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

محمدرضا عباسي ا*

ا دانشیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

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

چکیدہ

صفحههای گسلی از سه ترانشه (مطالعات دیرینه لرزهشناسی) با سنهای پلایستوسن جوان و هولوسن با سازوکارهای کانونی مقایسه شدهاند تا ارتباط میان این دو داده مشخص شود. نشان داده شدکه ارتباط مستقیم میان دادههای سطحی (گسلهها و خشخط آنها) و دادههای عمقی (سازوکار کانونی) وجود دارد. تانسور تنش با اندازه گیریهای سطحی از سه ترانشه راندگی خشخط آنها) و دادههای عمقی (سازوکار کانونی) وجود دارد. تانسور تنش با اندازه گیریهای سطحی از سه ترانشه راندگی شمال تهران، مشا و فیروزکوه بهدستآمد. از تانسور تنش محاسبهشده، صفحههای گسلی ای انتخاب شدند که با روند عمومی گسلهای مشا و فیروزکوه بهدستآمد. از تانسور تنش محاسبهشده، صفحههای گسلی ای انتخاب شدند که با روند عمومی گسلهای مشا و فیروزکوه همسو هستند. این داده با سازوکارهای کانونی همخوانی خوبی دارد. در ترانشه سوم که دادهها گسلهای مشا و فیروزکوه همسو هستند. این داده با سازوکارهای کانونی همخوانی خوبی دارد. در ترانشه سوم که دادهها ری می از می حرای مشال تهران، مشا و فیروزکوه بهدستآمد. از تانسور تنش محاسبهشده، صفحههای گسلی ای انتخاب شدند که با روند عمومی گسلههای مشا و فیروزکوه بهدستآمد. 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 لرها (σ_{1}) و تنش کمینه (σ_{1}) شب نزدیک به افق دارند و محور تنش میانی (σ_{1}) عمود بر زمین با رژیم زمینساختی راستالغز است.

گسله مشا با روند (N۱۰۰E) و شیب به سوی شمال، سازوکار راستالغز چپبر و یک مؤلفه کوچک کششی دارد که در پایانه خاوری خود به گسله فیروزکوه با روند (N۶۰E) و شیب به سوی جنوب با سازوکار راستالغز همراه با یک مؤلفه فشاری می-پیوندد.

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

۱ مقدمه

سازوکارکانونی بهدستآمده از زمینلرزههای بزرگ و خردلرزهها – که یکی از دادههای مهم در تفسیرهای زمینساختی است – فصل مشترک میان زمینشناسی و زلزلهشناسی محسوب میشود. این دادهها بهویژه در توضیح زمینساخت فعال معنای بیشتری پیدا میکند.

شهر تهران با گسلههای 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 گسلهها و بررسی توالی رویدادهای تاریخی در آنها، مطالعات دیرینهلرزهشناسی انجام شده است.

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

برای جبران کمبود دادههای سازو کار کانونی می توان از دادههای غیرمستقیم حاصل از مطالعات زمین شناسی بهعنوان 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 لرزهای در عمق زمین باشد؟ و ب) آیا محاسبات به دست آمده از تانسورهای تنش نوزمین ساختی می تواند پیشنهاد مناسبی برای سازو کارهای کانونی آتی ارائه کند؟ مطالعات مشابهی در ترکیه و یونان روی گسلههای 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 دادههای سطحی برداشتشده از سطوح گسلی و سازوکارهای کانونی بهدست آمده از عمق برقرار باشد، استفاده از دادههای سطحی می تواند کمبودهای لرزهای را جبران کند یا دستکم راهنمایی باشد برای پژوهشگرانی که به حل سازوکار کانونی مبادرت میکنند؛ در این صورت هر تانسور تنش همسو با تنش امروزین و سازگار با رژیم زمینساختی عهد حاضر، مي تواند در بر آورد گسلههاي فعال و سازو کار آنها نیز نقش داشته باشد. در مطالعه پیش رو، پس از مروری بر تحول میدان تنش کواترنری در البرز، دادههای جنبشی گسلههای فعال که در سه ترانشه برداشت شده است، با سازوكارهاي كانوني مقايسه مي شوند تا ياسخي براي ييوند میان دادههای سطحی و عمقی داده شود. در گام بعدی، گسلههای فعال دیگری بررسی میشوند که میتوانند 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 میشود که به اولین نقشههای 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 میشد و همان طور که در نقشههای آنها دیده می شود، همه گسلهها از نوع فشاری هستند. دلیل آن را باید در ظرف زمانی خود دید. در دهه شصت میلادی، حرکتهای افقی برای زمین شناسان ناشناخته بود و نظریه

زمین ناودیس (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 بهعنوان گسله فشاری شناخته میشد. با حل سازوکار کانونی و کارهای دیرینهلرزهشناسی، این گسله با سازوکار راستالغز چپبر معرفی شد (ریتس وهمکاران 2003 .. اشتری و همکاران .(2005

بردارهای لغزش شاقولی، نسل قدیمی و بردارهای لغزش افقی، نسل جوانتر 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 ازحسامی و جمالی (۲۰۰۶) است.

