

رسیدگی ساختاری گسله‌های مسبب زمین‌لرزه در گستره خاور ایران و الگوی فرگشت فعالیت لرزه‌خیزی در آن

نیره صبور^{۱*}، محمدرضا قاسمی^۲، معصومه اسکندری^۳، علی نظری فهندری^۴، منوچهر قرشی^۵ و فریدون سیناییان^۶

^۱ کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۲ دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۳ دکتر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۴ کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه علوم پایه دامغان، دامغان، ایران

^۵ دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران؛ پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۶ دکتر، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۲۴

چکیده

گسله‌های لرزه‌زا بسته به رسیدگی ساختاری (structural maturity) خود ممکن است در یک تکه و یا تکه‌های چندگانه گسیخته شوند، همچنین می‌توانند لغزش‌های متفاوتی را بر روی آن تکه‌ها از خود نشان دهند. گسله‌های رسیده به گونه گسیختگی‌های دراز با دامنه لغزش کم و گسله‌های نارس به گونه گسیختگی‌های کوتاه‌تر اما پرنرژتری می‌شکنند. از سوی دیگر گسله‌های رسیده در تکرار فعالیت لرزه‌خیزی خود به صورت خوشه‌ای رفتار می‌کنند در حالیکه این پدیده را در گسله‌های نارس نمی‌توان یافت. همچنین جنبش زمین حاصل از فعالیت گسل‌های نارس، شدیدتر از جنبش مربوط به گسل‌های رسیده است. در این پژوهش ما به ارزیابی رسیدگی برخی گسله‌های مهم گستره خاور ایران بر اساس تکه‌بندی، درازای گسیختگی، میزان جابه‌جایی بر روی گسله و الگوی تکرار رویداد زمین‌لرزه بر روی گسله‌ها پرداختیم. طیف پاسخ جنبش زمین‌لرزه‌های بزرگی که بر روی این گسله‌ها روی داده‌اند و در میدان نزدیک ثبت شده‌اند، مورد تحلیل قرار گرفت. زمین‌لرزه‌ها با سازوکارهای گوناگون و با بزرگایی در محدوده $5/V < Mw < 7/1$ انتخاب شدند و طیف پاسخ‌های به دست آمده از آنها با طیف‌های استخراج شده از رابطه تجربی بور و همکاران، به عنوان مبنا، مقایسه شد. به باور ما بررسی این فراسنج (factor) می‌تواند به شناسایی بهتر توان جنبشی این گسله‌ها کمک کند و گنجاندن آن در روابط کاهندگی باعث افزایش سطح دقت در ارزیابی خطر زمین‌لرزه شود. در پایان، با توجه به رسیدگی ساختاری گسله‌های خاور ایران، تلاش شد تا الگویی برای فرگشت (evolution) فعالیت لرزه‌خیزی در میان گسله‌های آن گستره ارائه شود.

کلید واژه‌ها: رسیدگی ساختاری، گسله‌های رسیده و نارس، جنبش زمین در میدان نزدیک، خاور ایران، الگوی فرگشت فعالیت لرزه‌خیزی، لرزه‌زمین‌ساخت.

E-mail: saboor.nayereh@gmail.com

*نویسنده مسئول: نیره صبور

۱- پیش‌نوشتار

دگرریختی جنبه در ایران حاصل همگرایی صفحه‌های تازی- اوراسیا است. فلات ایران با دگرریختی خود نرخ همگرایی 22 ± 2 mm/yr در راستای $N8 \pm 5^\circ E$ (Vernant et al., 2004) را بین این دو صفحه جبران می‌کند. این همگرایی برخلاف بخش‌های دیگر سامانه آلپ- هیمالیا که دگرریختی در ناحیه بزرگی به طول چندین هزار کیلومتر گسترده شده‌است در یک منطقه به نسبت کوچک، که به وسیله مرزهای سیاسی ایران مشخص می‌شود، انباشته می‌شود (Walker & Jackson, 2004). حرکت به سوی شمال فلات ایران و پایین بودن نرخ جابه‌جایی بلوک هلمند نسبت به اوراسیا موجب ایجاد برش راست‌بر، بین ایران مرکزی و افغانستان (16 mm/yr)، (Vernant et al., 2004) $-14/2 \text{ mm/yr}$ ، (Masson et al., 2005) شده‌است که بر روی گسله‌های راست‌الغز راست‌بر شمالی- جنوبی در اطراف کنده لوت انباشته می‌شود. این برش در شمال طول جغرافیایی $34^\circ N$ ، بر روی گسله‌های چپ‌بر که ساعت‌گرد به دور محورهای قائم می‌چرخند انباشته می‌شود (Walker & Jackson, 2004). همه این رویدادها فلات ایران را به یک ناحیه جنبه با جنبش‌های متعدد و گاهی بزرگ تبدیل کرده‌است. شناسایی میزان جنبش زمین در حین زمین‌لرزه محتمل و تعیین سطح خطرپذیری گسله‌ها دغدغه‌ای مهم است و این مسئله در نواحی کویری ایران که جمعیت، به سبب دسترسی به آب در پیشانی کوهستان و بر روی گسله‌ها ساکن می‌شوند (Jackson, 2006) اهمیت دوچندان می‌یابد. آنچه گفته شد لزوم مطالعه هرچه بیشتر گسله‌های لرزه‌زای ایران و یافتن فراسنجهای نوین حاکم بر جنبایی آنها را نشان می‌دهد.

۲- مجموعه داده‌ها

داده‌های مربوط به ۱۳ زمین‌لرزه دستگاهی بزرگ ($M_w \geq 5.7$) در خاور ایران با توجه به مطالعاتی که در گذشته بر روی آن زمین‌لرزه‌ها انجام شده بود (Sarkar et al., 2005; Berberian et al., 1999; Berberian et al., 1984; Walker & Jackson, 2002; Berberian et al., 2001; Berberian, 2005; Talebian et al., 2004; Jackson et al., 2006; Tchalenko & Berberian, 1975) جمع‌آوری شد (جدول ۱). این داده‌ها، هندسه سطحی گسله (طول گسیختگی، تکه‌بندی و میزان جابه‌جایی تجمعی روی گسیختگی)، سازوکار گسلش، بزرگای زمین‌لرزه و ژرفای کانونی آن را دربرمی‌گیرد. داده‌های شتاب‌نگاشت مربوط به ۱۲ زمین‌لرزه از این گستره (شتاب‌نگاشتی از زمین‌لرزه سال ۱۹۶۸ دشت‌بیاض ثبت نشده‌است) تهیه شد. برای کاهش اثر مسیر انتشار موج بر روی رفتار موج در ایستگاه‌های مختلف تنها از نگاشت‌های میدان نزدیک (near field) (فاصله کمتر از ۸۰ کیلومتر از مرکز زمین‌لرزه، به استثنای زمین‌لرزه زرد که به دلیل وجود ایستگاه‌های ثبت زمین‌لرزه زیاد و عدم وجود محدودیت، برای کاهش بیشتر اثر ساختگاه این فاصله به ۴۰ کیلومتر تقلیل یافت) استفاده شد و برای کاهش اثر ژرفای زمین‌لرزه تنها زمین‌لرزه‌های با ژرفای کمتر از ۲۰ کیلومتر در این پژوهش گنجانده شد.

۳- روش کار

شرایط چشمه زمین‌لرزه فراسنج تعیین‌کننده‌ای در جنبش زمین است. از جمله این شرایط می‌توان به سازوکار زمین‌لرزه (عادی، معکوس و راست‌الغز)،

۴- گستره مورد بررسی

خاور ایران به علت توان لرزه‌خیزی بالا، گسله‌های جنبای متعدد و جایگاه زمین‌ساختی یکسان، مکان مناسبی برای ارزیابی معیار رسیدگی ساختاری گسله‌ها در ایران است. از این گستره سه گسله در شمال‌خاوری کنده‌لوت شامل گسله‌های آبیژ و بزآباد با روند به تقریب شمال-شمال‌باختر و گسله دشت‌بیاض با روند خاوری-باختری و سه گسله گوک، بم و کوه‌بنان با روند به تقریب شمال-شمال‌باختر در جنوب‌باختری آن مورد بررسی قرار گرفت.

