

مقایسه سازوکارهای گسله‌های فعال در ترانشه‌های دیرینه لرزه‌شناسی و سازوکارهای کانونی در جنوب البرز مرکزی

محمد رضا عباسی^{*۱}

^۱ دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۹)

چکیده

صفحه‌های گسلی از سه ترانشه (مطالعات دیرینه لرزه‌شناسی) با سن‌های پلیاستوسن جوان و هولوسن با سازوکارهای کانونی مقایسه شده‌اند تا ارتباط میان این دو داده مشخص شود. نشان داده شده که ارتباط مستقیم میان داده‌های سطحی (گسله‌ها و خش‌خط آنها) و داده‌های عمقی (سازوکار کانونی) وجود دارد. تانسور تنش با اندازه‌گیری‌های سطحی از سه ترانشه راندگی شمال تهران، مشا و فیروزکوه به دست آمد. از تانسور تنش محاسبه شده، صفحه‌های گسلی‌ای انتخاب شدند که با روند عمومی گسله‌های مشا و فیروزکوه همسو هستند. این داده با سازوکارهای کانونی همخوانی خوبی دارد. در ترانشه سوم که داده‌ها برای حل تانسور تنش کافی نیستند، با تعیین اندازه میانگین روند، شیب و شیب خش‌خطها (ریک)، در جایی که آرامش لرزه‌ای برقرار است سازوکار کانونی دیرینه پیشنهاد شد. براساس یافته‌های سطحی و سازوکارهای کانونی، بیشینه تنش افقی ($\sigma_1 \sim N45 \pm 5$) و تنش کمینه (σ_3) شیب نزدیک به افق دارند و محور تنش میانی (σ_2) عمود بر زمین با رژیم زمین‌ساختی راستالغز است.

گسله مشا با روند ($N100E$) و شیب به سوی شمال، سازوکار راستالغز چپ‌بر و یک مؤلفه کوچک کششی دارد که در پایانه خاوری خود به گسله فیروزکوه با روند ($N60E$) و شیب به سوی جنوب با سازوکار راستالغز همراه با یک مؤلفه فشاری می‌پیوندد.

واژه‌های کلیدی: البرز مرکزی، تهران، تنش امروزین، گسله‌های فعال، سازوکار، رژیم زمین‌ساختی

۱ مقدمه

سازوکار کانونی به دست آمده از زمین لرزه های بزرگ و خرد لرزه ها - که یکی از داده های مهم در تفسیرهای زمین ساختی است - فصل مشترک میان زمین شناسی و زلزله شناسی محسوب می شود. این داده ها به ویژه در توضیح زمین ساخت فعال معنای بیشتری پیدا می کند.

شهر تهران با گسله های فعال آشنایی احاطه شده که به تفصیل درباره آنها بحث شده است (سلیمانی و همکاران، ۲۰۰۹؛ قاسمی و همکاران، ۲۰۱۴؛ نظری و همکاران، ۲۰۱۴) برای شناسایی بیشتر سازوکار برخی از این گسله ها و بررسی توالی رویدادهای تاریخی در آنها، مطالعات دیرینه لرزه شناسی انجام شده است.

آنچه کمتر از آن می دانیم، کمبود داده های دیرینه لرزه شناسی و داده های دستگاهی در شهر تهران است: با وجود ساخت و سازهای گسترده، اکنون انجام دادن کارهای دیرینه لرزه شناسی دشوار شده است. همچنین با وجود اینکه سازمان مدیریت بحران شهر تهران، تعدادی دستگاه لرزه نگاری نصب کرده است، داده های دستگاهی ثبت شده بسیار کم هستند و این کمبود باعث شده است سازوکارهای کانونی حل شده دقت کافی را نداشته باشند (یمینی فرد و همکاران، ۲۰۱۲ و سلطانی مقدم و همکاران، ۲۰۱۸).

برای جبران کمبود داده های سازوکار کانونی می توان از داده های غیرمستقیم حاصل از مطالعات زمین شناسی به عنوان جایگزین استفاده کرد. در این راستا نخست باید به دو پرسش پاسخ داد: الف) آیا اندازه گیری سطوح گسلی و بردارهای لغزش در سطوحی که نزدیک به سطح زمین هستند، می تواند بازتاب دهنده جنبش های لرزه ای در عمق زمین باشد؟ و ب) آیا محاسبات به دست آمده از تانسورهای تنش نوزمین ساختی می تواند پیشنهاد مناسبی برای سازوکارهای کانونی آتی ارائه کند؟ مطالعات مشابهی در ترکیه و یونان روی گسله های کششی صورت

گرفته و نزدیکی این دو داده مشخص شده است (هن کک، ۱۹۸۵؛ هن کک و بارکا، ۱۹۸۷ و استوارت و هن کک، ۱۹۸۸، ۱۹۹۰، ۱۹۹۱).

در این پژوهش سعی بر آن است که بخشی از پیوند میان زمین شناسی ساختاری و زلزله شناسی مشخص شود. چنانچه پیوندی میان داده های سطحی برداشت شده از سطوح گسلی و سازوکارهای کانونی به دست آمده از عمق برقرار باشد، استفاده از داده های سطحی می تواند کمبودهای لرزه ای را جبران کند یا دست کم راهنمایی باشد برای پژوهشگرانی که به حل سازوکار کانونی مبادرت می کنند؛ در این صورت هر تانسور تنش همسو با تنش امروزین و سازگار با رژیم زمین ساختی عهد حاضر، می تواند در برآورد گسله های فعال و سازوکار آنها نیز نقش داشته باشد. در مطالعه پیش رو، پس از مروری بر تحول میدان تنش کواترنری در البرز، داده های جنبشی گسله های فعال که در سه ترانسه برداشت شده است، با سازوکارهای کانونی مقایسه می شوند تا پاسخی برای پیوند میان داده های سطحی و عمقی داده شود. در گام بعدی، گسله های فعال دیگری بررسی می شوند که می توانند با سازوکارها و روندهای متفاوت کارسازی کنند.

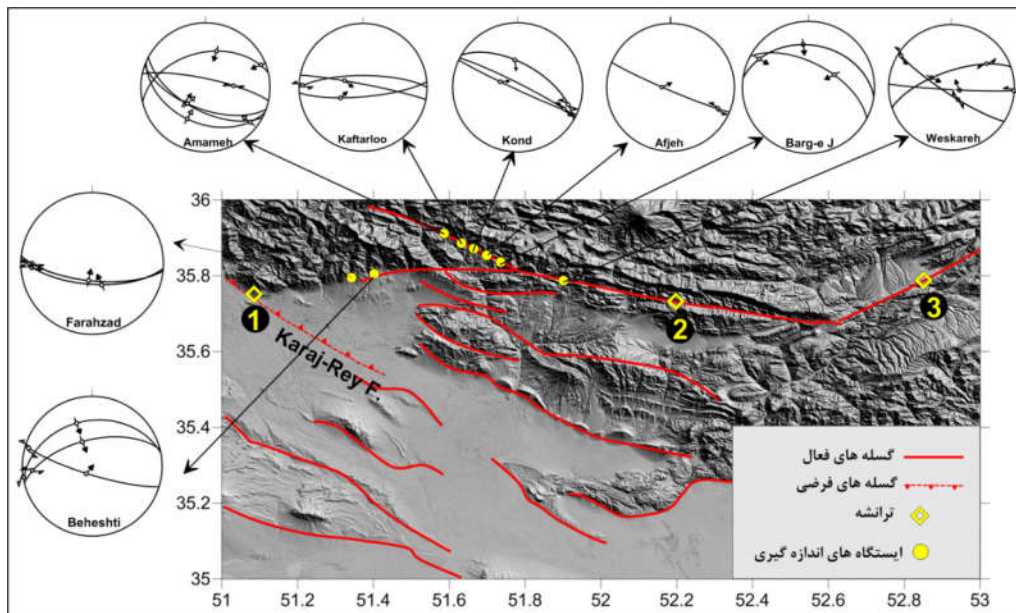
۲ مروری بر تحول کواترنری میدان تنش در البرز