داده دیگری که می تواند به شناخت سازو کار گسلهها کمک کند، مطالعه جنبشی (Kinematic) و بازسازی تنش دیرین و امروزین است. مطالعات جنبشی انجام شده در بیست سال گذشته نشان می دهند که کواترنر ایران به صورت ناباورانهای پر جنبش 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 زمین ساختی تغییر کرده است.



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

معناي اين جمله اين است كه تا قبل از سه و نيم ميليون 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 حركتهاي افقى (راستالغز) ميدهند. اين داده در البرز مرکزی نیز تأیید شده است (عباسی و شعبانیان، ۲۰۲۰). مطالعات یادشده نشان دادند سه و نیم میلیون سال پیش، ابتدا تنش شمال باختری و بعد از آن، تنش شمالی-جنوبی برقرار شده و در پایان، پلایستوسن جوان تنش امروزین حاکم شده است. به گواه سازوکارهای کانونی بهدست آمده در البرز، جهت این تنش شمال خاوری است و به گواه دادههای سطحی حاصل از سطوح گسلی که با حل تانسور تنش بهدستآمدهاند، تنش شمال خاوری در رژیم زمین ساختی راستالغز فشاری حاکم شده است. مطالعات جنبشي انجامشده نشان ميدهند كه نخست سازوکارهای فشاری حاکم بودند (شکل ۱). در شش ايستگاه وسکاره، برگ جهان، افجه، کند، کفترلو و امامه، نسل اول خطخشها مؤید سازوکارهای فشاری است و نسل دوم نشان مىدهد سازوكارهاى راستالغز حاكم 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 پلایستوسن 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 می شود و در فارسی معادل مناسبی ندارد)، به طور کلی به این معنا است که جهت حرکت صفحههای زمین ساختی 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 نمی کنند، 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 می تواند 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 یدیده اثر خود را در داخل قارهها نیز به جا میگذارد. برای زمان تغییر جهت ورقههای زمین ساختی 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 یهنه فعالی چون ایران، ما را در مطالعات نوزمینساختی راهنمایی میکند. برای مثال، بسیاری از مطالعات انجامشده با بر آورد جابهجايي تجمعي در راستاي گسله مشا و تعمیم آن به شرایط امروزین، سعی بر تخمین آهنگ جابهجایی دارند. با دانستن تاریخ تحول میدان تنش یادشده، می توان دریافت که گسله مشا در سه و نیم میلیون سال پیش به صورت راست بر عمل کرده است (چالنکو، ۱۹۷۵). چالنکو برای تأیید این گفته به دایکهایی اشاره میکند که در خاور تهران با روند شمال خاوری در سنگهای توف تزریق شدهاند. روند این دایکها بیانگر حاکم شدن تنش با روند شمال باختری 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

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 می تواند به پاسخ درست بینجامد.

۳ دادههای گسلی از ترانشهها (روش)

برای این مطالعه در سه ترانشه حفرشده در نهشتههای جوان (اغلب هولوسن) اندازه گیری صفحههای گسلی صورت گرفته است. برای دو ترانشه، دادهها به قدری بود که بتوان از آنها تانسور تنش را محاسبه کرد. در این یژوهش تکیه بر اندازه گیری صفحههای اصلی گسلی است که در ترانشه های شمال تهران، مشا و فیروزکوه اندازه گیری شدند. اندازه گیریها 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، بهصورت خودکار حذف شدند. خطری که در اندازه-گیری 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 ديده شده است و مي تواند در كيفيت تانسور تنش مؤثر باشد، آن است که سازوکار گسلههای راستالغز می-تواند باعث چرخش صفحههای گسلی شود. برای جبران این خطا باید صفحههای گسلی زیادی برداشت شوند. در دو ترانشه گسله مشا و فیروزکوه بیش از یانزده 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 زمین لرزهها دیده شده است (برای مثال، زمين لرزه دشت بياض)؛ ازاين رو، براي جبران اين دست