- گسله آبیژ

گسله آبیژ با راستای عمومی شمالی-جنوبی در بخش شمال‌خاوری رشته‌کوه سیستان که در ادامه پهنه زمین‌درز سیستان (Sistan suture zone) است، واقع شده‌است (شکل ۲). دگرریختی فعال عهد‌حاضر در این پهنه به وسیله گسلش‌های راستالغز بزرگ راست‌بر با روند NNW-SSE همانند گسله آبیژ (اگرچه در برخی نواحی با توپوگرافی همراه شده و روند N-S یافته‌است و در پایانه شمالی جایی که به انتهای خاوری گسله دشت‌بیاض می‌پیوندد روند NNE-SSW دارد)، افزون بر این، تعدادی گسله راندگی با روند NW-SE و همچنین گسله‌های راستالغز با روند E-W محدود می‌شود. در جنوب طول جغرافیایی $34^{\circ}N$ ، گسل‌های راستالغز راست‌بر، گسل‌های رانده و راستالغز چپ‌بر را بریده‌اند و این حاکی از چیره‌بودن دگرریختی راستالغز راست‌بر شمالی-جنوبی در گستره است (Berberian et al., 1999).

گسله آبیژ طی زمین‌لرزه ۱۹۷۹ کریشان-خواف در یک درازای ۲۰ کیلومتری گسیخته‌شد. بیشینه جابه‌جایی ثبت‌شده بر روی آن ۱ متر بوده و در حدود یک تا سه تکه گسیختگی نیز بر روی آن گزارش شده‌است. این گسله در فعالیت بعدی خود در سال ۱۹۹۷ که زمین‌لرزه زیرکوه نامیده شده‌است، زمین را در ۱۲۵ کیلومتر گسیخت (شکل ۲) و بیشینه جابه‌جایی $2/3$ متر بر روی آن ثبت شد. در این زمین‌لرزه تعداد ۱۰ تکه بر روی گسیختگی زمین‌لرزه شناسایی شد (Berberian et al., 1999). بر اساس آن‌چه در بخش روش مطالعه گفته‌شد، ویژگی‌های هندسه گسیختگی دو زمین‌لرزه مربوط به گسله آبیژ در سطح، رفتار یک گسله رسیده را از خود نشان می‌دهند و فعالیت خوشه‌ای گسله در بازه درازمدت نیز رسیدگی آن را تأیید می‌کند (Berberian, 2005) (جدول ۲). در نمودار تهیه شده از شتاب‌نگاشت‌های مربوط به دو زمین‌لرزه (شکل ۱) نیز میانگین جنبش‌های ثبت‌شده از آنها در ایستگاه‌های میدان نزدیک، در پایین خط مبنای بور واقع شده و دلیل دیگری بر رسیده‌بودن گسله آبیژ است.

- گسله بزآباد

زمین‌لرزه ۲۵ ژوئن ۱۹۹۷ در گستره دشت‌بیاض بر روی گسله بزآباد با راستای شمالی-جنوبی و بزرگای $M_w = 5/7$ رخ داده‌است. گستره لرزه زده در ۴۰-۲۰ کیلومتری باختر پایانه شمالی گسیختگی‌های حاصل از زمین‌لرزه‌های روی داده بر روی گسله آبیژ واقع شده‌است. بیشینه خرابی حاصل از زمین‌لرزه در بزآباد، خرم‌آباد و ابراهیم‌آباد ایجاد شد و به‌سوی شمال و گسله دشت‌بیاض از شدت خسارات کاسته می‌شود. پراکندگی خسارات در زمین‌لرزه ۱۹۷۹ بزآباد نیز بدین گونه بوده‌است (Berberian et al., 1999).

متأسفانه از گسیختگی سطحی و تاریخچه لرزه‌خیزی گسله بزآباد که در باختر گسله آبیژ واقع شده‌است، اطلاعی در دست نیست و به ناچار تنها به مطالعه نگاشت‌های ثبت‌شده از دو زمین‌لرزه روی داده بر روی آن بسنده می‌کنیم. در نمودارهای مدل شده برای دو زمین‌لرزه آن منحنی میانگین جنبش در ایستگاه‌ها در پایین خط مبنای بور قرار دارد (شکل ۱) و یک گسله رسیده است. بنابراین دو گسله آبیژ و بزآباد با روند شمال-شمال‌باختر گسله‌هایی رسیده هستند.

- گسله دشت‌بیاض

سامانه گسلی دشت‌بیاض و آبیژ در طی سده اخیر شاهد توالی از زمین‌لرزه‌ها بوده‌است که توسط Berberian & Yeats (1999) و Berberian et al. (1999) جمع‌آوری

زمین‌ساخت ناحیه‌ای، بود یا نبود لغزش همزمان با زمین‌لرزه در سطح زمین، مفهوم زمین‌ساخت صفحه‌ای (plate tectonic) (گسله‌های درون صفحه‌ای در برابر گسله‌های بین صفحه‌ای)، نرخ لغزش درازمدت، هندسه و رسیدگی ساختاری (structural maturity) (Manighetti et al., 2007) اشاره کرد. این فراسنج‌ها تأثیر بسزایی در تنوع ویژگی‌های زمین‌لرزه (تنوع در افت تنش (stress drop)، دامنه لغزش، درازای گسیختگی و بزرگای) دارند. Manighetti et al. (2007) بر این باورند که گوناگونی افت تنش در زمین‌لرزه‌های مختلف نتیجه آن است که این زمین‌لرزه‌ها از گسیختگی تعداد گوناگون تکه‌های گسله پدید می‌آیند. این تعداد به مقاومت پهنه‌های بین تکه‌ای (inter-segment zones) وابسته است که خود به رسیدگی ساختاری گسله‌ها بستگی دارد. آنها بر این باورند که تکه‌بندی گسله‌ها نیز همانند تاریخچه لغزش باید در تحلیل مقیاس‌بندی زمین‌لرزه‌ها به کار گرفته شود زیرا این ویژگی (تکه‌بندی گسله‌ها) تعیین‌کننده چگونگی افزایش طول (گسلش) زمین‌لرزه است و از این رو به شدت بر رابطه‌های میان لغزش و درازای گسلش زمین‌لرزه تأثیر می‌گذارند. بر اساس این انگاره، گسله‌های لرزه‌زاسته به رسیدگی خود ممکن است در یک تکه یا در تکه‌های چندگانه گسیخته شوند. از سوی دیگر گسله‌های دارای درازای یکسان بسته به رسیدگی ساختاری (structural maturity) خود ممکن است لغزش‌های چندان متفاوتی از خود نشان‌دهند؛ گسله‌های رسیده به گونه‌ای آشکار در گسیختگی‌های دراز با دامنه لغزش کم (کمتر از ۴ تا ۷ متر) می‌شکنند. در برابر، گسله‌های نارس‌تر به گونه گسیختگی‌های کوتاه‌تر اما پراثرتری می‌شکنند که لغزش‌هایی تا حد ۱۵ متر ممکن است از آنها انتظار رود.