دلیل اهمیت تحول میدان تنش در البرز وقتی آشکار می شود که به اولین نقشه های زمین شناسی، اغلب برای البرز مرکزی رجوع کنیم که دانشجویان دکترای زمین شناسی در دهه شصت میلادی، زیر نظر گانسر و اشتوکلین در سازمان زمین شناسی تهیه کردند. برای این زمین شناسان هر ناپیوستگی در سازندها با گسله توجیه می شد و همان طور که در نقشه های آنها دیده می شود، همه گسله ها از نوع فشاری هستند. دلیل آن را باید در ظرف زمانی خود دید. در دهه شصت میلادی، حرکت های افقی برای زمین شناسان ناشناخته بود و نظریه

بردارهای لغزش شاقولی، نسل قدیمی و بردارهای لغزش افقی، نسل جوان تر را به نمایش می‌گذارند. نام ایستگاه‌ها داخل شبکه نوشته شده است. لوزی‌های زردرنگ با شماره‌های ۱ تا ۳، محل ترانشه‌های مطالعه‌شده را نشان می‌دهند. نقشه گسله‌های فعال با تغییر، برگرفته از حسامی و جمالی (۲۰۰۶) است.

داده دیگری که می‌تواند به شناخت سازوکار گسله‌ها کمک کند، مطالعه جنبشی (Kinematic) و بازسازی تنش دیرین و امروزمین است. مطالعات جنبشی انجام شده در بیست سال گذشته نشان می‌دهند که کوتاه‌تر ایران به صورت ناباورانه‌ای پرجنبش بوده و در بازه زمانی سه و نیم میلیون سال پیش تاکنون، سه جهت تنش برقرار شده است (عباسی و شعبانیان، ۱۹۹۹، ۲۰۰۵). یک یافته مهم از تحول میدان تنش از مطالعه کپه داغ به دست آمد (شعبانیان و همکاران، ۲۰۰۹). در این مطالعه نشان داده شد که سه و نیم میلیون سال پیش، رژیم زمین‌ساختی تغییر کرده است.

زمین‌ناودیس (Geosyncline theory)، درک کلی را از دگرشکلی در سطح زمین تشکیل می‌داد. طبق این نظریه، حرکت‌های موجود در زمین فقط شامل جنبش‌های شاقولی بود. با شروع دهه هفتاد میلادی که شبکه‌های لرزه‌نگاری به اندازه کافی در سراسر زمین استقرار یافت، نظریه زمین‌ساخت ورقه‌ای جانی دوباره گرفت و این بدان معنی بود که زمین‌شناسان مجبور به پذیرش حرکت‌های افقی روی زمین شدند. از سوی دیگر، زمین‌شناسی ساختاری در ابتدای شکل‌گیری خود بود. با توجه به این واقعیت‌ها لازم است که بسیاری از نقشه‌های قدیمی بازنگری شوند. بهترین نمونه از این دست، سازوکار گسله مشا است که تا ده سال پیش به عنوان گسله فشاری شناخته می‌شد. با حل سازوکار کانونی و کارهای دیرینه‌لرزه‌شناسی، این گسله با سازوکار راست‌الغز چپ‌بر معرفی شد (ریتس و همکاران 2003، اشتري و همکاران 2005).



شکل ۱. نقشه برجسته منطقه مورد مطالعه، ایستگاه‌های اندازه‌گیری و سازوکارهای گسلی در تصویر شبکه استریونوت (نیمکره جنوبی).

معنای این جمله این است که تا قبل از سه و نیم میلیون سال پیش، رژیم زمین‌ساختی و سازوکار گسله‌ها از نوع فشاری بوده است. پس از این زمان، رژیم زمین‌ساختی راستالغز حاکم می‌شود و جنبش‌های شاقولی جای خود را به حرکت‌های افقی (راستالغز) می‌دهند. این داده در البرز مرکزی نیز تأیید شده است (عباسی و شعبانیان، ۲۰۲۰). مطالعات یادشده نشان دادند سه و نیم میلیون سال پیش، ابتدا تنش شمال‌باختری و بعد از آن، تنش شمالی-جنوبی برقرار شده و در پایان، پلاستوسن جوان تنش امروزین حاکم شده است. به گواه سازوکارهای کانونی به‌دست‌آمده در البرز، جهت این تنش شمال‌خاوری است و به گواه داده‌های سطحی حاصل از سطوح گسلی که با حل تانسور تنش به‌دست‌آمده‌اند، تنش شمال‌خاوری در رژیم زمین‌ساختی راستالغز فشاری حاکم شده است. مطالعات جنبشی انجام‌شده نشان می‌دهند که نخست سازوکارهای فشاری حاکم بودند (شکل ۱). در شش ایستگاه وسکاره، برگ جهان، افجه، کند، کفترو و امامه، نسل اول خط‌خس‌ها مؤید سازوکارهای فشاری است و نسل دوم نشان می‌دهد سازوکارهای راستالغز حاکم شده‌اند. همین رفتار در دو ایستگاه دانشگاه شهید بهشتی و فرحزاد نیز تأیید می‌شود (شکل ۱). ایستگاه شهید بهشتی در سازند آبرفتی هزار دره واقع شده است و همین واقعیت بیانگر موضوعی است که در بالا گفته شد. به بیان دیگر، زمانی که رژیم زمین‌ساختی فشاری هنوز در سازند هزار دره کارسازی می‌کرده و قبل از نهشته شدن سازند یخچالی پلاستوسن میانی- که سه و نیم میلیون سال پیش بوده است - سازوکار فشاری گسله‌ها جای خود را به سازوکارهای راستالغز داده است. این تغییرات که با نام تغییر جهت تنش معرفی شده است (در اصطلاح فنی با Reorganization شناخته می‌شود و در فارسی معادل مناسی ندارد)، به‌طور کلی به این معنا است که جهت حرکت صفحه‌های زمین‌ساختی تغییر کرده‌اند و سامانه