ناهماهنگیها لازم است تانسور تنشی محاسبه شود که آرایش محورهای اصلی تنش آن و جهت تنش بیشینه محاسبه شده مؤید و هماهنگ با سازو کارهای کانونی موجود در منطقه مورد مطالعه باشد. بهترین مثال برای این موضوع، سازو کارهای کانونی به دست آمده از گسله مشا و گسله فیروز کوه است. با وجود اینکه این دو گسله در نزدیکی هم هستند و پایانه آنها در باختر شهر فیروز کوه به دهند. در این پژوهش از تعمیم سازو کارهای کانونی و گرفتن نتیجه کلی صرف نظر شده است؛ زیرا شرایط تنش و زمین ساخت می تواند در فاصله کیلومتری تغییر کند. در دو ترانشه مشا و فیروز کوه از سازو کارهای کانونی و اقع در دو ترانشه مشا و فیروز کوه از سازو کارهای کانونی و اقع در

۳-۱ ترانشه راندگی شمال تهران

ترانشه راندگی شمال تهران با همکاری سازمان زمین شناسی و دانشگاه مون پلیه (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 دوربر گردان یایانی بزرگراه در دسترس است (عدد ۱ در شکل ۱). صفحههای قابل اندازه گیری 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 جهتیافته، اندازه گیری خشخطها ممكن بود (شكل ۲-الف). بقيه 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 اندازه گیریها انجام شد. میانگین روند و شیب هشت صفحه در شکل ۲ با عدد مشخص شده است. میانگین

اینکه سازوکارهای گسلی با مؤلفه غالب شاقولی به سختی شناسایی می شوند به ویژه اگر مقدار جابه جایی شاقولی در راستای آنها کمتر از ۲ متر باشد. نکته دوم را باید در گسترش شهر تهران و پوشیده شدن آن با ساخت وسازهای شهری جستجو کرد. جابه جایی این گسله در ترانشه (شماره ۱) متر اندازه گیری شده است (...Ritz et al 2012، سازوکار کانونی دیرینه برای این گسله از نوع فشاری با مؤلفه کوچک افقی چپ بر است که مشخصات جنبشی آن در شکل ۲ - د نوشته شده است. صفحههای گسلی اندازه گیریشده از هشت صفحه با صفحههای گسلی همسو است و اعتبار این اندازه گیریها را تأیید میکند. بر این اساس، سازوکار کانونی دیرینه پیشنهادی میتواند مطابق با شکل ۲- د باشد. روند گسلی شمال باختری در این بخش یک گسله با راستای شمال باختری 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، شاسایی آن در عکسهای هوایی آسان نیست.



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 اندازه گیریشده. 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)

کششی است (شکل ۴- ب). از این دو نسل فقط نسلی از خش خطها که راستالغز چپ بر با مؤلفه کششی است، تانسور تنش مناسب تولید می کند که در محاسبات لحاظ شدند (شکل ۶- الف) و صفحههای گسلی با حرکتهای کششی مفحههای گسلی با حرکتهای کششی ناهمخوان با تانسور تنش حذف شدند. در شکل ۶- الف صفحههای گسلی همروند با روند ۹- الف صفحههای گسلی همروند با روند مومی گسله مشا پررنگ تر و در شکل ۶- ب بهصورت مجزا نمایش داده شدهاند. در شکل ۶-ب میانگین هندسه، روند و خش خط سه صفحه ج میانگین هندسه، روند و خش خط سه صفحه پیشنهادی به نمایش درآمده است (مشخصات صفحه گسلی و چگونگی جنبش آن در زیر شکل نوشته شده است.) ۳-۲ ترانشه گسله مشا مطالعه این ترانشه با همکاری پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی، سازمان زمین شناسی و دانشگاه مون پلیه (فرانسه) صورت گرفت. روی دو ترانشه حفر شده ترانشه شماره ۱ (شکل ۴ – الف) حفر شد که در آن صفحه های گسلی همسو با روند عمومی گسل، مشخص تر اندازه گیری شدند (شکل ۴ – ب). در این بخش از گسله مشا، گسلش به طور مشخص سازند هولوسن را می برد. مهم ترین اندازه گیری ها از صفحه های اصلی گسلی در این ترانشه انجام شد. صفحه های گسلی اندازه گیری شده دو نسل خش خط را نشان می دادند 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



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

در ترانشه شماره ۲ که در بخش جنوبی تر و روندهای شمالی – جن نزدیک به کف دره حفر شد (شکل ۵)، آمیزهای محاسبات تانسور تنش از سنگ و آبرفتهای جوان رخنمون داشت. این شکل ۵- الف پشتههای ترانشه پهنهای از گسلههای جوان و قدیمی را چپبر جابهجا شدهاند دربرمی گرفت که بهصورت مشخص، روندهای نشان داده شده است. د اصلی گسلش در آن نسبت به ترانشه شماره ۱ چپ، نمایی از ترانشه اندازه گیری نشد، اما جهتهای دیگری چون است (شکل ۵- ب).