بنابراین رسیدگی ساختاری گسله‌ها فراسنجی است که به میزان لغزش بر روی گسیختگی و درازای گسیختگی سطحی وابسته است (Manighetti et al., 2007) و بنابراین اثر بزرگ را در چشمه زمین‌لرزه‌ها مهار می‌کند و فراسنج مهمی در معادله‌های پیش‌بینی جنبش زمین (GMPEs) (ground-motion prediction equation) است (Radigue et al., 2009). از سوی دیگر گسله‌های رسیده، در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت، در رویدادهای چندگانه (multiple events) با بزرگای گوناگون گسیخته می‌شوند و در مقیاس‌های زمانی درازمدت به صورت خوشه‌ای (cluster) رفتار می‌کنند. به بیان دیگر، گسله فعال شده و چند رویداد لرزه‌ای به نسبت بزرگ را سبب می‌شود و سپس تا دوره فعالیت بعدی، برای مدتی در آرامش بوده و فعالیت لرزه‌ای بزرگی روی آن دیده نمی‌شود. در مقابل، گسله‌های نارس دارای نوعی پراکندگی یکنواخت از اندازه‌های گوناگون زمین‌لرزه‌ها هستند (Liu-Zeng et al., 2005). این دو روش برای تحلیل گسله‌های لرزه‌زای خاور ایران به کار گرفته‌شد و رسیدگی ساختاری آنها از این دو دیدگاه مورد بررسی قرار گرفت. سپس داده‌های شبکه شتاب‌نگاری کشور (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن) برای ۱۲ زمین‌لرزه خاور ایران مورد بررسی قرار گرفت و همه شتاب‌نگاشت‌ها مورد تصحیح خط مبنا قرار گرفتند. طیف پاسخ شتاب جنبش افقی زمین مربوط به هر زمین‌لرزه در محدوده پریود ۰/۱-۲ ثانیه محاسبه شد. در محاسبه طیف پاسخ از روش هال-نیومارک استفاده شد. طیف‌های به‌دست آمده به شتاب‌های طیفی به دست آمده از رابطه کاهندگی (Boore et al., 1997) به‌نجار شدند. سپس بر اساس رابطه Boor et al. (1997) برای هر زمین‌لرزه در هر ایستگاه شتاب جنبش افقی زمین با توجه به بزرگی و فاصله آن از کانون زمین‌لرزه محاسبه شد. میانگین این مقدار شتاب در ایستگاه‌های مختلف به عنوان مبنای سطح جنبش زمین برای تعیین رسیدگی ساختاری گسله مورد مطالعه در محدوده پریود ۰/۱-۲ ثانیه انتخاب شد و طیف پاسخ هر زمین‌لرزه به این مقدار میانگین به‌نجار شد (شکل ۱). فزونی یا کاستگی طیف پاسخ هر زمین‌لرزه از این سطح مبنا اساس تعیین رسیدگی یا عدم رسیدگی گسل مسبب آن زمین‌لرزه به شمار آمد.

($29^{\circ}03'N$)، به سوی SE متمایل می شود و نشانه هایی از مؤلفه راندگی در آن آشکار می شود.

سامانه گسلی گلیاف در طی سال های ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۸ میلادی شاهد پنج رویداد زمین لرزه با بزرگای $7/1 - 5/4$ بوده است (جدول ۳). طی زمین لرزه $1981/06/11$ سله گوک در یک تکه 15 کیلومتری گسیخته شد. این گسیختگی بادن های ماسه ای جوان و کفه های رسی را بریده است. سازوکار گسله طی این رویداد که زمین لرزه گلیاف نامیده شده است، راندگی با مؤلفه راستالغز راست بر تشخیص داده شده است. بیشینه جابه جایی راستالغز ثبت شده بر روی گسیختگی حاصل از آن $0/5$ متر و بیشینه این جابه جایی در راستای شاقولی $0/3$ متر بوده است (Berberian et al., 1984).

۵۰ روز پس از آن در 28 ژوئیه 1981 زمین لرزه دیگری با بزرگای $7/1$ گسیختگی سطحی 65 کیلومتری را در 3 تکه به دنبال داشت. بیشینه جابه جایی ثبت شده بر روی این گسیختگی $0/5$ متر بود. این زمین لرزه به احتمال تحت تأثیر زمین لرزه پیشین و در پی پدیده چکانش (Triggering) ایجاد شده است. در پایانه جنوبی گستره زمین لرزه ای 1981 ، زمین لرزه دیگری در 20 نوامبر 1989 بر روی تکه کوتاهی از سامانه گسله گوک که در توالی زمین لرزه های 1981 فعالیتی نکرده بود، روی داد. این زمین لرزه که زمین لرزه جنوب گلیاف نام گرفت، گسله را در دو تکه گسیخته کرد. یکی از تکه های گسیختگی به طول 11 کیومتر در سوی باختری فروافتادگی و تکه دیگر به طول 8 کیلومتر در سوی خاوری آن واقع شده است (شکل ۴). تکه باختری سازوکار راندگی بزرگ زاویه با راستای $N165E$ و شیب 60 درجه به سوی باختر- جنوب باختر را نشان می دهد و تکه باختری به سوی بالا حرکت کرد و شواهدی از حرکت راستالغز راست بر نیز نشان می داد. بیشینه جابه جایی مشاهده شده در سطح زمین 1 سانتی متر در راستای شاقولی و 4 میلی متر به صورت راستالغز بوده است. تکه خاوری نیز مؤلفه راندگی بزرگ زاویه با شیب به سوی خاور را نشان می دهد که رسوبات آبرفتی هولوسن را بریده است (Berberian & Qorashi, 1994).

در 14 مارس 1998 گستره گلیاف شاهد رویداد زمین لرزه ای دیگر با بزرگای $Mw=6/6$ بود. این زمین لرزه که فندقا نامیده شد در یک تکه 23 کیلومتری گسیخته شد. گسیختگی سطحی راستای $N24W$ داشته و جابه جایی راستالغز راست بر بیشینه 3 متر (جابه جایی به نسبت بزرگ مشاهده شده بر روی گسیختگی فندقا را می توان به ژرفای کانونی به نسبت کم آن (در حدود 5 متر) نسبت داد (Berberian et al., 2001)) و شاقولی از نوع راندگی با بیشینه جابه جایی 1 متر برجای گذاشت. این گسیختگی از هشتادان در شمال تا زمان آباد در جنوب امتداد یافته است. 14 کیلومتر از گسیختگی به سوی خاور و 9 کیلومتر آن به سوی باختر شیب دارد (Berberian et al., 2001).

طی سال های 1877 تا 1998 در حدود 10 زمین لرزه بزرگ ($Mw > 5/2$) بر روی گسله گوک رخ داده است که 7 زمین لرزه آن طی 63 سال اخیر بوده اند (جدول ۳). این 7 زمین لرزه می تواند رفتار خوشه ای (Clustering) گسله گوک را که دلیلی بر رسیده بودن آن است نشان دهد، اگرچه نبود داده های تاریخی کافی، درستی این مدعا را مورد پرسش قرار می دهد. افزون بر این همان گونه که گفته شد زمین لرزه های متعددی که بر روی گسله گوک روی داده است، گسیختگی هایی با تعداد تکه های کم و جابه جایی های محدود برجای گذاشته اند همچنین قرارگیری منحنی میانگین جنبش ایستگاه های ثبت کننده هر کدام از زمین لرزه ها در پایین خط مبنای بور گویای رسیده بودن این گسله است.

نکته قابل توجه بر روی این گسله این است که گسله گوک اگرچه در طی زمین لرزه های مختلف رفتارهای متفاوتی را از دیدگاه ویژگی های گسیختگی سطحی نشان داده است، ولی در همه 5 فعالیتی که از آن طی سال های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، جنبش های یکسانی را در سطح زمین و نمودارهای مشابهی را در میانگین جنبش ایستگاه های ثبت زمین لرزه ایجاد کرده است (شکل ۱). در صورتی که حتی بزرگای زمین لرزه متفاوت و تکه فعال شده گسله متفاوت بوده است. این پدیده

شده است. گسله زمین لرزه ای دشت بیاض با راستای خاوری- باختری، با گسیختگی سطحی 70 کیلومتری ناشی از زمین لرزه $1968/8/31$ دشت بیاض با بزرگای $M_s = 7/4$ (Ambraseys & Tchalenko, 1968)، $M_w = 7/1$ (Walker et al., 2004) و 50 کیلومتری ناشی از زمین لرزه $1979/11/27$ با بزرگای $M_s = 7/1$ (Berberian & Yeats, 1999) مشخص شده است (شکل ۳). در زمین لرزه 1968 صفحه گسله دارای شیب $80 - 85$ درجه به سوی جنوب بوده است. این گسله دارای مؤلفه راستالغز چپ بر و مؤلفه شیب لغز آن از نوع معکوس می باشد. بیشینه جابه جایی راستالغز حاصل از زمین لرزه در دره نیمبلوک $4/5$ متر اندازه گیری شده است. این جابه جایی برای مؤلفه شاقولی به $2/5$ متر (Tchalenko & Berberian, 1975) تا $1 - 2$ متر (Ambraseys & Tchalenko, 1968) می رسد. گسترش گسیختگی حاصل از زمین لرزه از باختر به خاور بوده است و اثر گسیختگی در تکه خیدبس در حدود 1 کیلومتر به طرف شمال جابه جا شده است (Tchalenko & Barbarian, 1975). ژرفای کانونی زمین لرزه 15 کیلومتر برآورد شده است. روکانون زمین لرزه که دوباره تعیین محل شده است، $34^{\circ} 3/1' N$ ، $58^{\circ} 57' E$ را نشان می دهد (Engdahl et al., 1998)، که به تقریب در میانه درازای گسیختگی سطحی با 8 km فاصله واقع شده است. با توجه به این که روکانون زمین لرزه ها در خاور ایران با دست کم 10 km خطا تعیین می شود و به طور نوعی در شمال خاور روکانون واقعی قرار دارند (Berberian, 1979; Ambraseys, 2001)، بنابراین به نظر می رسد که این زمین لرزه در طول خط گسیختگی سطحی ایجاد شده است (Walker et al., 2004).

