژه در بخش میانی حوضه ماهنشان- میانه، در فاصله پنج کیلومتری باختر روستای شکر بلاغی، دیده می‌شود؛ یک حوضه با ساختار گرد که جهت شیب لایه‌بندی‌های پیرامون آن رو به درون حوضه است. در شمال این ساختار، یک گنبد در تقاطع اثر محوری طاق‌دیس‌های دو گامه اول و دوم

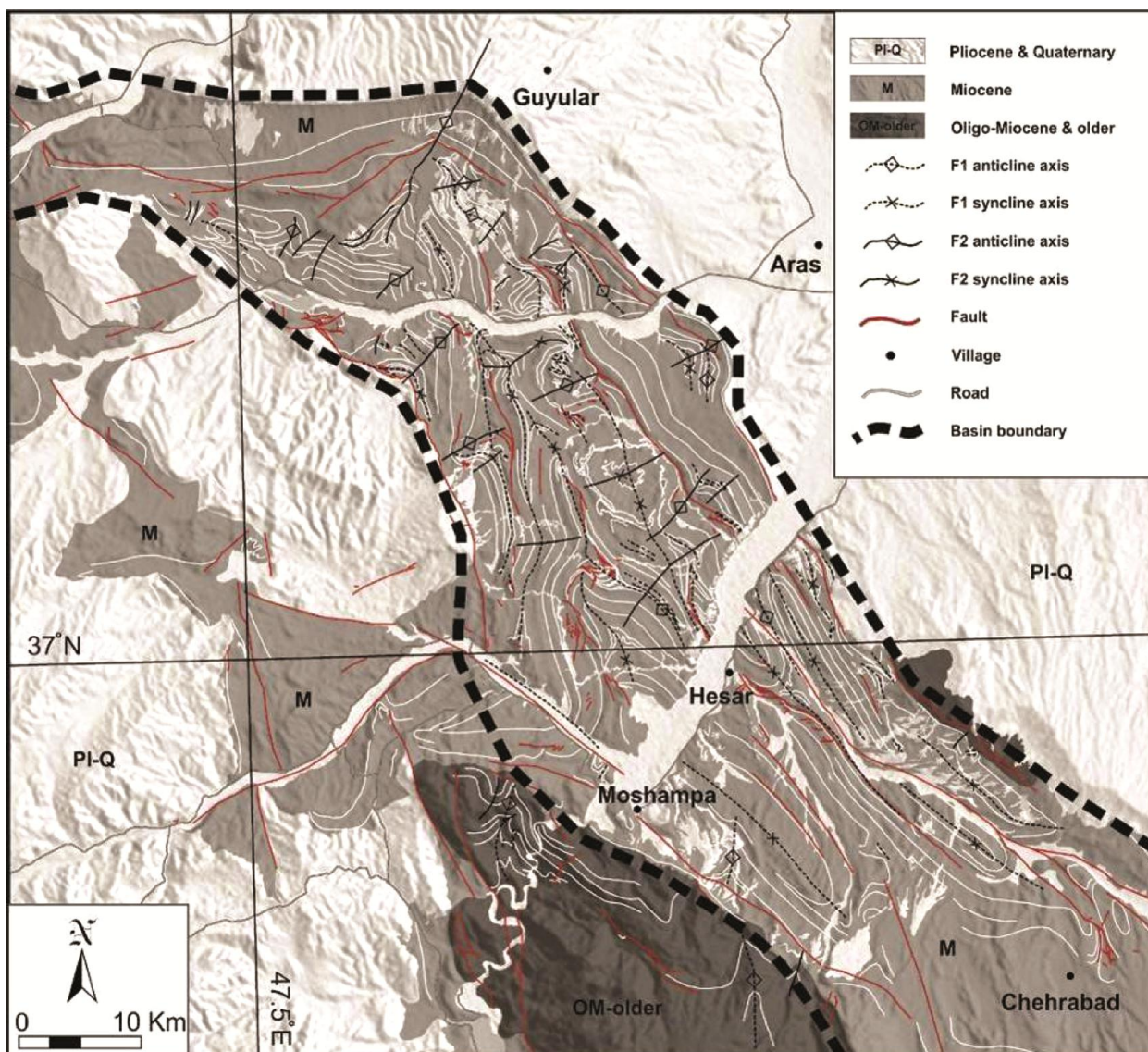
به سبب فرسایش زیاد منطقه و نیز تأثیر گسله‌ها، بخش هسته طاق‌دیس‌ها با لایه‌بندی بسیار پرشیب در سطح رخنمون یافته‌اند. لغزش‌های میان‌لایه‌ای ناشی از حضور لایه‌های تبخیری سبب تشکیل چین‌های پارازیتی در پهلو و هسته چین‌های گامه اول شده است که به‌ویژه در هسته چین‌های اصلی، در تصویرهای ماهواره‌ای قابل تشخیص است. چین‌های پارازیتی اندازه‌گیری شده در پهلو چین‌های اصلی روند محوری همانند چین‌های بزرگ‌مقیاس منطقه دارند (شکل ۳).

۳-۱-۲- گامه دوم چین خوردگی

الگوی اثر محوری چین‌های گامه اول در بخش جنوبی گستره ساده‌تر از بخش‌های دیگر است (شکل ۱). در میانه‌ی حوضه به تدریج تغییری در روند محور چین‌ها دیده می‌شود. بررسی دقیق‌تر این تغییر روندها الگوی سامانندی را در این پهنه آشکار می‌کند که نشان‌دهنده‌ی وجود گامه چین خوردگی



شکل (۴): تصویر ماهواره‌ای گوپا شده Google Earth از بخش میانی حوضه رسوبی سنوزوئیک ماهنشان (موقعیت تصویر بر روی شکل (۱) مشخص شده است). الگوهای تداخلی گونه ۱ و ۲ بر روی تصویر دیده می‌شود. برای توضیح بیشتر به متن مراجعه شود.