رژیم زمین‌ساختی دیگری از نو حاکم شده است. گسله‌های بریر، نیوشا و تنگه گلو با راستای باختر-شمال باختر و سازوکار راست‌گرد اکنون دیگر به‌عنوان گسله فعال کارسازی نمی‌کنند، اما همین روندها اکنون در بخش‌های کم‌ارتفاع البرز و بخش شمالی ایران مرکزی با سازوکار چیره فشاری فعال هستند. این تناقض در رفتار گسله‌ها در بخش‌های مختلف البرز مرکزی نشانه دیگری از تغییر جهت تنش است و همچنین می‌تواند نشانه‌ای از انتقال دگرشکلی از یال شمالی به یال جنوبی باشد. تغییر جهت حرکت ورقه‌های زمین‌ساختی، نخست با شناسایی تغییر جهت مسیر لکه‌های داغ شناسایی شد و بعد از آن به کمک مطالعات دیگری پیگیری شد. علت این تغییرات هنوز ناشناخته است. این پدیده اثر خود را در داخل قاره‌ها نیز به جا می‌گذارد. برای زمان تغییر جهت ورقه‌های زمین‌ساختی تاکنون عددهای صد میلیون سال پیش (ماتیوز و همکاران، ۲۰۱۲)، پنجاه میلیون سال پیش (مولر و همکاران، ۲۰۱۳) و پنج میلیون سال پیش (استرمن و همکاران، ۲۰۱۱) تعیین شده است. شناخت این تحولات به‌خصوص در پهنه فعالی چون ایران، ما را در مطالعات نوزمین‌ساختی راهنمایی می‌کند. برای مثال، بسیاری از مطالعات انجام‌شده با برآورد جابه‌جایی تجمعی در راستای گسله مشا و تعمیم آن به شرایط امروزی، سعی بر تخمین آهنگ جابه‌جایی دارند. با دانستن تاریخ تحول میدان تنش یادشده، می‌توان دریافت که گسله مشا در سه و نیم میلیون سال پیش به‌صورت راست‌بر عمل کرده است (چالانکو، ۱۹۷۵). چالانکو برای تأیید این گفته به دایک‌هایی اشاره می‌کند که در خاور تهران با روند شمال‌خاوری در سنگ‌های توف تزریق شده‌اند. روند این دایک‌ها بیانگر حاکم شدن تنش با روند شمال‌باختری است که مؤلفه افقی راست‌بر را بر گسله مشا اعمال می‌کند. در این صورت درک این مطلب اهمیت دارد که گسله مشا همیشه سازوکار چپ‌بر نداشته و حرکت راست‌بر در

ناهماهنگی‌ها لازم است تانسور تنش محاسبه شود که آرایش محورهای اصلی تنش آن و جهت تنش بیشینه محاسبه شده مؤید و هماهنگ با سازوکارهای کانونی موجود در منطقه مورد مطالعه باشد. بهترین مثال برای این موضوع، سازوکارهای کانونی به دست آمده از گسله مشا و گسله فیروزکوه است. با وجود اینکه این دو گسله در نزدیکی هم هستند و پایانه آنها در باختر شهر فیروزکوه به هم می‌پیوندند، سازوکارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در این پژوهش از تعمیم سازوکارهای کانونی و گرفتن نتیجه کلی صرف نظر شده است؛ زیرا شرایط تنش و زمین ساخت می‌تواند در فاصله کیلومتری تغییر کند. در دو ترانشه مشا و فیروزکوه از سازوکارهای کانونی واقع در نزدیکی محل ترانشه بهره برده شده است.

۳-۱ ترانشه راندگی شمال تهران

ترانشه راندگی شمال تهران با همکاری سازمان زمین‌شناسی و دانشگاه مونسپل (فرانسه) روی بخشی از راندگی شمال تهران با روند شمال باختری حفر شد. این ترانشه بعد از ادامه بزرگراه همت به سوی کرج، در کنار یال جنوبی آن قرار گرفته که اکنون بعد از دوربرگردان پایانی بزرگراه در دسترس است (عدد ۱ در شکل ۱). صفحه‌های قابل اندازه‌گیری در این ترانشه محدود به خرده‌سنگ‌هایی است که با گسلش هم‌جهت شده‌اند. صفحه گسلی مشخصی وجود ندارد که بتوان به‌طور مستقیم مشخصات جنبشی آن را اندازه‌گیری کرد. تنها روی سه خرده‌سنگ جهت یافته، اندازه‌گیری خش‌خط‌ها ممکن بود (شکل ۲-الف). بقیه داده‌ها مربوط به خرده‌سنگ‌هایی است که در پهنه گسلی جهت‌یافتگی دارند. برای یافتن میانگین مناسب برای روند (شکل ۲-ب) و شیب میانگین (شکل ۲-ج) مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌ها انجام شد. میانگین روند و شیب هشت صفحه در شکل ۲ با عدد مشخص شده است. میانگین

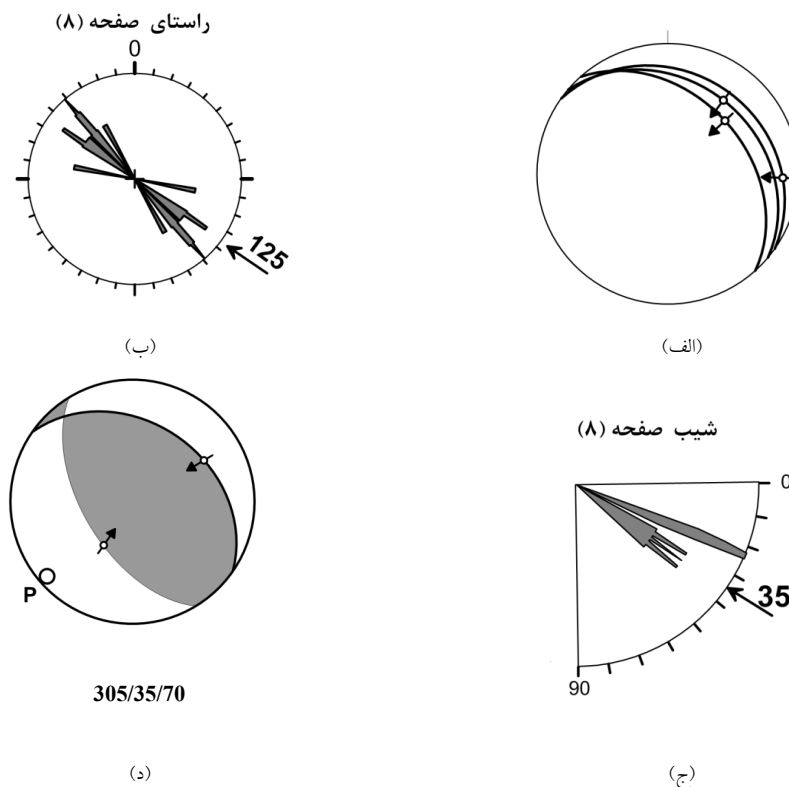
راستای آن، جابه‌جایی‌های چپ‌بر را خنثی کرده است؛ از این رو، کمک گرفتن از جابه‌جایی تجمعی برای تخمین و تعمیم آن به شرایط امروز به نتایج نادرست می‌انجامد. افزون بر این، در سازندهایی که سن آنها پلایستوسن جوان و هولوسن است، هر شاخص مورفومتریک دیگری نیز می‌تواند به پاسخ درست بینجامد.