روندهای شمالی – جنوبی دیده می شد که در محاسبات تانسور تنش به کمک گرفته شد. در شکل ۵- الف پشتههای جابه جاشده که به صورت چپبر جابه جا شدهاند با سه گوش های تو خالی نشان داده شده است. در پایین همان شکل، سمت چپ، نمایی از ترانشه حفر شده به نمایش در آمده است (شکل ۵- ب).



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. سهگوش های سیاهرنگ، جابهجایی پشتهها را بهصورت چپبر نشان میدهند. (ب) تصویری از ترانشه حفرشده (نگاه به سوی جنوب).



شکل ۴. 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

> 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

مشخص کمتر دیده میشوند. دیوارههای ترانشه حاوی نهشتههای ریزدانه از نوع سیلتی-رسی است و قلوهسنگیهای گردشده در این بستر قرار دارند. بیشترین اندازه گیریها روی همین قلوهسنگیها صورت گرفت. خش خطها به صورت بارز روی این قلوهسنگها شکل گرفتهاند و اندازه آنها در حد سانتی متر است.

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



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) سازوکارکانونی پیشنهادی (دیرینه) بر اساس میانگین مشخصات گسلی. مشخصات صفحه اصلی در زیر شکل نوشته شده است.

سازوکار یک صفحه گسلی در محاسبات ناشناخته است که البته همخوانی کمتری با روند عمومی گسله فیرزوکوه 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 (NV۴E) و دیگری همخوانی کمتری با روند عمومی گسله دارد (شکل ۷– ب). به روال قبل، میانگین روند، هندسه و زاویه بردارهای لغزش بهدست آمد. با توجه به میانگین بهدست آمده، روند عمومی گسله فیروزکوه، جایی که افراز گسلی آن نهشته جوان را می برد 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 اندازه گیریهای انجامشده در محل، بیانگر یک گسله با سازوکار راستالغز چپ بر با مؤلفه کوچک فشاری نزدیک به ۱۳ درجه است (شکل مؤلفه کوچک فشاری نزدیک به ۱۳ درجه است (شکل

۴ کاربرد تانسور تنش امروزین برای بر آورد سازوکارها و روندهای فعال

تنش امروزین دادهای است که معمولاً از سازو کارهای کانونی و با روش برگشتی از صفحههای گسلی محاسبه می شود. روش برگشتی بهویژه در سازندهای جوان (پلایستوسن جوان و هولوسن) بسیار نزدیک به واقعیتهای زمین ساختی موجود است. منظور از تانسور تنش در روش برگشتی، اندازه گیری صفحههای گسلی و خش خطهای آنهاست که در یک جهت تنش مشخص با تعداد دست کم چهار صفحه گسلی با روندهای متفاوت یک تانسور تنش را تعریف کند. البته هدف اصلی این روش در گام نخست، بر آورد جهت تنش بیشینه نیست؛ زیرا این جهت را می توان با تکیه بر سازو کارهای کانونی (محور

فشردگی) یا دو صفحه مزدوج درزه نیز بهدست آورد. باید تأکید شود که گاهی برخی از زمین شناسان جهت کرنش را که از جهت عمود بر محور چین خوردگی ها بهدست-می آید با جهت تنش اشتباه می گیرند. 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، بهدستآوردن بیضوی تنش است که تعریف کننده رژیم زمینساختی است. در این پژوهش کمتر به شرایط یک تانسور مناسب پرداخته شد؛ این موضوع خارج از هدف این مطالعه است و می تواند 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 بهدست 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 سازو کار کانونی است (شکل ۲- ج). تطابق نداشتن صفحههای گسلی بهدستآمده از سازوکارهای کانونی می تواند 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 اشتری و همکاران (۲۰۰۵)، به روند عمومی گسله مشا نزدیک تر است. نتيجه بهدست آمده از تانسور تنش نيز نزديكي خوبي به روند عمومی گسله نشان میدهد. با حرکت به سوی پایانه خاوری گسله مشا، حل سازوکار کانونی با مؤلفه کششی زیادی همراه می شود (جدول ۱). علت این افزایش مؤلفه کششی می تواند مربوط به پایانه گسلی باشد که به طور معمول با آشفتگی 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