شکل (۵): نقشه ساختارهای حوضه رسوبی ماهشان - میانه، ترسیم شده بر پایه تصاویر ماهواره‌ای Google Earth. اثر محوری چین‌های گامه اول و دوم بر روی نقشه مشخص شده است.

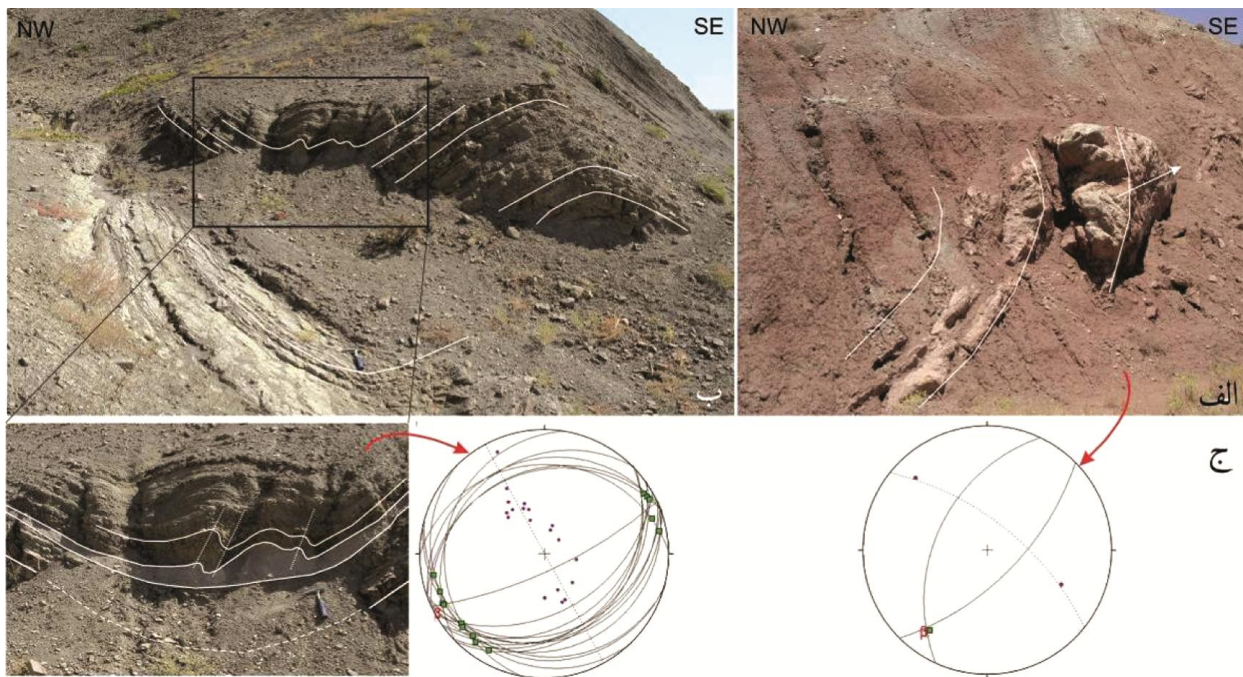
دارند. همانند چین‌های گامه اول، لایه‌های نامقاوم مارنی و تبخیری‌ها نقش کنترل‌کننده‌ای در توزیع و هندسه این چین‌ها دارند (شکل ۶).

۳-۲- گسله‌ها

بررسی تصاویر ماهواره‌ای و شواهد میدانی در راستای این پژوهش نشان می‌دهد که مرزهای خاوری و باختری حوضه رسوبی ماهشان - میانه گسلی هستند. این گسله‌ها در بخش‌های

تشکیل شده است. الگوی تداخلی بومرنگی در بخش‌هایی که سطح محوری چین‌های گامه اول مایل هستند در محل برخورد اثر محوری دو گامه چین‌ها دیده می‌شود (شکل‌های ۴ و ۵).

از شواهد دیگر گامه دوم، چین‌های فرعی هستند که در حدود سه کیلومتری باختر روستای دادلی در ترانسه‌های اتوبان زنجان - تبریز دیده می‌شوند. این چین‌ها سطح محوری قائم تا پرسیب و روند محوری شمال خاور موازی چین‌های گامه دوم



شکل (۶): چین‌های پارازیتی گامه دوم چین خوردگی به همراه شبکه استریوگرافیکی مربوطه. مربع‌های سبز محور چین، نقاط بنفش قطب لایه‌بندی و دایره بزرگ لایه‌بندی را نشان می‌دهند. الف) چین مزوسکوپی با پهلوی جنوب خاوری برگشته. فلش سفید رنگ به موازات محور چین رسم شده است. ب) چین‌های مزوسکوپی متقارن با سطح محوری شاقولی. ریز چین‌های نامتقارن در بخش هسته چین به سبب حضور لایه‌های نامقاوم ماری تشکیل شده‌اند.