از این زمین لرزه متأسفانه نگاشتی به ثبت نرسیده است ولی با توجه به این که گسله طی دو زمین لرزه روی داده بر روی آن (دشت بیاض 1968 و کولی- بنیاد 1979) در گسیختگی های به ترتیب 70 و 50 کیلومتری 15 و 10 تکه فرعی ایجاد کرده است و بیشینه جابه جایی ایجاد شده که برای هر دو به $4/5$ متر می رسد (جدول ۱) و با توجه به جنبش های ثبت شده از زمین لرزه کولی- بنیاد که در ایستگاه های مختلف ثبت شده است و میانگین آنها در جایی بالاتر از خط مبنای بور قرار می گیرد (شکل ۱)، گسله دشت بیاض گسله ای نارس است.

در مورد تاریخچه لرزه خیزی گسله دشت بیاض باید گفت زمین لرزه های زیادی برای گستره دشت بیاض ثبت شده است ولی هیچ یک از آنها به طور مستقیم به گسله دشت بیاض نسبت داده نشده است بلکه عامل آنها گسله های اطراف، شامل گسله های قائن، گناباد، فردوس و بز آباد ذکر شده است (رده، 1370). بنابراین برپایه اطلاعات موجود، فعالیت خوشه ای را در فعالیت گسله در گذر زمان نمی توان مشاهده کرد.

– گسله گوک

سامانه گسلی گوک (گلیاف) خود بخشی از سامانه گسلی بزرگ تر نایبند- گلیاف- سبزواران است و مرز باختری کننده لوت را تشکیل داده است و با راستای کلی NNW-SSE، درازایی در حدود 180 کیلومتر دارد (شکل ۴). این گسله دارای شیبی تند، ($60 - 90$ درجه) به هر دو سوی خاور و باختر است و از چندین تکه گسله با ساختار نردبانی (En-echelon) شکل گرفته است (Berberian et al., 1984). کمینه نرخ لغزش بر روی این گسله $0/7 \pm 3/8$ mm/yr گزارش شده است (Walker et al., 2010). سازوکار اصلی گسله گلیاف راستالغز راست بر است و مؤلفه شیب لغز بر روی آن به هر دو صورت عادی و معکوس طی زمین لرزه های مختلف دیده شده است. فرگشت ریخت زمین ساختی آن نیز هر دو مؤلفه شیب لغز عادی و معکوس را نشان می دهد (Walker & Jackson, 2002). این گسله مجموعه بلندی های تشکیل دهنده لبه جنوب خاوری فلات کرمان را بریده است. سامانه گسلی گوک با دره های خطی باریکی که چندین حوضه رسوبی ژرف را از شمال به جنوب، شامل چهارفرسخ، جوشان- هشتادان، فندقا، گلیاف و جنوب گلیاف به هم متصل می کند، برجسته می شود. گسله از شمال با گسله نایبند و از جنوب با رشته کوه های جبال بارز محدود می شود. در پایانه شمالی ($30^{\circ} 05' N$)، گسله به سوی NW و در پایانه جنوبی

داهویه گسیختگی‌های سطحی به طول ۱۳ کیلومتر را در راستای E-W به دنبال داشته‌است. این گسیختگی شامل دو تکه اصلی است که شیل، سنگ‌ماسه و سنگ آهک‌های به سن تریاس- ژوراسیک را بریده‌است (شکل ۷). بیشینه جابه‌جایی مشاهده شده بر روی گسیختگی آن ۱ متر است. که ویژگی‌های یک گسله نارس را دارد و مشابه زمین‌لرزه بم در تاریخچه فعالیت لرزه‌خیزی این گسله زمین‌لرزه بزرگی چه در دوره دستگاهی و چه در دوره تاریخی مشاهده نشده‌است. منحنی جنبش میانگین محاسبه شده از نگاشت‌های ایستگاه‌های لرزه‌نگار، در نزدیکی خط میانگین بور و در برخی از بازه‌های زمانی در بالای آن و در برخی از بازه‌ها در پایین آن قرار گرفته‌است (شکل ۱) و از این دیدگاه نیز همانند گسله بم است. بنابراین گسله داهویه را نیز در دسته گسله‌های میانه از دیدگاه رسیدگی ساختاری قرار می‌دهیم.

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه ما نشان می‌دهد، بر پایه ویژگی‌های گسیختگی سطحی، الگوی تکرار فعالیت لرزه‌ای بر روی گسله‌ها و میزان جنبش حاصل از فعالیت آنها، در گستره خاور ایران گسله‌های با راستای شمالی جنوبی، گسله‌هایی رسیده و گسله‌های با روند خاوری باختری گسله‌هایی نارس‌تر هستند که به هنگام فعالیت خود جنبش شدیدتر و تخریب بیشتری را موجب می‌شوند، به گونه‌ای که در بخش شمال خاوری گستره خاور ایران، گسله‌های شمالی- جنوبی آیز و بزآباد از دیدگاه ساختاری، گسله‌هایی رسیده هستند و گسله دشت‌بیاض با روند خاوری- باختری گسله‌ای نارس می‌باشد. به نظر می‌رسد فعالیت لرزه‌خیزی از گسله رسیده آیز در حال کوچ به سوی گسله نارس دشت‌بیاض می‌باشد (شکل ۸). در جنوب باختری این گستره نیز کوچ فعالیت لرزه‌خیزی را می‌توان مشاهده کرد. گسله گوک با روند شمال- شمال باختر گسله‌ای رسیده است و گسله‌های بم و کوهبنان که راستای خاوری باختری دارند (در مورد گسله بم به نسبت)، از دیدگاه ساختاری گسله‌هایی میانه هستند (شکل ۸). در این بخش نیز به نظر می‌رسد، گسله گوک فعالیت لرزه‌خیزی خود را به گسله‌های بم و کوهبنان که از دیدگاه ساختاری، گسله‌هایی میانه هستند منتقل می‌کند (شکل ۸).

اگرچه زمین‌لرزه فندقا با $M_w = 6/6$ بزرگایی بیش از زمین‌لرزه بم با $M_w = 6/5$ داشته‌است و ژرفای کانونی زمین‌لرزه در هر دوی آنها یکسان و به میزان ۵ کیلومتر بوده‌است (بزرگا و ژرفا به عنوان فراسنجی‌هایی پراهمیت در میزان جنبش حاصل از زمین‌لرزه)، اما میانگین جنبش ثبت شده حاصل از فعالیت گسله نارس‌تر بم در ایستگاه‌های مختلف بیش از جنبش حاصل از فعالیت گسله رسیده فندقا بوده‌است (شکل ۹). از سوی دیگر چهار زمین‌لرزه فندقا با $M_w = 6/6$ ، گلباف با $M_w = 6/6$ ، جنوب گلباف با $M_w = 5/8$ و سیرچ با $M_w = 7/1$ بزرگ‌های گوناگون و ژرفاهای کانونی به ترتیب ۵، ۲۰، ۱۵ و ۱۸ کیلومتر، همگی بر روی گسله گوک روی داده‌اند. چنانچه در شکل ۱ مشاهده می‌شود، با وجود گوناگونی در بزرگا و ژرفای کانونی، هر چهار زمین‌لرزه درجه‌های به نسبت مشابهی از رسیدگی را نشان می‌دهند. این نکته‌ها، اهمیت رسیدگی ساختاری گسله‌ها را بر روی جنبش حاصل از زمین‌لرزه و لزوم دخالت دادن آن در برآورد خطر زمین‌لرزه را نشان می‌دهد.

سپاسگزاری

از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به سبب همکاری و مساعدت بی‌دریغ در این پژوهش و همچنین از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن به سبب در اختیار گذاشتن اطلاعات شتاب‌نگاشت سپاسگزاریم.

حکایت از آن دارد که مطالعات صورت گرفته بر روی شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه‌ها در راستای تعیین رسیدگی ساختاری گسله‌ها فراسنج قابل استنادتری است.