نزدیک به خاور تهران کار کردند و نتایج دیگری از اندازه گیری 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 پیش رو نمی تواند مناسب باشد؛ زیرا این بخش گسله مشا پایان باختری 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 بەنظرمىرسد. در ھندسە گىلەھا كمترين تطابق را حل نعمتي و همكاران (۲۰۱۱) نشان مي دهد (شكل ۸). ريتز و

همکاران (۲۰۰۶) سازو کار این گسله را با مؤلفه کششی معرفی کردهاند، اما اندازه گیریهای انجام شده در ترانشه و سازو کارهای کانونی این نظر را تأیید نمی کند. همان طور که در جدول ۲ دیده می شود، این گسله سازو کار راستالغز چپر با مؤلفه شاقولی فشاری دارد. سازو کار کانونی دیرینه نیز مؤید همین نظر است (شکل ۷- ج).

نظری و همکاران (۲۰۱۴) به سازو کارهای کانونی مؤمنی (۲۰۱۲) استناد می کنند (مقایسه شود با شکل ۱۵.). در این شکل سازو کارهای کانونی از نوع کششی با مؤلفه کوچک راستالغز هستند که در تضاد با نظر نویسندگان قرار دارد؛ زیرا آنها در بخش چکیده و نتیجه گیری اذعان می کنند سازو کار این گسله از نوع راستالغز با مؤلفه کوچک کششی است. از سوی دیگر، باید تأکید کرد که سازو کارهای کانونی بهدست آمده در کار مؤمنی (۲۰۱۲) با خردلرزهها حل شدهاند. این در حالی است که رویدادهای لرزهای با بزرگای بیش از ۵ (۵< M) حکایت از سازو کار راستالغز دارد. در حل این سازوکارها بازنگری شد (جکسون و همکاران، ۲۰۰۲).

تاريخ	عرض جغرافيايي	طول جغرافيايي	روند	شيب	ریک	مرجع*
7/.۶/.۶	30/11	۵١/٩٣	۲۸.	۵۳	-٣۶	А
Y • • \$/ • V/YV	30/V·	۵۲/۳۶	79.	٧.	-14	Т
Y • • \$/ • V/YV	30/V1	67/48	110	٧.	-110	CMT
	30/VT	67/19	۲۸۵	٧۵	-18	اين مطالعه

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

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

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

تاريخ	عرض جغرافيايي	طول جغرافيايي	روند	شيب	ریک	مرجع*
7	MO/VL	57/97	٩٠	۲۸	74	CMT
۲۰۰۸/۰۱/۲۶	MO/VA	۵۲/۹۷	٨.	۴.	25	Ν
	۳۵/۸۲	57/97	V۵	٨.	۱۹	J
	30/VA	۵۲/۸۵	٨V	٧۴	١٣	اين مطالعه

^{*} N: نعمتي و همكاران (۲۰۱۱)؛ L: جكسون و همكاران (۲۰۰۲).



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

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 اندازه گیری جنبشی از سطح زمین هماهنگی مناسبی را با سازو کارهای کانونی بهدست آمده از عمق متوسط ۱۲ کیلومتری نشان میدهد (شکل های ۶، ۷ و ۸ و جدول های ۱ و ۲). با تکیه بر صفحه گسلی در ابعاد سانتیمتر در سطح زمین، چنانچه تانسور تنش مناسبی حل شود، می توان با اطمینان سازو کار کانونی دیرینه را پیشنهاد داد به ویژه در مناطقی که دادههای لرزهای در دست نیست. در چنین مناطقی این دادهها جایگزین مناسبی برای جبران کمبودهای لرزهای هستند.

ازآنجاکه برقراری تنش شمال خاوری امروزین جوان

است (مراحل پایانی پلایستوسن جوان)، کار با شاخصهای مورفومتریک فقط در سازند پلایستوسن جوان و هولوسن تأییدشدنی است؛ ازاینرو، هر اندازه گیری شاخص مورفومتریک که خارج از این بازه زمانی صورت بگیرد، نمی تواند به صورت حتمی منعکس کننده جنبش های نوزمین ساختی و عهد حاضر باشد.

روندهای گسلی باختر – شمال باختر در میدان تنش کنونی با سازوکار چیره فشاری عهدهدار کوتاه شدگی 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 (۵±۱۸) در رژیم زمینساختی راستالغز ترافشارشی است. 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: <u>http://www.seismology.harvard.edu/CMTsear</u> <u>ch.html</u>.
- 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 strikeslip 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, Paleoearthquakes 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 (Kopeh 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 paleoseismolical 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