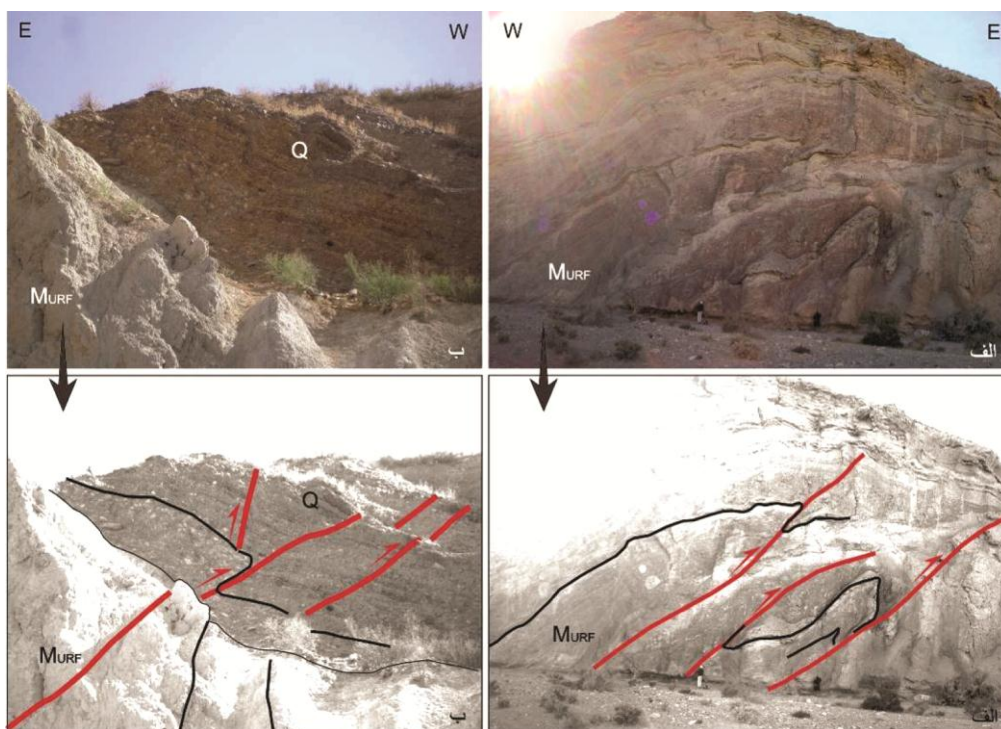
افزون بر گسله‌های مرزی و گسله‌های اصلی درون حوضه ماهنشان-میانه که همگی راستایی موازی چین‌های گامه اول و مرزهای حوضه دارند، گسله‌های فرعی با فراوانی و طول کمتر و راستای خاوری-باختری تا شمال خاور-جنوب باختر نیز در گستره حوضه دیده می‌شوند (شکل ۵). با توجه به سازوکار عمومی راستالغز این دسته از گسله‌ها و همخوانی راستای آنها با اثر محوری چین‌های گامه دوم، احتمال می‌رود تشکیل آنها در ارتباط با شکستگی‌های هم‌یوغ^۷ ناشی از افزایش کوتاه‌شدگی در پهلوی چین‌های گامه دوم باشد.

۴- وارون‌سازی داده‌های جنبشی گسله‌ها

برای درک بهتر تکوین دگرریختی گستره مورد بررسی علاوه بر تحلیل ساختارها، از وارون‌سازی داده‌های جنبشی گسله‌ها نیز استفاده شده است. لازم است خاطر نشان شود که به دلیل سنگ‌شناسی نامناسب منطقه، سطوح گسله‌های ایجاد شده

مختلف پرشیب تا شاقولی با شیب رو به درون حوضه هستند و با راندن واحدهای سنگی به سن میوسن سازند قرمز بالایی بر روی کنگلومرای پلیوسن، سبب خمش این واحدهای آواری در فرودپواره گسله شده‌اند (شکل ۲).

گسله‌های اصلی درون این حوضه نیز کم‌وبیش هم‌راستا با گسله‌های مرزی آن هستند (شکل ۵). این گسله‌ها که طول بیش از ۱۰ کیلومتر دارند در ابتدا از نوع فشاری و مسبب تشکیل چین‌های پیشروی گسله (شکل ۷) و چین‌های جدایشی رخداد گامه اول چین خوردگی‌ها در لایه‌های سازند سرخ بالایی، در اواخر میوسن بوده‌اند [۳۳]. شیب این گسله‌ها در بخش‌های مختلف گستره حوضه ماهنشان-میانه از شمال خاور تا شاقولی و جنوب باختر تغییر می‌کند. بررسی‌های میدانی حاضر، آثار چندین نسل لغزش جوان‌تر را نیز در این پهنه‌های گسلی نشان می‌دهد. بعضی از این گسله‌ها با سازوکار واژگون^۶ پادگانه‌های رودخانه‌ای و مخروط افکنه‌های کواترنری را بریده‌اند (شکل ۷-ب).