۳ داده‌های گسلی از ترانشه‌ها (روش)

برای این مطالعه در سه ترانشه حفر شده در نهشته‌های جوان (اغلب هولوسن) اندازه‌گیری صفحه‌های گسلی صورت گرفته است. برای دو ترانشه، داده‌ها به قدری بود که بتوان از آنها تانسور تنش را محاسبه کرد. در این پژوهش تکیه بر اندازه‌گیری صفحه‌های اصلی گسلی است که در ترانشه‌های شمال تهران، مشا و فیروزکوه اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری‌ها تا حد امکان به گونه‌ای بوده است که بتوان به تانسور تنش دست یافت. صفحه‌هایی که مشخصات آنها با یک تانسور تنش مناسب سازگار نبود، به صورت خودکار حذف شدند. خطری که در اندازه‌گیری در ترانشه‌ها وجود دارد، نزدیک بودن به گسله اصلی است که معمولاً آشفتگی در تنش دارد. افزون بر این، خطای دیگری نیز که به‌ویژه در راستای گسله‌های راستالغز دیده شده است و می‌تواند در کیفیت تانسور تنش مؤثر باشد، آن است که سازوکار گسله‌های راستالغز می‌تواند باعث چرخش صفحه‌های گسلی شود. برای جبران این خطا باید صفحه‌های گسلی زیادی برداشت شوند. در دو ترانشه گسله مشا و فیروزکوه بیش از پانزده صفحه گسلی برداشت شد که تعداد زیادی از آنها از محاسبه حذف شدند. نکته بعدی که در ترانشه مشا دیده شد، تعدد صفحه‌های گسلی با خش‌خط‌های نامربوط است که با سازوکار واقعی گسله فعال همخوان نیست. این پدیده در بسیاری از زمین‌لرزه‌ها دیده شده است (برای مثال، زمین‌لرزه دشت بیاض)؛ از این رو، برای جبران این دست

اینکه سازوکارهای گسلی با مؤلفه غالب شاقولی به سختی شناسایی می‌شوند به‌ویژه اگر مقدار جابه‌جایی شاقولی در راستای آنها کمتر از ۲ متر باشد. نکته دوم را باید در گسترش شهر تهران و پوشیده شدن آن با ساخت‌وسازهای شهری جستجو کرد. جابه‌جایی این گسله در ترانشه (شماره ۱) متر اندازه‌گیری شده است (Ritz et al., 2012). سازوکار کانونی دیرینه برای این گسله از نوع فشاری با مؤلفه کوچک افقی چپ‌بر است که مشخصات جنبشی آن در شکل ۲-د نوشته شده است.

صفحه‌های گسلی اندازه‌گیری‌شده از هشت صفحه با صفحه‌های گسلی همسو است و اعتبار این اندازه‌گیری‌ها را تأیید می‌کند. بر این اساس، سازوکار کانونی دیرینه پیشنهادی می‌تواند مطابق با شکل ۲-د باشد. روند گسلی شمال‌باختری در این بخش یک گسله با راستای شمال‌باختری را پیشنهاد می‌کند که تا شهر ری ادامه دارد. این گسله با نام کرج-ری در شکل ۱ به نمایش درآمده است. این روند گسلی، بخشی از گسله‌های دیگر در جنوب و شمال تهران را تشکیل می‌دهد که بنا بر دو علت، شناسایی آن در عکس‌های هوایی آسان نیست. نخست



شکل ۲. داده‌های اندازه‌گیری‌شده در ترانشه شماره ۱. (الف) صفحه‌های گسلی همراه با بردارهای لغزش آنها (ب) نمودار گل‌سرخ‌ی روند صفحه‌های اندازه‌گیری‌شده. اندازه میانگین روند با پیکان مشخص شده است. (ج) نمودار گل‌سرخ‌ی شیب صفحه‌های اندازه‌گیری‌شده. پیکان اندازه میانگین شیب را مشخص می‌کند. (د) سازوکار پیشنهادی و مشخصات صفحه اصلی که در زیر آن نوشته شده است.

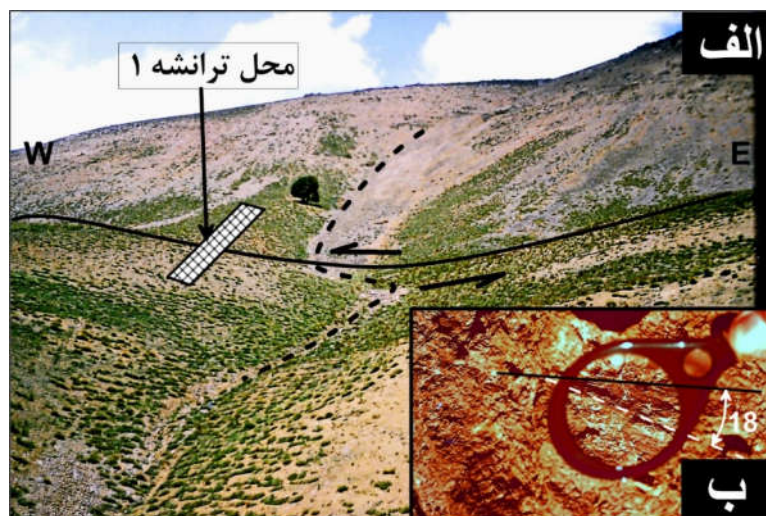


شکل ۳. تصویر ترانشه راندگی شمال تهران. (الف) جابه‌جایی شاقولی گسلش (D) (ب) نمای نزدیک از گسلش (خط‌چین) و خرده‌سنگ‌های جهت‌یافته (نگاه به سوی شمال)

۲-۳ ترانشه گسله مشا

مطالعه این ترانشه با همکاری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی، سازمان زمین‌شناسی و دانشگاه مون‌پلیه (فرانسه) صورت گرفت. روی دو ترانشه حفر شده ترانشه شماره ۱ (شکل ۴-الف) حفر شد که در آن صفحه‌های گسلی همسو با روند عمومی گسل، مشخص‌تر اندازه‌گیری شدند (شکل ۴-ب). در این بخش از گسله مشا، گسلش به‌طور مشخص سازند هولوسن را می‌برد. مهم‌ترین اندازه‌گیری‌ها از صفحه‌های اصلی گسلی در این ترانشه انجام شد. صفحه‌های گسلی اندازه‌گیری شده دو نسل خش‌خط را نشان می‌دادند که تشخیص تقدم و تأخر آنها آسان نبود. یک نسل از آنها مؤلفه چیره کششی دارد و نسل دیگر مؤید حرکت افقی چیره با مؤلفه

کششی است (شکل ۴-ب). از این دو نسل فقط نسلی از خش‌خط‌ها که راستالغز چپ‌بر با مؤلفه کششی است، تانسور تنش مناسب تولید می‌کند که در محاسبات لحاظ شدند (شکل ۶-الف) و صفحه‌های گسلی با حرکت‌های کششی ناهمخوان با تانسور تنش حذف شدند. در شکل ۶-الف صفحه‌های گسلی هم‌روند با روند عمومی گسله مشا پررنگ‌تر و در شکل ۶-ب به‌صورت مجزا نمایش داده شده‌اند. در شکل ۶-ج میانگین هندسه، روند و خش‌خط سه صفحه گسلی اندازه‌گیری شده و سازوکار کانونی دیرینه پیشنهادی به نمایش درآمده است (مشخصات صفحه گسلی و چگونگی جنبش آن در زیر شکل نوشته شده است).