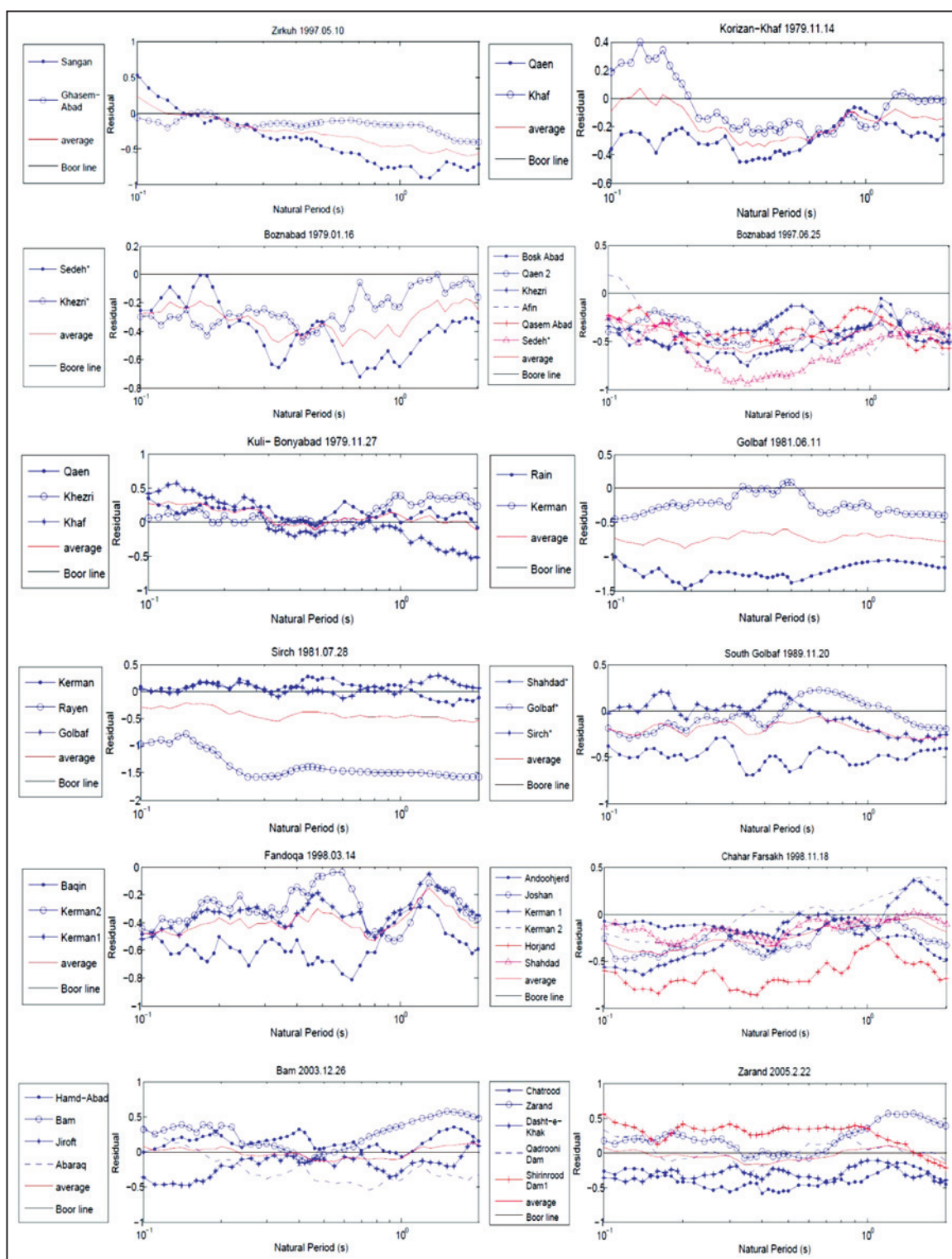
- گسله بم

در ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ زمین‌لرزه ویرانگر بم، یک سری از تکه‌های گسیختگی همزمان با زمین‌لرزه را در سطح زمین ایجاد کرد که کوتاه (هر تکه ۵۰-۱۰۰ متر)، همپوشان چپ‌گام، با بیشینه لغزش راست بر ۲۰ سانتی‌متر و بردار لغزش N10 درجه بودند و در پادگانه‌های آبرفتی جوان و بادزن‌های آبرفتی مسطح در جنوب شهر بم شکل گرفتند و در انتهای شمالی خود تا نزدیکی شهر بم ادامه می‌یابد. این گسیختگی در شمال شهر بم نیز بر روی ۴ تکه به تقریب موازی (sub-parallel) وجود دارد (شکل ۵-ب). گسیختگی‌های سطحی بزرگی در گستره‌ای که تکه گسله بم- بروات نامیده می‌شود دیده نشده‌است. اگرچه تعدادی درزه سطحی کوچک مقیاس در طول افزاز گسله بم- بروات در گستره جنوب رودخانه پشت‌رود گزارش شده‌است (شکل ۵-ب)، گسترش گسیختگی در زمین‌لرزه بم به سوی شمال و به زیر شهر بم بوده‌است. بیشینه درازای گسیختگی در این زمین‌لرزه ۲۴ کیلومتر و در ۳ تکه اصلی شامل ۱۳ کیلومتر در جنوب، ۶ کیلومتر در شمال و ۵ کیلومتر در تکه اتصال‌دهنده میانی است که در زیر شهر بم تکه‌های شمالی و جنوبی را به هم پیوند می‌دهد (Berberian, 2005). این سه تکه اصلی خود از تکه‌های فرعی چندگانه تشکیل شده‌اند (شکل ۶). با توجه به تکه‌های گسیختگی متعددی که در درازای کوتاه گسیختگی دیده می‌شود و جابه‌جایی ۱ متر که بر روی آن گزارش شده‌است، گسله ویژگی‌های یک گسله نارس را دارد. از سوی دیگر هیچ زمین‌لرزه بزرگ و ویرانگری چه در دوره تاریخی و چه در دوره دستگاهی بر روی گسله بم ثبت نشده‌است (Berberian, 2005; Talebian et al., 2004) و گسله در تکرار فعالیت لرزه‌خیزی خود، رفتار خوشه‌ای نداشته‌است و این از ویژگی‌های گسله‌های رسیده است. نتایج این دو روش بر روی گسله بم دوگانه هستند ولی منحنی جنبش میانگین ایستگاه‌های ثبت این زمین‌لرزه در نزدیکی خط منبای بور و در برخی از بازه‌های زمانی در بالای آن و در برخی از بازه‌ها در پایین آن قرار گرفته‌است (شکل ۱). بنابراین گسله بم، گسله‌ای است که از دیدگاه رسیدگی ساختاری، میانه است و به نظر می‌رسد، دلیل دوگانگی رفتار گسله به این دلیل باشد.