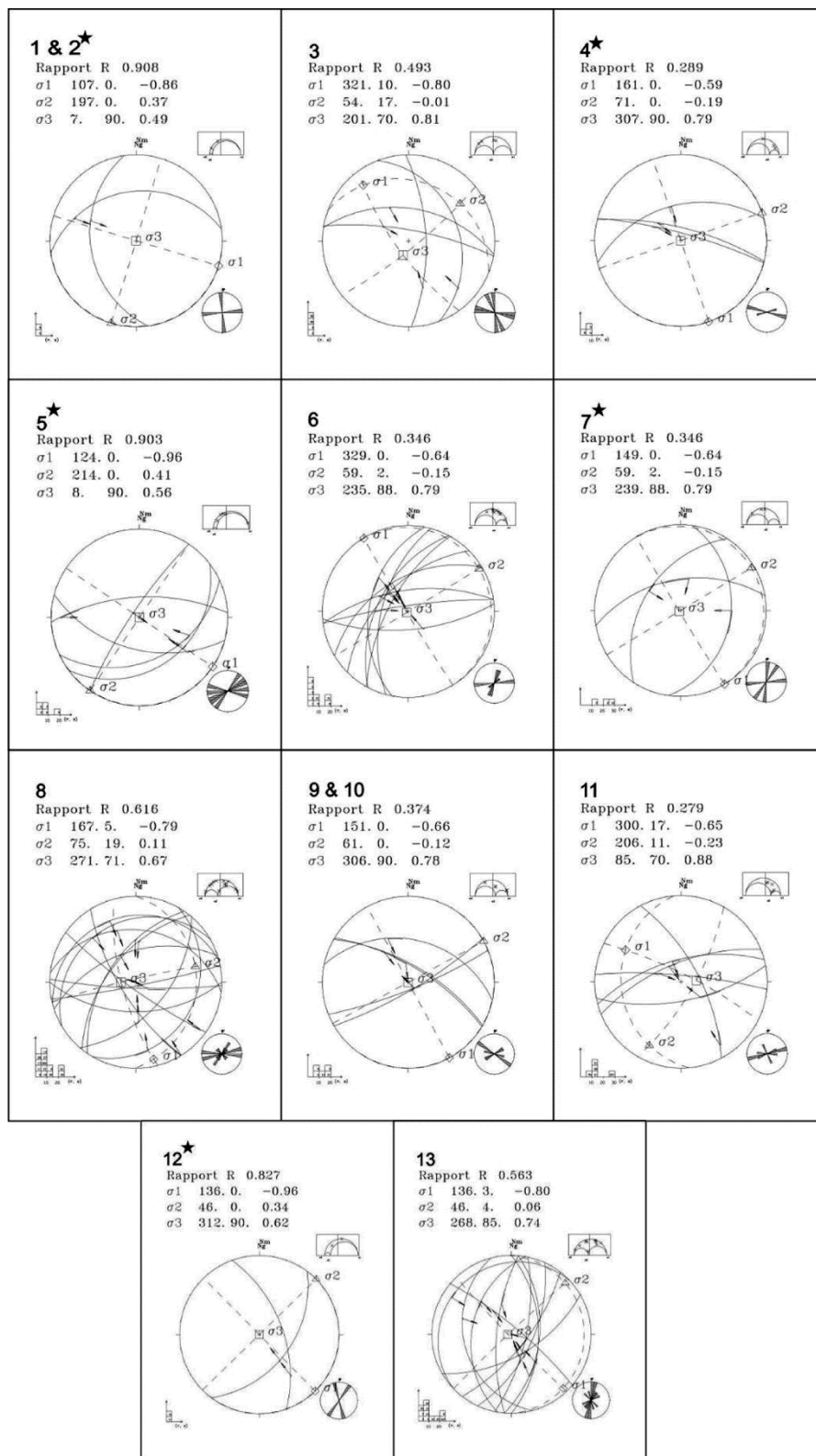


شکل (۲): الف) نمای رو به شمال از پهنه گسله فشارشی و چین‌های پیشروی گسله با راستای شمال باختر- جنوب خاور در لایه‌های سازند قرمز بالایی (MURF) داخل حوضه رسوبی ماهنشان- میانه. ب) نمای رو به جنوب از گسلش فشارشی در نهشته‌های آواری کواترنری (Q) در داخل حوضه رسوبی ماهنشان- میانه. خط‌های قرمز گسله‌ها و خط‌های سیاه اثر لایه‌بندی در واحدهای رسوبی را نشان می‌دهد.

در ایستگاه‌های مختلف مقایسه شدند. بر این اساس، ابتدا جوان‌ترین دسته داده‌ی گسترده پردازش شد [۱۱] که نتایج آن نشانگر یک رژیم تنش امروزی همگن با راستای بیشینه فشارش افقی شمال خاور- جنوب باختر (N049~) است. این وضعیت تنش در هم‌خوانی با تنش ناحیه‌ای متأثر از همگرایی عربستان- اوراسیا است [برای نمونه ۲-۳، ۵، ۱۵-۱۷، ۱۹، ۲۲-۲۵]. شواهد تنش دیرین نیز، کارسازی یک فشارش شمال باختری را نشان می‌دهد که به‌طور کامل با چین‌های گامه‌ی دوم همخوان است. شواهد این رژیم تنش فشارشی دیرین در ۱۳ ایستگاه به دست آمد (شکل‌های ۸ و ۹) (جدول ۱). برای ارزیابی کیفیت نتایج، از همخوانی سازوکار گسله‌ها با شکل میدان تنش [۳۵]، زاویه ناهمخوانی بردار لغزش اندازه‌گیری شده و محاسبه شده، همخوانی مکانیکی تانسور به دست آمده با داده‌های اندازه‌گیری شده و دستیابی به یک محور تنش اندرسونی استفاده شده است. نتایج نهایی که در جدول (۱) و شکل (۸) آورده شده است، تصویر استریو

در آنها به سرعت فرسوده شده و به ندرت آثار حرکتی و به‌ویژه سوی برش آنها حفظ شده است. از این رو، داده‌های اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه، پس از تلاش بسیار، کمتر از حد مورد انتظار بوده است. به هر حال داده‌های ارائه شده، انگشت‌شمار داده‌هایی است که در این منطقه اندازه‌گیری شده است. برداشت داده‌های گسلی (صفحه گسله و خش لغز روی آن) در ۲۵ ایستگاه انجام شد. در بیشتر ایستگاه‌ها، به سبب فرسایش کامل واحدهای جوان پلیوسن- کواترنری، شواهد گسلش تنها در واحدهای سنگی سازند قرمز بالایی قابل مشاهده است.

داده‌های برداشت شده با کمک نرم‌افزار Fcalc [۳۴] پردازش شدند. ابتدا داده‌های هر ایستگاه با توجه به سن واحدهای سنگی بریده شده در پهنه گسله، رابطه هم‌پوشی خش لغزش‌ها (برای صفحه‌های گسله با بیش از یک نسل لغزش)، وضعیت لایه‌بندی و توالی رخدادهای دگرریختی گسترده، از نظر سنی جداسازی شدند. پس از پردازش جداگانه‌ی دسته داده‌ها، نتایج به دست آمده