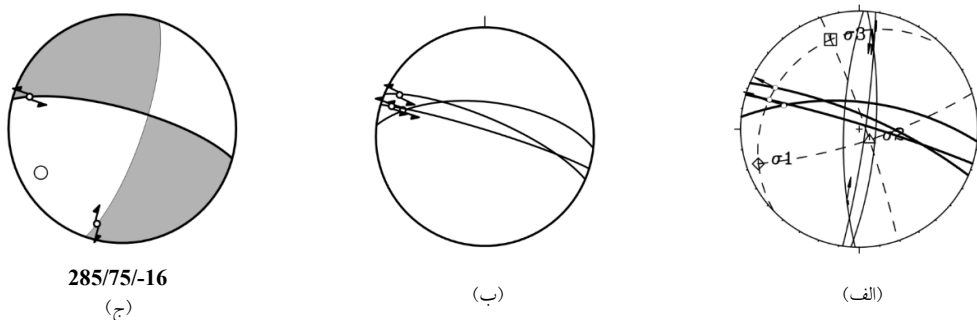
شکل ۴. تصویر ترانشه شماره یک مشا (الف) اثر گسلش (خط پیوسته سیاه‌رنگ) و آبراهه فصلی جابه‌جا شده به صورت چپ‌بر (خط ناپیوسته) (ب) تصویر خط‌خس‌ها بعد از حفر ترانشه و مقدار ریک اندازه‌گیری‌شده (نگاه به سوی شمال).

روندهای شمالی-جنوبی دیده می‌شد که در محاسبات تانسور تنش به کمک گرفته شد. در شکل ۵- الف پشته‌های جابه‌جا شده که به صورت چپ‌بر جابه‌جا شده‌اند با سه گوش‌های توخالی نشان داده شده است. در پایین همان شکل، سمت چپ، نمایی از ترانشه حفر شده به نمایش درآمده است (شکل ۵- ب).

در ترانشه شماره ۲ که در بخش جنوبی‌تر و نزدیک به کف دره حفر شد (شکل ۵)، آمیزه‌ای از سنگ و آبرفت‌های جوان رخنمون داشت. این ترانشه پهنه‌ای از گسله‌های جوان و قدیمی را دربرمی‌گرفت که به صورت مشخص، روندهای اصلی گسلش در آن نسبت به ترانشه شماره ۱ اندازه‌گیری نشد، اما جهت‌های دیگری چون



شکل ۵. محل حفر ترانشه شماره ۲. (الف) محل این ترانشه در میانه دو شاخه گسلی قرار دارد که با خطوط ناپیوسته نشان داده شده است. سه گوش‌های سیاه‌رنگ، جابه‌جایی پشته‌ها را به صورت چپ‌بر نشان می‌دهند. (ب) تصویری از ترانشه حفر شده (نگاه به سوی جنوب).



شکل ۶. اندازه‌گیری صفحه‌های گسلی در ترانشه مشا. (الف) تانسور تنش محاسبه‌شده از صفحه‌های گسلی (ب) صفحه‌های همسو با روند گسلی (ج) سازوکار پیشنهادی (دیرینه) بر اساس میانگین مشخصات گسلی

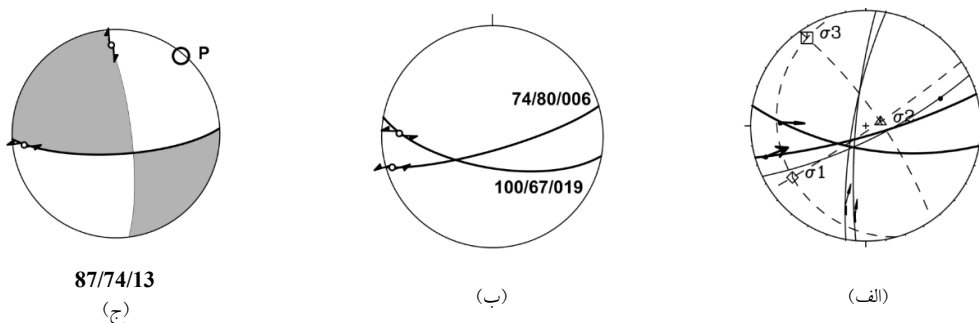
مشخص کمتر دیده می‌شوند. دیواره‌های ترانشه حاوی نهشته‌های ریزدانه از نوع سیلتی-رسی است و قلوه‌سنگ‌های گردشده در این بستر قرار دارند. بیشترین اندازه‌گیری‌ها روی همین قلوه‌سنگ‌ها صورت گرفت. خش‌خطها به‌صورت بارز روی این قلوه‌سنگ‌ها شکل گرفته‌اند و اندازه آنها در حد سانتی‌متر است.

تانسور تنش با استفاده از داده‌های برداشت‌شده محاسبه شد (شکل ۷-الف). جهت تنش بیشینه و رژیم زمین‌ساختی این تانسور با سازوکارهای کانونی به‌دست آمده هماهنگ است. محور فشردگی سازوکارهای کانونی در راستای شمال‌خاوری است و محور تنش میانی عمود بر زمین مؤید رژیم زمین‌ساختی راستالغز است. تنها

براساس این یافته می‌توان گسله مشا را در فاصله میان دریاچه تار و ده مشا از نوع راستالغز چپ‌بر (ریتز و همکاران، ۲۰۰۳) با مؤلفه کوچک افقی کششی (۱۶-درجه) دانست. با توجه به روند عمومی گسله مشا که (N۱۰۳E) است، میانگین روند به‌دست‌آمده از محاسبه تانسور تنش، بیشترین نزدیکی را به روند عمومی گسله نشان می‌دهد.

۳-۳ ترانشه گسله فیروزکوه

ترانشه روی این گسله در چارچوب همکاری مشترک میان سازمان زمین‌شناسی و دانشگاه مون‌پلیه (فرانسه) صورت گرفت. در این ترانشه صفحه‌های گسلی به‌صورت



شکل ۷. اندازه‌گیری صفحه‌های گسلی در ترانشه فیروزکوه. (الف) تانسور تنش به‌دست‌آمده از صفحه‌های گسلی (ب) صفحه‌های همسو با روند گسلی فیروزکوه. مشخصات گسله‌ها روی تصویر نوشته شده است. (ج) سازوکار کانونی پیشنهادی (دیرینه) بر اساس میانگین مشخصات گسلی. مشخصات صفحه اصلی در زیر شکل نوشته شده است.