- گسله کوهبنان

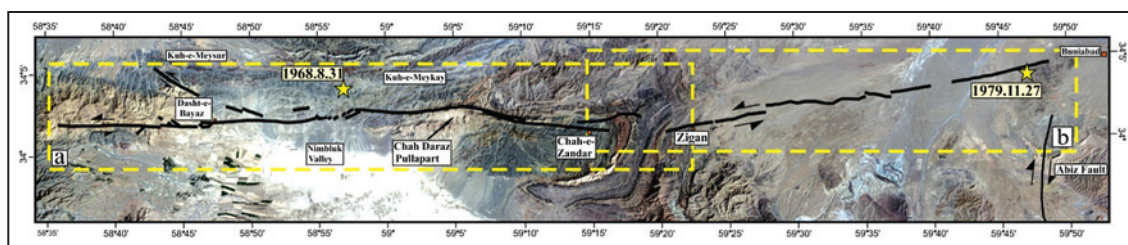
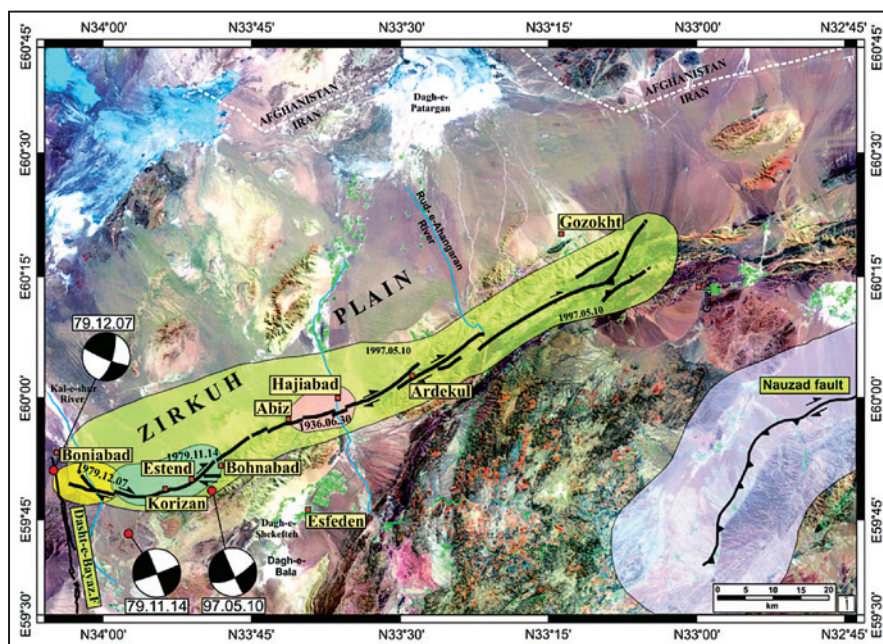
گسل احتمالی مسبب زمین‌لرزه زرنند در ۲۲ فوریه ۲۰۰۵، گسله کوهبنان است که برای نخستین بار در سال ۱۹۶۲ نقشه‌برداری شد (Huckride et al., 1962). این گسله در حاشیه جنوب‌خاوری خرده قاره ایران مرکزی در میان بلوک طبس و بلوک یزد واقع شده‌است و از شمال‌باختر کرمان شروع و با راستای NW-SE و شیب به سوی شمال خاور به صورت تکه‌های جدا از هم در حاشیه دشت زرنند و دشت طغرل‌جرد تا کوهبنان ادامه دارد و از کوهبنان در یک مسیر کوهستانی تا انتهای دشت بهاباد به طول ۳۰۰ کیلومتر امتداد یافته‌است. گسله فعال کوهبنان به صورت تکه‌های جدا از هم شکل گرفته‌است. در طول گسله کوهبنان ۴۰ تکه گسلی تشخیص داده شده‌است که به هنگام فعالیت لرزه‌ای مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند (رادفر و پور کرمانی، ۱۳۸۴). در زمان پلیو- کوآترنری حرکت در تکه‌های جنوب‌خاوری و میانی، راستالغز راست‌بر با مؤلفه معکوس و در قطعات شمال‌باختری راستالغز راست‌بر با مؤلفه عادی است. گسله کوهبنان سنگ‌های پرکامبرین پسین و پالیوزویک را از شمال خاور بر روی بادزن‌های آبرفتی و رسوبات کوآترنری در جنوب باختر رانده است.

زمین‌لرزه ۲۰۰۵ داهویه (زرنند) از دیدگاه ویژگی‌های گسیختگی سطحی و جنبش تولیدشده شباهت بسیار زیادی با زمین‌لرزه ۲۰۰۳ بم دارد. زمین‌لرزه

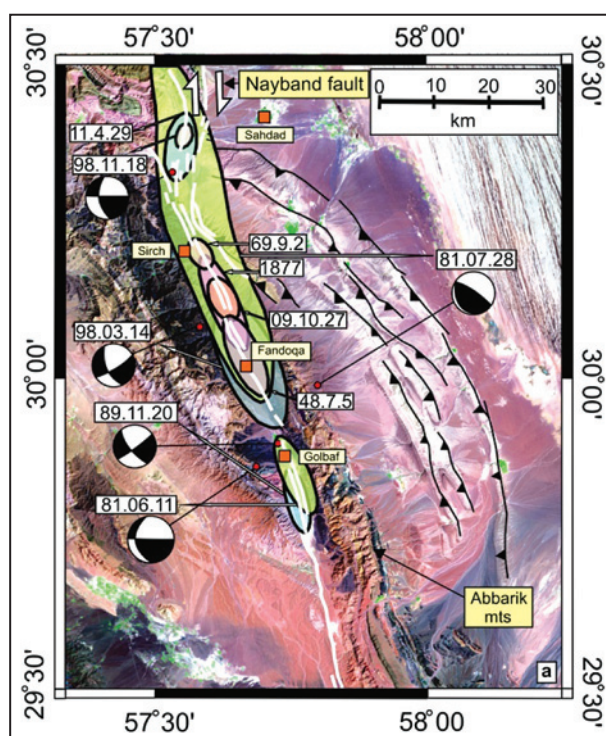


شکل ۱- دامنه طیف پاسخ زمین لرزه های گوناگون که برای ایستگاه های شتاب نگاری مربوطه میانگین شده و نسبت به معادله بور و همکاران سنجیده شده است. خط صفر (Boor line) مبنای مقایسه است. میانگین ایستگاه ها و هر یک از ایستگاه های ثبت کننده در راهنما آمده است.

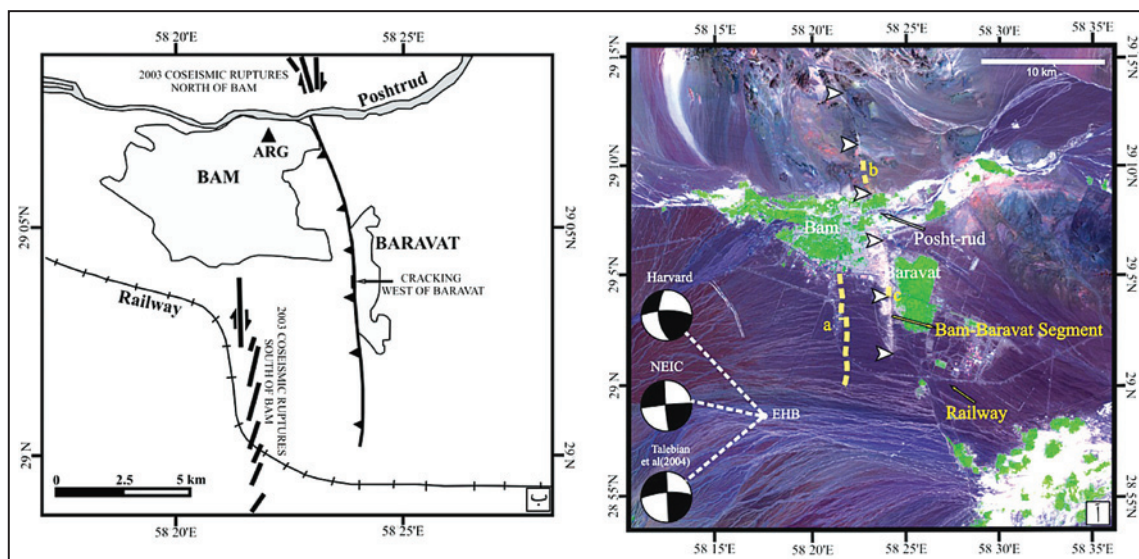
شکل ۲- تصویر Landsat ETM⁺ ناحیه زیرکوه. گسیختگی همزمان با زمین‌لرزه با خطوط سبتر نشان داده شده‌است. تلاش شده‌است، ناحیه‌های گسترش تخریب مربوط به زمین‌لرزه‌های بزرگ ناحیه با به کارگیری رنگ‌های مختلف بارز شود. سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌هایی که موجود بوده است نیز نمایش داده شده‌است (برگرفته با تغییر از (Berberian et al. (1999



شکل ۳- نمایش گسیختگی‌های همزمان با دو زمین‌لرزه روی داده بر روی گسله دشت بیاض، بر روی تصویر ماهواره‌ای ASTER از منطقه. (a) گسیختگی همزمان با زمین‌لرزه ۱۹۶۸ دشت بیاض. این گسیختگی از انتهای باختر گسله تا روستای زیگان در خاور ادامه دارد. روکانون زمین‌لرزه با ستاره مشخص شده‌است. (b) گسیختگی همزمان با زمین‌لرزه سال ۱۹۹۷ که کولی- بنیاد نام گرفته‌است. این گسیختگی از انتهای خاوری گسله تا روستای چاه زندار در باختر ادامه یافته‌است. روکانون زمین‌لرزه با ستاره مشخص شده‌است.