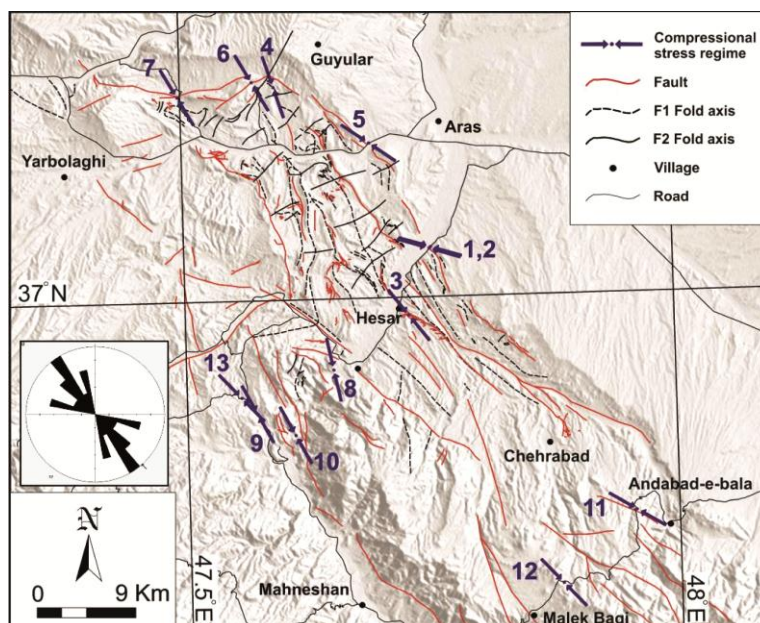
شکل (۸): نتایج رژیم تنش فشارشی به دست آمده از وارون سازی داده های سطوح گسله خش لغزدار در ۱۳ ایستگاه (محل ایستگاهها بر روی نقشه شکل (۹) آمده است). نتایج شامل استریوگرام نیمکره پایینی سطوح گسله خش لغزدار، موقعیت محورهای اصلی تنش، شکل میدان تنش (R) و هیستوگرام توزیع زاویه ناهمخوانی بردار لغزش اندازه گیری شده و محاسبه شده است. تنش های مقید شده (CF) با ستاره مشخص شده اند (به [۳۶] رجوع شود). اعداد ۱ تا ۱۳ نشان دهنده شماره ایستگاههایی که در جدول (۱) و شکل (۹) آورده شده است. برای توضیحات بیشتر به متن رجوع شود.

تنش دیرین به دست آمده در گستره حوضه رسوبی ماهنشان - میانه، در تمام ایستگاه‌ها فشارشی، با راستای میانگین محور بیشینه فشارش افقی N138 (بازه نوسان‌های محلی N106 تا N167) و میانگین شکل میدان تنش (۰/۵۳) است. سن واحدهای سنگی در یکی از ایستگاه‌هایی که شواهد این نسل از تنش دیرین را نشان می‌دهند (ایستگاه شماره ۱۲) پلیوسن و در دو مورد (ایستگاه‌های ۲ و ۱۱) کواترنری است.

گرافیک صفحه‌های گسله و خش‌لغزش آنها در نیمکره زیرین، موقعیت محورهای اصلی تنش، نمودار موهر برای تنش سه محوره‌ی پیشنهادی، شکل میدان تنش (R)، نمودار توزیع زاویه ناهمخوانی بردار لغزش اندازه‌گیری شده و محاسبه شده و نمودار گل‌سرخ‌ی راستای صفحه‌های گسلی پردازش شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند (جدول ۱ و شکل ۹) رژیم

جدول (۱): ویژگی‌های تانسور تنش دیرین به دست آمده از وارون‌سازی داده‌های جنبشی گسله‌ها در گستره ماهنشان - میانه. داده‌ها شامل شماره ایستگاه، روند و میل محورهای اصلی تنش (σ_1 تا σ_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 CF معرف تانسورهای محاسبه شده با کمتر از چهار راستای گسلی است که با یک محور تنش شاقولی مقید شده است (به [۳۶] رجوع کنید)، 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.

Formation Age	Modern Stress Axis (trend/plunge)								Site Number
	Rm	Q	N _t	N	R	σ_3	σ_2	σ_1	
Miocene	C	CF	23	2	0.81	007/90	197/00	107/00	1
Quaternary	C	CF	23	2	0.81	007/90	197/00	107/00	2
Miocene	C	C	46	4	0.49	201/70	054/17	321/10	3
Miocene	C	CF	6	3	0.29	307/90	071/00	161/00	4
Miocene	C	CF	28	5	0.90	008/90	214/00	124/00	5
Miocene	C	A	9	9	0.35	235/88	059/02	329/00	6
Miocene	C	CF	4	3	0.35	239/88	059/02	149/00	7
Miocene	C	B	33	13	0.62	271/71	075/19	167/05	8
Miocene	C	C	6	5	0.38	306/90	061/00	151/00	9
Miocene	C	C	5	5	0.37	306/90	061/00	151/00	10
Quaternary	C	B	63	5	0.28	085/70	206/11	300/17	11
Pliocene	C	CF	13	2	0.83	312/90	046/00	136/00	12
Miocene	C	A	28	11	0.56	268/85	046/04	136/03	13



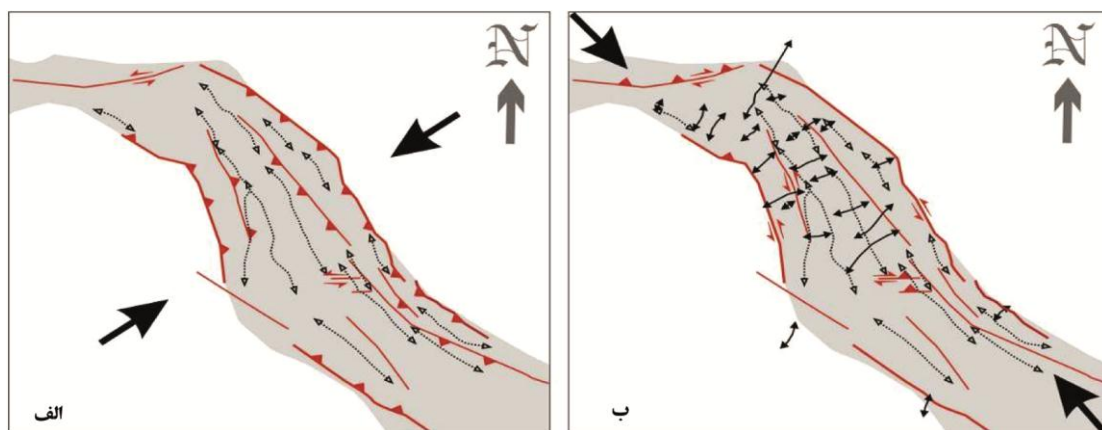
شکل (۹): نقشه راستای محور تنش بیشینه افقی (محور فشارش) دیرین حاکم در پلیوسن - کواترنری، به همراه نمودار گل‌سرخ‌ی راستای تنش بیشینه افقی (به جدول (۱) و شکل (۸) رجوع شود).