فشرده‌گی) یا دو صفحه مزدوج درزه نیز به دست آورد. باید تأکید شود که گاهی برخی از زمین‌شناسان جهت کرنش را که از جهت عمود بر محور چین خوردگی‌ها به دست می‌آید با جهت تنش اشتباه می‌گیرند. لزوماً جهت تنش با جهت کرنش یکسان نیست. یکی از این دو، علت است و دیگری معلول. به هر روی، حاصل مهم حل تانسور تنش، به دست آوردن بیضوی تنش است که تعریف‌کننده رژیم زمین‌ساختی است. در این پژوهش کمتر به شرایط یک تانسور مناسب پرداخته شد؛ این موضوع خارج از هدف این مطالعه است و می‌تواند به صورت مفصل در یک مقاله جداگانه به بحث گذاشته شود. در مثال دو ترانشه مشا و فیروزکوه، تنها بر اندازه‌گیری مستقیم صفحه‌های گسلی در ترانشه‌ها تکیه نشده، بلکه تانسور تنش از مجموعه‌ای از صفحه‌های گسلی واقع در نهشته‌های جوان به دست آمده است (شکل‌های ۶- ج و ۷- ج). در مثال ترانشه راندگی شمال تهران به علت نبود تعداد صفحه‌های گسلی مناسب، تنها به میانگین صفحه گسلی بسنده شد که اعتبار آن منوط به حل سازوکار کانونی است (شکل ۲- ج). تطابق نداشتن صفحه‌های گسلی به دست آمده از سازوکارهای کانونی می‌تواند به اعوجاج در سطوح گسلی مربوط باشد. با نگاه به جدول ۱ که سازوکارهای کانونی حل شده برای گسله مشا را نمایش می‌دهد، سازوکار کانونی حل شده اشتري و همکاران (۲۰۰۵)، به روند عمومی گسله مشا نزدیک‌تر است. نتیجه به دست آمده از تانسور تنش نیز نزدیکی خوبی به روند عمومی گسله نشان می‌دهد. با حرکت به سوی پایانه خاوری گسله مشا، حل سازوکار کانونی با مؤلفه کششی زیادی همراه می‌شود (جدول ۱). علت این افزایش مؤلفه کششی می‌تواند مربوط به پایانه گسلی باشد که به طور معمول با آشفته‌گی تنش همراه است یا مربوط به تداخل دو روند گسلی فیروزکوه و گسله مشا باشد (شکل ۸).

قاسمی و همکاران (۲۰۱۴) در بخش پایانی گسله مشا

سازوکار یک صفحه گسلی در محاسبات ناشناخته است که البته همخوانی کمتری با روند عمومی گسله فیروزکوه دارد. این داده برای پیشنهاد سازوکار دیرینه کنار گذاشته شد. همان‌طور که در بخش ۲ گفته شد، وجود خط انحراف و چرخش صفحه‌های گسلی در سازوکارهای راستالغز اتفاقی نادر نیست.

از بین دو صفحه گسلی نزدیک به روند گسله فیروزکوه، یکی هم‌روند گسله است (N۷۴E) و دیگری همخوانی کمتری با روند عمومی گسله دارد (شکل ۷- ب). به روال قبل، میانگین روند، هندسه و زاویه بردارهای لغزش به دست آمد. با توجه به میانگین به دست آمده، روند عمومی گسله فیروزکوه، جایی که افراز گسلی آن نهشته جوان را می‌برد و محل حفر ترانشه است، برابر با (N۶۰E) با شیب به سوی جنوب است. سازوکار کانونی دیرینه این گسله با توجه به تانسور تنش و اندازه‌گیری‌های انجام شده در محل، بیانگر یک گسله با سازوکار راستالغز چپ بر با مؤلفه کوچک فشاری نزدیک به ۱۳ درجه است (شکل ۷- ج).

۴ کاربرد تانسور تنش امروزین برای برآورد سازوکارها و روندهای فعال

تنش امروزین داده‌ای است که معمولاً از سازوکارهای کانونی و با روش برگشتی از صفحه‌های گسلی محاسبه می‌شود. روش برگشتی به‌ویژه در سازندهای جوان (پلایستوسن جوان و هولوسن) بسیار نزدیک به واقعیت‌های زمین‌ساختی موجود است. منظور از تانسور تنش در روش برگشتی، اندازه‌گیری صفحه‌های گسلی و خش خط‌های آنهاست که در یک جهت تنش مشخص با تعداد دست‌کم چهار صفحه گسلی با روندهای متفاوت یک تانسور تنش را تعریف کند. البته هدف اصلی این روش در گام نخست، برآورد جهت تنش بیشینه نیست؛ زیرا این جهت را می‌توان با تکیه بر سازوکارهای کانونی (محور

همکاران (۲۰۰۶) سازوکار این گسله را با مؤلفه کششی معرفی کرده‌اند، اما اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در ترانشه و سازوکارهای کانونی این نظر را تأیید نمی‌کند. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، این گسله سازوکار راستالغز چپ‌بر با مؤلفه شاقولی فشاری دارد. سازوکار کانونی دیرینه نیز مؤید همین نظر است (شکل ۷-ج).

نظری و همکاران (۲۰۱۴) به سازوکارهای کانونی مؤمنی (۲۰۱۲) استناد می‌کنند (مقایسه شود با شکل ۱.۱c). در این شکل سازوکارهای کانونی از نوع کششی با مؤلفه کوچک راستالغز هستند که در تضاد با نظر نویسندگان قرار دارد؛ زیرا آنها در بخش چکیده و نتیجه‌گیری اذعان می‌کنند سازوکار این گسله از نوع راستالغز با مؤلفه کوچک کششی است. از سوی دیگر، باید تأکید کرد که سازوکارهای کانونی به‌دست‌آمده در کار مؤمنی (۲۰۱۲) با خردلرزه‌ها حل شده‌اند. این در حالی است که رویدادهای لرزه‌ای با بزرگای بیش از ۵ ($M > 5$) حکایت از سازوکار راستالغز دارد. در حل این سازوکارها بازنگری شد (جکسون و همکاران، ۲۰۰۲).

نزدیک به خاور تهران کار کردند و نتایج دیگری از اندازه‌گیری آنها در ترانشه (شکل ۱۱ همان مقاله) دیده شد. تنها صفحه‌ای که همسو با گسله مشا است صفحه‌ای کم‌شیب با سازوکار فشاری است که با سازوکار عمومی گسله مشا که مؤلفه کششی دارد ناهمخوان است (مقایسه شود با شکل ۵ همین مقاله). مقایسه مقاله گفته‌شده با کار پیش‌رو نمی‌تواند مناسب باشد؛ زیرا این بخش گسله مشا پایان‌بختری آن است و احتمال آشفتگی در میدان تنش وجود دارد. در جدول ۲ مقایسه سازوکارهای کانونی به‌دست‌آمده برای گسله فیروزکوه به نمایش درآمده است. روند گسلی حاصل از حل سازوکار کانونی CMT کمترین تطابق را با روند عمومی افراز گسلی (N۶۰E) نشان می‌دهد. جکسون و همکاران (۲۰۰۲) با تغییر پارامترهای امواج و عمق رویداد (از ۳۳ کیلومتر به ۱۰ کیلومتر)، نزدیک‌ترین اندازه را برای حل سازوکار کانونی به‌دست‌آورده‌اند که نسبت به حل CMT نتیجه بهتری است. داده به‌دست‌آمده از داخل ترانشه از روند عمومی گسله دور است، اما اندازه زاویه ریک، واقعی‌تر به‌نظر می‌رسد. در هندسه گسله‌ها کمترین تطابق را حل نعمتی و همکاران (۲۰۱۱) نشان می‌دهد (شکل ۸). ریتز و

جدول ۱. سازوکارهای کانونی به‌دست‌آمده در نزدیکی محل ترانشه مشا.