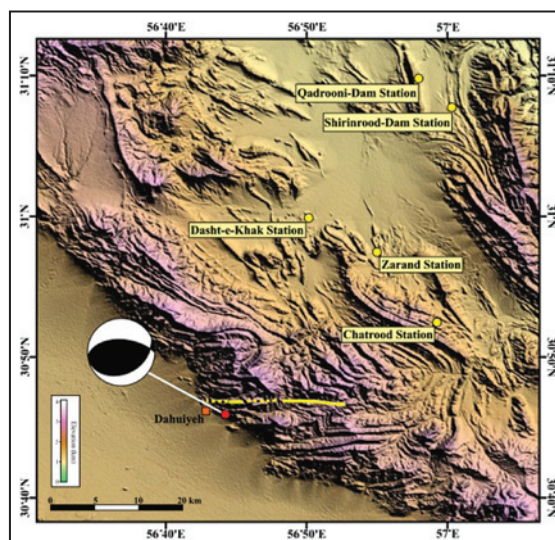
شکل ۴- تصویر ماهواره‌ای Landsat ETM⁺ ناحیه گوک. گسیختگی همزمان با زمین‌لرزه با خطوط سبتر نشان داده شده‌است. تلاش شده‌است ناحیه‌های گسترش تخریب مربوط به زمین‌لرزه‌های بزرگ ناحیه با به کارگیری رنگ‌های مختلف بارز شود. سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌هایی که موجود بوده است نیز نمایش داده شده‌است (Walker & Jackson, 2002).



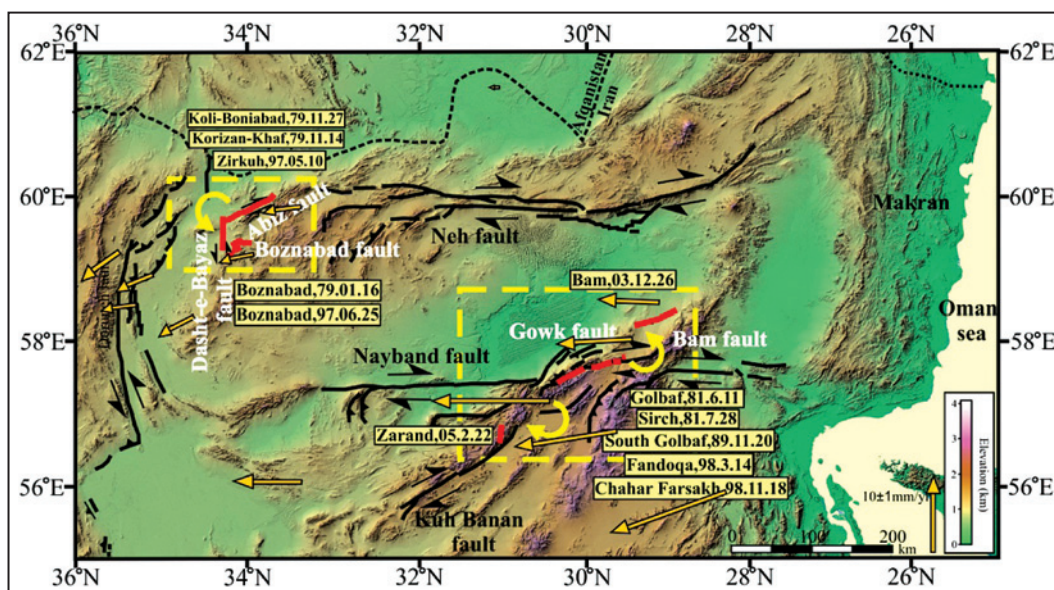
شکل ۵- تصویر Landsat ETM⁺ از ناحیه زمین لرزه ای ۲۰۰۳ بم. گسیختگی همزمان با زمین لرزه با خط چین زرد رنگ و حروف لاتین مشخص شده است. محل روکانون زمین لرزه و سازوکار کانونی آن نیز نمایش داده شده است. گسله رانندگی شناخته شده بم با پیکان های سفید رنگ مشخص شده است (بر گرفته با تغییر از (Talebian et al., 2004). (ب) تصویر نمادین از ناحیه زمین لرزه ای بم، محل گسیختگی زمین لرزه بم و موقعیت آن نسبت به شهر بم و بروات نشان داده شده است (بر گرفته با تغییر از (Berberian (2005).



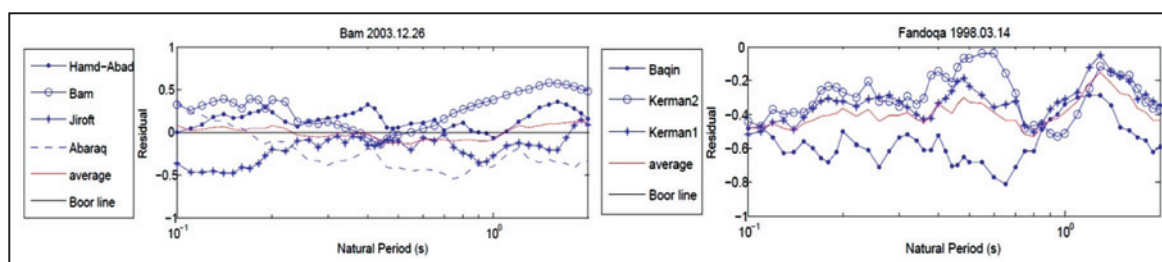
شکل ۶- عکس های میدانی از گسیختگی همزمان با زمین لرزه ۲۰۰۳ بم در ناحیه جنوب شهر بم (عکس ها در سال ۲۰۱۱ تهیه شده است)، آ و ب) نمایی از تکه بندی فرعی آشکار با الگوی همپوشان بر روی تکه های اصلی گسیختگی، در هر دو تصویر نگاه به سوی شمال است.



شکل ۷- گسیختگی همزمان با زمین لرزه ۲۰۰۵ داهویه به وسیله خط زرد رنگ بر روی تصویر توپوگرافی SRTM ۹۰ متر آشکار شده است. سازوکار کانونی زمین لرزه نیز بر روی تصویر نمایش داده شده است (Talebian et al., 2006). محل و نام ایستگاه های شتاب نگاری که زمین لرزه های فوق را ثبت کرده اند و نگاشت آنها در این پژوهش به کار گرفته شده است با دایره های زرد رنگ مشخص شده اند (BHRC).



شکل ۸- نمایش پهنه‌های گسلی بزرگ خاور ایران بر روی تصویر (SRTM). نام و زمان رویداد زمین‌لرزه‌های بزرگ رخ داده روی گسله‌ها و گسیختگی‌های همزمان با آن (خط‌های قرمز رنگ) بر روی تصویر نمایش داده شده‌است. بردارهای سرعت ایستگاه‌ها نسبت به اوراسیا از (2007) Tavakolil گرفته شده‌است.



شکل ۹- اهمیت مطالعه رسیدگی ساختاری در برآورد خطر زمین‌لرزه، مقایسه جنبش حاصل از زمین‌لرزه‌های فندقا با بزرگای $M_w=6.6$ و زمین‌لرزه بم با بزرگای $M_w=6.5$ ، با ژرفای کانونی یکسان.

جدول ۱- مجموعه اطلاعات جمع‌آوری شده مربوط به گسله‌های بررسی شده در خاور ایران که نام زمین‌لرزه، گسله مسبب آن، زمان رویداد، برخی فراسنج‌های منشایی و ویژگی‌های گسیختگی سطحی را در بر می‌گیرد. سازوکار گسله‌ها با حروف اختصاری T (راندگی)، R (راست‌الغز-راست‌بر) و L (راست‌الغز-چپ‌بر) نشان داده شده‌است.