۵- بحث

این چین خوردگی که با راستای محوری شمال خاور- جنوب باختر مشخص است، واحدهای پلیوسن و کهن تر را متأثر کرده است. از سوی دیگر، وارون سازی داده های جنبشی گسله ها نیز تنش دیرین پلیوسن-کواترنری گستره ماهنشان-میانه را فشارشی با راستای محور تنش بیشینه افقی شمال باختر- جنوب خاور (میانگین N138) نشان می دهد (شکل ۹). این راستا با نتایج تحلیل تنش دیرین در پهنه گسله سلطانیه [۱۰] در جنوب خاور گستره ماهنشان-میانه نیز همخوان است. این تنش فشارشی چین های با راستای شمال خاور- جنوب باختر گامه دوم را در گستره ماهنشان ایجاد کرده که فرانهادگی آنها بر روی گامه اول سبب تشکیل الگوهای تداخلی گونه ۱ و ۲ شده است (شکل ۱۰-ب). از آنجا که سن واحدهای سنگی در ایستگاه هایی که داده های جنبشی گسله های آنها شواهد تنش فشارشی شمال باختر- جنوب خاور را نشان داده اند، در دو مورد کواترنری، در یک مورد پلیوسن و در سایر موارد میوسن بوده است (جدول ۱)، و با توجه به تأثیر گامه دوم چین ها بر لایه های به سن پلیوسن، این رخداد را می توان به پایان پلیوسن- اوایل کواترنری نسبت داد. این تنش، که در این مقاله به آن پرداخته شده است، پیش از تنش امروزی با راستای فشارش شمال خاور- جنوب باختر [۱۱] بر گستره ماهنشان-میانه چیره بوده است.

در حوضه رسوبی ماهنشان-میانه واحدهای سنگی سازند قرمز بالایی به سن میوسن رخنمون دارند که با چین خوردگی مرتبط با گسله، از نوع چین های پیشروی گسله و چین های جدایشی، دگرریخت شده اند [۳۳]. راستای اثر محوری این چین خوردگی ها شمال باختر- جنوب خاور و هم راستا با گسله های مرزی خاوری و باختری حوضه هستند. از این رو، تشکیل آنها را می توان ناشی از یک رخداد دگرریختی واحد دانست. سن سنجی های اخیر [۳۲]، سن بالاترین افق های چین خورده سازند سرخ بالایی را میوسن میانی (Ma) 15.6 ± 1.4 نشان می دهد. از آنجا که واحدهای سنگی آواری (بیشتر کنگلومرای) به سن میوسن پایانی (Ma) 10.7 ± 0.2 [۳۲] با یک مرز ناپوستگی زاویه دار بر روی لایه های سازند قرمز بالایی نشسته اند و آثار دگرریختی اشاره شده را نشان نمی دهند، رخداد گسلش واژگون و چین خوردگی مرتبط با آن (گامه اول چین خوردگی) را می توان ناشی از فشارش شمال خاور- جنوب باختری فازهای اواخر کوهزاد آپی در زمان میوسن میانی دانست (شکل ۱۰-الف).

بررسی تصویرهای ماهواره ای و برداشت های میدانی آثار گامه چین خوردگی جوان تری را نیز در این گستره نشان می دهد.



شکل (۱۰): مدل جنبشی ساده شده حوضه رسوبی ماهنشان-میانه. پیکان های بزرگ راستای میانگین فشارش حاکم در زمان اواخر میوسن، قبل از ۱۰/۷ میلیون سال (الف) و پلیوسن-کواترنری (ب) را در گستره ماهنشان-میانه نشان می دهند. الف) فشارش شمال خاور ناشی از فاز تکتونیکی اواخر میوسن سبب تشکیل گسله های فشاری با راستای شمال باختر- جنوب خاور و چین های مرتبط با آن شده است. ب) تغییر میدان تنش در زمان پلیوسن-کواترنری به تنش بیشینه افقی شمال باختر- جنوب خاور سبب فرانهاد شدن چین های راستای شمال خاور- جنوب باختر بر روی گامه اول چین ها و ایجاد الگوهای تداخلی گونه ۱ و ۲ در گستره حوضه ماهنشان-میانه شده است که در این مقاله به آن پرداخته شده است.

5. 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.
6. Javidfakhr, B., Bellier, O., Shabanian, E., Siame, L., Léanni, L., Bourlès, D., and Ahmadian, S. (2011) Fault kinematics and active tectonics at the southeastern boundary of the eastern Alborz (Abr and Khij fault zones): geodynamic implications for NNE Iran. *Journal of Geodynamics*, **52**(3–4), 290–303.
7. Regard, V., Bellier, O., Thomas, J.-C., Abbassi, M.R., Mercier, J., Shabanian, E., Fegghi, K., and Soleymani, S. (2004) Accommodation of Arabia-Eurasia convergence in the Zagros-Makran transfer zone, SE Iran: A transition between collision and subduction through a young deforming system. *Tectonics*, **23**, TC4007.
8. Dolati, A. and Burg, J.P. (2013) 'Preliminary fault analysis and paleostress evolution in the Makran Fold-and-Thrust Belt in Iran'. In: *Lithosphere Dynamics and Sedimentary Basins: The Arabian Plate and Analogues*, Part of the series Frontiers in Earth Sciences, 261-277.
9. Kargaranbafghi, F., Franz Neubauer, F., and Genser, J. (2011) Cenozoic kinematic evolution of southwestern Central Iran: Strain partitioning and accommodation of Arabia-Eurasia convergence. *Tectonophysics*, **502**, 221-243.
10. Salmanlu, A. (2015) *Late Cenozoic Change in the Stress State of the Zanjan Region; Implications for the Geodynamics of NW Iran*. B.Sc. Thesis, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, 193 p (in Persian).
11. Aflaki, M., Shabanian, E., Dvoodi, Z. (2016) Quaternary stress state in Mahnesan-Mianeh Cenozoic sedimentary basin (NW Iran), deduced from fault kinematics data. 34th Geosciences congress, *Geological Society of Iran*, Tehran (in Persian).
12. Ghods, A., Shabanian, E., Bergman, E., Faridi, M., Donner, S., Mortezaejad, G., and Aziz-Zanjani, A. (2015) The Varzaghan-Ahar, Iran, Earthquake Doublet (Mw 6.4, 6.2): implications for the