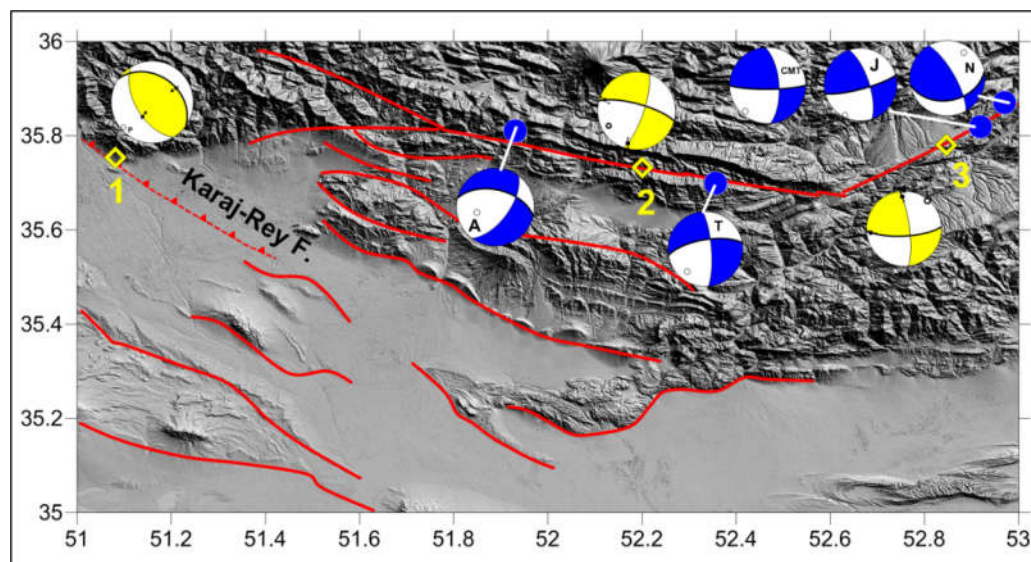
مرجع*	ریک	شیب	روند	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	تاریخ
A	-۳۶	۵۳	۲۸۰	۵۱/۹۳	۳۵/۸۱	۲۰۰۰/۰۶/۰۶
T	-۱۴	۷۰	۲۶۰	۵۲/۳۶	۳۵/۷۰	۲۰۰۶/۰۷/۲۷
CMT	-۱۱۵	۷۰	۱۱۵	۵۲/۴۶	۳۵/۷۱	۲۰۰۶/۰۷/۲۷
این مطالعه	-۱۶	۷۵	۲۸۵	۵۲/۱۹	۳۵/۷۳	

* A: اشتی و همکاران (۲۰۰۵)؛ T: تاتار و همکاران (۲۰۱۲).

جدول ۲. سازوکارهای کانونی به‌دست‌آمده در نزدیکی محل ترانشه فیروزکوه.

مرجع*	ریک	شیب	روند	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	تاریخ
CMT	۲۴	۸۲	۹۰	۵۲/۹۲	۳۵/۸۲	۲۰۰۹/۰۱/۲۰
N	۲۶	۴۰	۸۰	۵۲/۹۷	۳۵/۸۷	۲۰۰۸/۰۱/۲۶
J	۱۹	۸۰	۷۵	۵۲/۹۲	۳۵/۸۲	
این مطالعه	۱۳	۷۴	۸۷	۵۲/۸۵	۳۵/۷۸	

* N: نعمتی و همکاران (۲۰۱۱)؛ J: جکسون و همکاران (۲۰۰۲).



شکل ۸. سازوکارهای کانونی داده‌های لرزه‌ای (رنگ آبی) و مرجع گزارش آنها (حروف اختصاری لاتین).

است (مراحل پایانی پلایستوسن جوان)، کار با شاخص‌های مورفومتریک فقط در سازند پلایستوسن جوان و هولوسن تأییدشدنی است؛ از این رو، هر اندازه‌گیری شاخص مورفومتریک که خارج از این بازه زمانی صورت بگیرد، نمی‌تواند به صورت حتمی منعکس‌کننده جنبش‌های نوزمین‌ساختی و عهد حاضر باشد.

روندهای گسلی باختر-شمال باختر در میدان تنش کنونی با سازوکار چیره فشاری عهده‌دار کوتاه‌شدگی در البرز مرکزی هستند. گسله مشا سازوکار راستالغز چپ‌بر با مؤلفه شاقولی کوچک کششی دارد و گسله فیروزکوه با سازوکار راستالغز فشاری و روند عمومی (N۶۰E) با شیب نزدیک به ۸۰ درجه به سوی جنوب کارسازی می‌کند. بشینه تنش افقی امروزین در البرز مرکزی به گواه سازوکارهای کانونی و تانسورهای تنش برابر با (N۴۵±۵) در رژیم زمین‌ساختی راستالغز ترفشارشی است.

مرجع گزارش‌دهنده در جدول‌های ۱ و ۲ معرفی شده است. سازوکارهای کانونی دیرینه در محل ترانشه‌های ۱ تا ۳ با رنگ زرد نشان داده شده است. دایره‌های کوچک روی سازوکارهای کانونی، محورهای فشردگی را نشان می‌دهند.

۵ نتیجه‌گیری

نتایج اندازه‌گیری جنبشی از سطح زمین هماهنگی مناسبی را با سازوکارهای کانونی به‌دست آمده از عمق متوسط ۱۲ کیلومتری نشان می‌دهد (شکل‌های ۶، ۷ و ۸ و جدول‌های ۱ و ۲). با تکیه بر صفحه گسلی در ابعاد سانتی‌متر در سطح زمین، چنانچه تانسور تنش مناسبی حل شود، می‌توان با اطمینان سازوکار کانونی دیرینه را پیشنهاد داد به‌ویژه در مناطقی که داده‌های لرزه‌ای در دست نیست. در چنین مناطقی این داده‌ها جایگزین مناسبی برای جریان کمبودهای لرزه‌ای هستند.