۶- نتیجه گیری

بررسی الگو و هندسه چین خوردگی ها به کمک تصویرهای ماهواره‌ای و برداشت‌های میدانی نشان داد که علاوه بر چین‌های مرتبط با گسله که در اواخر میوسن در حوضه رسوبی ماهنشان-میانہ توسعه یافته‌اند [۳۳]، گامه چین خوردگی جوان تری نیز با راستای شمال‌خاور- جنوب‌باختر در بازه زمانی پلیوسن تا کواترنری بر روی آنها فرانهاده شده است. برداشت ویژگی‌های هندسی و جنبشی گسله‌ها و وارون‌سازی داده‌های جنبشی آنها در راستای این پژوهش، گویای وجود یک رژیم فشارشی دیرین با راستای محور بیشینه فشارش افقی شمال‌باختر- جنوب‌خاور (میانگین N138E) است که در بازه زمانی پلیوسن- کواترنری و پیش از سامانه تنش امروزی، با راستای شمال‌خاور- جنوب‌باختر [۱۰]، در حوضه رسوبی ماهنشان- میانہ چیره بوده است. جالب این که نمونه چنین تغییر تنشی با الگو و بازه سنی همانند از شمال خاور ایران (کپه‌داغ) تا شمال ایران (البرز) گزارش شده است [۵-۶، ۳۷-۳۹].

مراجع

1. Authemayou, C., Chardon, D., Bellier, O., Malekzadeh, Z., Shabanian, E. and Abbasi, M.R. (2006) Late Cenozoic partitioning of oblique plate convergence in the Zagros fold-and-thrust belt (Iran). *Tectonics*, **25**, TC3002.
2. Navabpour, P., Angelier, J., and Barrier, E. (2007) Cenozoic post-collisional brittle tectonic history and stress reorientation in the High Zagros Belt (Iran, Fars Province). *Tectonophysics*, **432**, 101–131.
3. 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.
4. Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M.R., and Sabouri, J. (2006) Inversion tectonics in central Alborz, Iran. *Journal of Structural Geology*, **28**, 2023-2037.

- F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. and Karam, G. (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.
20. Regard, V., Hatzfeld, D., Molinaro, M., Aubourg, C., Bayer, R., Bellier, O., Yamini-Fard, F., Peyret, M., and Abbasi, M. (2009) The transition between Makran subduction and the Zagros collision: recent advances in its structure and active deformation. *Geological Society, London, Special Publications*, **330**, 43-64.
21. Vernant, P. and Chery, J. (2006) Low fault friction in Iran implies localized deformation for the Arabia-Eurasia collision zone. *Earth and Planetary Science Letters*, **246**, 197-206.
22. 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.
23. Mousavi, Z., Walpersdorf, A., Walker, R.T., Tavakoli, F., Pathier, E., Nankali, H., Nilfouroushan, F., and Djamour, Y. (2013) Global Positioning System constraints on the active tectonics of NE Iran and the South Caspian region. *Earth and Planetary Science Letters*, 287-298.
24. Zarifi, Z., Nilfouroushan, F., and Raeesi, M. (2014) Crustal Stress Map of Iran: Insight from Seismic and Geodetic Computations. *Pure and Applied Geophysics*, **171**, 1219-1236.
25. 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.
26. Allen, M.B., Ghassemi, M.R., Shahrabi, M., and Qorashi, M. (2003) Accommodation of late geodynamics of northwest Iran. *Geophysical Journal International*, **203**, 522-540.
13. Azad, S.S., Ritz, J.F., and Abbassi, M.R. (2011) Left-lateral active deformation along the Moshā-North Tehran fault system (Iran): Morphotectonics and paleoseismological investigations. *Tectonophysics*, **497**(1), 1-14.
14. Azad, S.S., Philip, H., Dominguez, S., Hessami, K., Shahpasandzadeh, M., Foroutan, M., Tabassi, H., and Lamothe, M. (2015) Paleoseismological and morphological evidence of slip rate variations along the North Tabriz fault (NW Iran). *Tectonophysics*, **640**, 20-38.
15. Nilfouroushan, 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 Chery, J. (2003) GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran. *Journal of Geodesy*, **77**, 411-422.
16. Vernant, P., Nilfouroushan, 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.
17. 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.
18. Regard, V., Bellier, O., Thomas, J.-C., Bourlès, D., Bonnet, S., Abbassi, M.R., Braucher, R., Mercier, J., Shabani, E., Soleymani, Sh., and Feghhi, Kh. (2005) Cumulative right-lateral fault slip rate across the Zagros-Makran transfer zone: role of the Minab-Zendan fault system in accommodating Arabia-Eurasia convergence in southeast Iran. *Geophys. J. Int.*, **162**, 177-203.
19. Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov,

- uncritical use of inverse methods. *Bull. Soc. Geol. France*, **164**, 519-531.
36. 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.
37. Abbasi, M.R. and Shabanian, E. (1999) Evolution of the stress field in Tehran region during the quaternary. *Proceeding of Third International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE-3)*, 67-84.
38. Abbasi, M.R. and Shabanian, E. (2005) Determination of stress state and direction by inversion of fault-slip data in the southern flank of Central Alborz. *Geosciences*, **55**, 2-18 (in Persian).
39. Abbasi, M.R., Mokhtari, H. (2016) Investigation of Morphological Features and Faulting Mechanisms of NW-Striking Faults Affecting Alluvial Deposits in Tehran's Piedmont. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **3**(1), 1-15.
- Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology*, **25**, 659-672.
27. Ritz, J., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S., and Vernant, P. (2006) Active transtension inside central Alborz: A new insight into northern Iran-southern Caspian geodynamics. *Geology*, **34**, 477-480.
28. Westaway, R. (1994) Present-day kinematics of the Middle East and eastern Mediterranean. *J. Geophys. Res.*, **99**(B6), 12071-12090.
29. Afshar, F.A. (1965) Geology of Mianeh district of Northwestern Iran. *Bull. Min. Res. Expl. Inst. Turkey*, **64**, 57-72.
30. Emami, M.H. (1990) Geological map of Mianeh quadrangle. *Geological Survey of Iran*, Tehran, scale 1:100,000.
31. Lotfi, M. (2001) Geological map of Mahnesan quadrangle. *Geological Survey of Iran*, Tehran, scale 1:100,000.
32. Ballato, P., Cifelli, F., Heidarzadeh, G., Ghassemi, M.R., Wickert, A.D., Hassanzadeh, J., Dupont-Nivet, G., Baling, P., Sudo, M., Zeilinger, G., Schmitt, A.K., Mattei, M., and Strecker, M.R. (2017) Tectono-sedimentary evolution of the northern Iranian Plateau: insights from middle-late Miocene foreland-basin deposits. *Basin Res.*, **29**(4), 417-446, doi:10.1111/bre.12180.
33. Baghernejhad, M., Ghassemi, M.R., and Oveisi, B. (2014) Detachment folding in Mianeh-Mahnesan area: Interaction between sedimentation in the Upper Red Formation basin and shortening. *Geosciences*, **24**(95), 169-180.
34. 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 icroseismicity of southern Peru. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **82**(1), 165-179.
35. Ritz, J.F. and Taboada, A. (1993) Revolution stress ellipsoids in brittle tectonics resulting from an

واژه‌نامه

Detachment Folds	۱- چین‌های جدایشی
Basin	۲- حوضه
Dome	۳- گنبد
Boomerange	۴- بومرنگی
Superimposed Folding	۵- چین خوردگی فرانهاده
Reverse	۶- واژگون
Conjugate	۷- هم‌یوغ

Signatures of Deformation Related to the Plio-Quaternary State of Stress in the Mahneshan–Mianeh Basin (NW Iran)

Mahtab Aflaki^{1*}, Esmail Shabanian², Zeinab Davoodi³

1. Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan.
*Corresponding Author, e-mail: aflaki@iasbs.ac.ir
2. Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan.
3. Assistant Professor, Department of Geology, Imam Khomeini International University, Qazvin.

Since the last two decades, the inversion of fault kinematics combined with geodetic and geophysical data has led to the better understanding of the geodynamics of the Arabia – Eurasia collision, as well as the tectonic history of Iran. These researches indicate that dynamics of ongoing deformation in the most parts of the Iranian plateau and surrounding deformation belts is controlled by the NNE- to NE-trending Arabia – Eurasia convergence. This general pattern of deformation has been affected by local- and regional-scale geodynamic elements (e.g., the rigid South Caspian Basin, Persian and Anatolian extruding blocks) producing complex stress and strain fields in distinct tectonic zones such as northwestern Iran and the region surrounding the South Caspian Basin. Accordingly, two drastically different stress fields prevail in either sides of the North Tabriz fault such that the NW-trending horizontal compression in the northern part changes into the NE direction in the southern regions; the type and boundary of this change remain unknown. Every kinematic and structural investigation in NW Iran would help to determine the boundary condition and characteristics of this significant geodynamic complexity. The Mahneshan–Mianeh Cenozoic basin, located at the transition of the two aforementioned tectonic provinces, is a key area providing crucial data for this geodynamic issue. This area, which is also called “Folded Miocene Belt”, is a NW-trending fault-bounded narrow basin developed in the hinterland of the NW-trending Zagros orogen. The Late Miocene detritic sedimentary sequence of the Upper Red Formation constitutes the dominant outcrops of the basin. The sequence is unconformably overlaid by Late Miocene conglomerate to Pliocene-Quaternary deposits. Main geological structures of the basin are NW-trending detachment folds evolved in the fault-related folds in hanging wall of shallow reverse faults. This structural assemblage has been produced and evolved by different stress states during the Late-Miocene compressional tectonic regime.

The original data presented in this paper are based on the remote-sensing analysis of satellite imageries and structural field surveys including the study of folding stages, folding interference patterns and faulting trends. These are complemented by the measurement of folds geometry and fault kinematics data collected in 25 sites throughout the area of interest. The inversion of fault kinematics data allowed us to investigate the post-Miocene tectonic regimes affecting the area. The sorting and separation of the kinematics data has been done considering relative age relationships of fault planes and their striations (e.g. using cross-cutting and superposition relationships). F-CALC software is used for the inversion analysis, with especial attentions to the rules of data separation, rotation and geological considerations recommended in fault inversion processes.

The inversion of fault slip data related to the youngest tectonic regime leads to the determination of the present-day state of stress characterized by a NE-trending maximum horizontal compression. The penultimate Pliocene – Quaternary state of stress (paleostress field) was investigated after the removing of kinematic signatures of the youngest tectonic regime. The Pliocene – Quaternary paleostress state is characterized by a compressional tectonic regime with ~N138E direction of maximum horizontal compression, which is compatible with the results of previous researches in surrounding areas.

The study of surface folding patterns and geometry of folds indicates superposition of the Late-Miocene NW-

trending fold set by a younger sub-vertical NE-trending fold set. This second folding stage is especially developed in northern and central parts of the basin, in Pliocene – Quaternary geological units. Superposition of these folding geometries results in the formation of basin and dome and boomerang interference patterns, which are clearly visible in satellite imageries. The penultimate Pliocene – Quaternary stress field (NW-trending compression) is responsible for the formation of the last NE-trending folding stage. This paleostress field was changed into a modern compressional stress state characterized by a NE-trending regional compression. The modern stress state of the Mahneshan – Mianeh basin is well consistent with the overall direction of the Arabia – Eurasia convergence and clearly discriminates the ongoing kinematic characteristics of the area of interest from the region to the north of the North Tabriz fault. This puts the boundary of these distinct tectonic domains to the vicinity of the North Tabriz fault.

Keywords: Paleostress, NW Iran, Mahneshan–Mianeh, Fault Kinematics, Folding Superposition.