از آنجا که برقراری تنش شمال‌خاوری امروزین جوان

منابع

- Abbassi, M.R., and Shabanian, E., 1999, Evolution of the stress field in the Tehran region during the Quaternary: Third International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran.
- Abbassi, M.R., and Shabanian, E., 2005, Determination of stress state and direction by inversion of fault-slip data in the southern flank of the Central Alborz: *Geosciences Journal*, Geological Survey of Iran, **57**, 2-17.
- Abbassi, M.R., and Shabanian, E., 2020, Stress field evolution recorded by tectono stratigraphy of Quaternary deposits of the southern flank of the Central Alborz (Iran), (in prep.)
- Ashtari, M., Hatzfeld, D., Kamalian, N., 2005. Microseismicity in the region of Tehran. *Tectonophysics* 395, 193-208.
- Austermann, J., Ben-Avraham, Z., Bird, P., Heidbach, O., Schubert, G., and Stock, J.M., 2011, Quantifying the forces needed for the rapid change of Pacific plate motion at 6 Ma: *Earth and Planetary Science Letters*, **307**(3-4), 289-297.
- Ghassemi, M.R., Fattahi, M., Landgraf, A., Ahmadi, M., Ballato, P., and Tabatabaei, S.H., 2014, Kinematic links between the Eastern Mosha Fault and the North Tehran Fault, Alborz range, northern Iran: *Tectonophysics*, **622**, 81-95.
- Hancock, P.L., 1985, Brittle microtectonics: principles and practice: *Journal of Structural Geology*, **7**, 437-457.
- Hancock, P.L., and Barka, A.A., 1987, Kinematic indicators on active normal faults in western Turkey: *Journal of Structural Geology*, **9**, 573-584.
- Harvard University, Department of Geological Sciences, 2000, Centroid Moment Tensor catalogue, available online at: <http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>.
- Hessami, K., and Jamali, J., 2006, Explanatory notes to the map of major active faults of Iran: *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **8**(1), 1-11.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M., and Berberian, M., 2002, Active tectonic of the South Caspian Basin: *Geophysical Journal International*, **148**, 214-245.
- Matthews, K.J., Seton, M., and Mueller, R.D., 2012, A global-scale plate reorganization event at 105-100 Ma: *Earth and Planetary Science Letters*, **355**, 283-298.
- Momeni, S.M., 2012, Seismicity and Seismotectonic of the Garmsar region: MSc. thesis in Persian, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.
- Mueller, R.D., Dutkiewicz, A., Seton, M., and Gaina, C., 2013, Seawater chemistry driven by supercontinent assembly, breakup, and dispersal: *Geology*, **41**(8), 907-910.
- Nazari, H., Ritz, J.F., Walker, R.T., Salamati, R., Rizza, M., Patnaik, R., Hollingsworth, J., Alimohammadian, H., Jalali, A., Kaveh Firouz, A., and Shahidi, A., 2014, Palaeoseismic evidence for a medieval earthquake, and preliminary estimate of late Pleistocene slip-rate, on the Firouzkuh strike-slip fault in the Central Alborz region of Iran: *Journal of Asian Earth Sciences*, **82**, 124-135.
- Nemati, M., Hatzfeld, D., Gheitanchi, M.R., Sadidkhouy, A., and Mirzaei, N., 2011, Microseismicity and seismotectonics of the Firuzkuh and Astaneh faults (East Alborz, Iran): *Tectonophysics*, **506**, 11-21.
- Ritz, J.F., et al., 2003, Geometry, kinematics and slip rate along the Mosha active fault, central Alborz: Nice, France, EGU-AGU-EUG Joint Assembly, Abstract EAE03-A-06057.
- Ritz, J.F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S., and Vernant, P., 2006, Active transtention inside Central Alborz: a new insight into the Northern Iran-Southern Caspian geodynamics: *Geology*, **34**, 477-480.
- Ritz, J.F., et al., 2012, Paleoeearthquakes of the past 30000 years along the North Tehran Fault (Iran): *Journal of Geophysical Research*, **117**(B6), doi:10.1029/2012JB009147.
- Shabanian, E., Siame, L., Bellier, O., Benedetti, L., and Abbassi, M.R., 2009, Quaternary slip rates along the northeastern boundary of the Arabia-Eurasia collision zone (Koppeh Dagh Mountains, Northeast Iran): *Geophysical Journal International*, **178**, 1055-1077, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04183.x.
- Soltani Moghadam, S., Sepanlo, K., and Kheiri Moloumeh, M., 2018, Velocity model calculation and seismicity study of last decade on Tehran and high Alborz elevations: *Iranian Journal of Geophysics*, **12**(2), 78-95.
- Stewart, I.S., and Hancock, P.L., 1988, Normal fault zone evolution and fault scarp degradation in the Aegean region: *Basin Research*, **1**, 139-153.
- Stewart, I.S., and Hancock, P.L., 1990, Brecciation and fracturing within neotectonic normal fault zones in the Aegean region, in

- Knipe, R.J., Rutter, E.H. (eds.), Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics: Geological Society Special Publication, **54**, 105-110.
- Stewart, I.S., and Hancock, P.L., 1991, Scales of structural heterogeneity within neotectonic normal fault zones in the Aegean region, in Hancock, P.L., Yeats, R.S., Sanderson, D.J. (eds.), Characteristics of Active Faults: Journal of Structural Geology, **13**, 191-204.
- Tchalenko, 1975, Seismotectonic framework of the North Tehran Fault: Tectonophysics, **29**, 411-420.
- Solaymani Azad, S., Ritz, J.F., and Abbassi, M.R., 2011, Left-lateral active deformation along the Mosha–North Tehran fault system (Iran): morphotectonics and paleoseismological investigations: Tectonophysics, **497**, 1–14.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., Abbassi, A, and Yamini Fard, F., 2012, Microseismicity and seismotectonics around the Mosha fault (Central Alborz, Iran): Tectonophysics, 544-545, 50-59.
- Yamini Fard, F., Moradi, A., and Naghavi, M., 2012, Source parameters of the October 17, 2009 Rey-Tehran Earthquake, Mw 4.3: Iranian Journal of Geophysics, **6**(3), 46-58.

Comparison of surface slip-data deduced from paleoseismological sites and focal mechanisms in the South Central Alborz

Mohammadreza Abbasi^{1*}

¹ Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

(Received: 14 March 2020, Accepted: 07 April 2020)

Summary

Focal mechanism and surface slip data are used to investigate the relationship between kinematic studies conducted on young geological units, especially in trenches of paleoseismological sites, Late Pleistocene and Holocene in age. It has shown that there is direct relationship between data obtained on surface and seismic data in depth. Kinematic measurements in three trenches for paleoseismological sites on North Tehran Thrust, Mosha fault and Firuzkuh fault are used to calculate the stress tensor. Stress tensors and their associated fault planes and focal mechanism data are compared. Fault planes obtained from calculated stress tensors whose fault planes lie parallel or close to the general trends of Mosha and Firuzkuh faults are in good agreement with focal mechanism. The third trench on North Tehran Thrust displayed insufficient data to obtain an appropriate stress tensor, however the average of strikes, dips and rakes allow to propose a paleofocal mechanism for an area of seismic quiescence. Based on fault plane inversion and focal mechanisms, overall, maximum ($\sigma_1 \sim N045 \pm 5$) and minimum (σ_3) principal stresses are subhorizontal and the intermediate principle stress (σ_2) is vertically oriented. This is consistent with a dominant strike-slip regime. The Mosha fault (trending N100E, dipping to North) is a left-lateral strike-slip fault with a minor extensional component and joins Firuzkuh fault (trending N60E, dipping to South) as strike-slip fault with a compressional component.

Keywords: Central Alborz, Tehran, contemporary stress, active fault, tectonic regime

*Corresponding author:

abbassi@iiees.ac.ir