نام گسل مسبب	نام زمین‌لرزه	تاریخ رویداد (میلادی)	M_w	ژرفا (km)	سازوکار	گسیختگی (km)	درازای جابه‌جایی (m)	تعداد تکه‌ها	نرخ لغزش (mm/yr)
دشت بیاض	دشت بیاض	۱۹۶۸/۰۸/۳۱	۷/۱	۱۵	L-T	۷۰	۴/۵-۲/۵	۱۵	
بزآباد یا پرک	بزآباد	۱۹۷۹/۰۱/۱۶	۶/۵	۱۱	T-R				
آبیز	کریزان-خواف	۱۹۷۹/۱۱/۱۴	۶/۶		R-T	۲۰	۱-۱	۱-۳	۴
دشت بیاض	کولی-بنیاباد	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	۷/۱	۸	L-T	۶۰	۴-۲/۵	۱۰	۱/۵
گوک	گل‌باف	۱۹۸۱/۰۶/۱۱	۶/۶	۲۰	T-R	۱۵	۰/۳-۰/۵	۱	۲
گوک	سیرچ	۱۹۸۱/۰۷/۲۸	۷/۱	۱۸	R	۶۵	۰/۵	۲-۳	۲
گوک	جنوب گل‌باف	۱۹۸۹/۱۱/۲۰	۵/۸	۱۵	T-R	۱۹	۰/۱-۰/۰۴	۲	۲
آبیز	زیرکوه	۱۹۹۷/۰۵/۱۰	۷/۲	۱۰	R-T	۱۲۵	۰/۹-۲/۳	۱۰	۴
بزآباد یا پرک	بزآباد	۱۹۹۷/۰۶/۲۵	۵/۷	۸	R				
گوک	فندقا	۱۹۹۸/۳/۱۴	۶/۶	۵	R-T	۲۳	۳-۱	۱	۲
گوک	چهارفرسخ	۱۹۹۸/۱۱/۱۸							۲
بم	بم	۲۰۰۳/۱۲/۲۶	۶/۵	۵	S	۲۱	۱	۷	۲
کوهینان	داهویه (زرنده)	۲۰۰۵/۲/۲۲	۶/۴	۷	T	۷-۱۳	۱/۰۵	۲	

جدول ۲- خلاصه‌ای از زمان رویداد و بزرگای زمین‌لرزه‌های رخ داده بر روی گسله آبیژ (Berberian et al., 2001).

نام زمین‌لرزه	تاریخ رویداد	بزرگا
	۱۹۳۶/۰۶/۳۰	۵/۶
کریزان-خواف	۱۹۷۹/۱۱/۱۴	۶/۶
	۱۹۷۹/۱۲/۰۷	۵/۹
زیرکوه	۱۹۹۷/۰۵/۱۰	۷/۲

جدول ۳- خلاصه‌ای از زمان رویداد و بزرگای زمین‌لرزه‌های رخ داده بر روی گسله گوک (Berberian et al., 2001).

نام زمین‌لرزه	تاریخ رویداد	بزرگا
	۱۸۷۷	۵/۶
	۱۹۰۹/۱۰/۲۷	۵/۵
	۱۹۱۱/۴/۲۹	۵/۶
	۱۹۴۸/۷/۵	۶
	۱۹۶۹/۹/۲	۵/۲
گلباف	۱۹۸۱/۶/۱۱	۶/۶
سیرچ	۱۹۸۱/۷/۲۸	۷/۰
جنوب گلباف	۱۹۸۹/۱۱/۲۰	۵/۸
فندقا	۱۹۹۸/۳/۱۴	۶/۶
چهارفرسخ	۱۹۹۸/۱۱/۱۸	۵/۴

کتابنگاری

رده، آ.، ۱۳۷۰- تاریخ زمین‌لرزه‌های ایران. نوشته امبرسیز، ن.، ملویل، ج. پ. ترجمه رده، ا. (۱۳۷۰). انتشارات آگاه.
رادفر، ش. و پورکرمانی، م.، ۱۳۸۴- ریخت‌زمین‌ساخت گسل کوه‌بان، فصلنامه علوم زمین، سال پانزدهم، شماره ۵۸، صفحه ۱۶۶-۱۹۵.

References

- Ambraseys, N. N., 2001- Reassessment of earthquakes, 1900-1999, in the Eastern Mediterranean and the Middle East. *Geophys. J. Int.* 145, 471-485.
- Ambraseys, N. N. & Tchalenko, J. S., 1968- Dashti Biaz, Iran, Earthquake of August 1968, *Nature*, 220, 903-904; doi:10.1038/220903a0.
- Berberian, M., 1979- Evaluation of the instrumental and relocated epicenters of Iranian earthquakes, *Geophys. J.R. astr. Soc.* 58, 625-630.
- Berberian, M. & Qorashi, M., 1994- Coseismic fault- related folding during South Golbaf earthquake of November 20, 1989, in southeast Iran, *Geology*, 22, 531-534.
- Berberian, M. & Yeats, R. S., 1999- Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau, *Bulletin of the Seismological Society of America* 89, 120- 139.
- Berberian, M., 2005- The 2003 Bam Urban Earthquake: A Predictable Seismotectonic Pattern Along the Western Margin of the Rigid Lut Block, Southeast Iran. *Earthquake Spectra*. 21, 35-99.
- Berberian, M., Jackson, J., Ghorashi, M. & Kadjar, M. H., 1984- Field and teleseismic observations of the 1981 Golbaf- sirch earthquakes in SE Iran, *Geophys. J.R. astr. Soc.* 77, 809- 838.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Fielding, E., Parsons, B.E., Priestley, K., Qorashi, M., Talebian, M., Walker, R., Wright, T.J & Baker, C., 2001- The 1998 March 14 Fandoqa earthquake (Mw 6.6) in Kerman province, southeast Iran: re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrusts and the active tectonics of the Gowk fault zone, *Geophys. J. Int.* 146, 371- 398.
- Berberian, M., Jackson, J.A., Qorashi, M., Khatib, M. M., Priestley, K., Talebian, M. & Ghafuri-Ashtiani, M., 1999- The 1997 May 1 Zirkuh (Qa' enat) earthquake (Mw 7.2): faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran, *Geophys. J. Int.* 136, 671- 694.
- Boore, D. M., Joyner, W. B. & Fumal, T. E., 1997- Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: a summary of recent work, *Seismological Research Letters*. 68, 1, 128-153.
- Engdahl, E. R., Van der Hilst, R. & Buland, R., 1998- Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 722-743.
- Huckride, R., Kursten, M. & Venzlaff, H., 1962- Zur Geologie des Gebietes Zeischen Kerman un Sugand (Iran), *Hannover Bundesanstalt Fur, Boden Forschung* 197 pp.
- Jackson, J., 2006- Fatal attraction: living with earthquakes, the growth of villages into megacities, and earthquake vulnerability in the modern world, *phil. Trans. R. Soc.* 364, 1911- 1925.

- Jackson, J., Bouchon, M., Fielding, E., Funning, G., Ghorashi, M., Hatzfeld, D., Nazari, H., Parsons, B., Priestley, K., Talebian, M., Tatar, M., Walker, R. & Wright, T., 2006- Seismotectonic, rupture process, and earthquake-hazard aspects of the 2003 December 26 Bam, Iran, earthquake, *Geophys. J. Int.* 166, 1270- 1292.
- Liu-Zeng, J., Heaton, T., DiCaprio, Ch., 2005- The effect of slip variability on earthquake slip-length scaling, *Geophys. J. Int.* 162, 841-849.
- Manighetti, I., Campill, M., Bouley, S. & Cotton, F., 2007- Earthquake scaling, fault segmentation, and structural maturity, *Earth and planetary science letters* 253, 429- 438.
- Masson, F., Chery, J., Hatzfeld, D., Martinod, J., Vernant, P., Tavakoli, F. & Ghafory-Ashtiani, M., 2005- Seismic versus aseismic deformation in Iran inferred from earthquakes and geodetic data, *Geophys.J.Int.* 160, 217- 226.
- Radiguet, M., Cotton, F., Manighetti, M., Campillo, M. & Douglas, J., 2009- Dependency of Near-Field Ground Motions on the Structural Maturity of the Ruptured Faults, *Bulletin of Seismological Society of America*. 99, No. 4, doi: 10.1785/0120080340.
- Sarkar, I., SriRam, V., Hamzehloo, H. & Khattri, K. N., 2005- Subevent analysis for the Tabas earthquake of September 16, 1978, using near field accelerograms, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 151, Issue 1-2, 53-76.
- Talebian, M., Biggs, J., Bolourchi, M., Copley, A., Ghassemi, A., Ghorashi, M., Hollingsworth, J., Jackson, J., Nissen, E., Oveisi, B., Parsons, B., Priestly, K. & Saiidi, A., 2006- The Dahuiyeh (Zarand) earthquake of 2005 February 22 in central Iran: reactivation of an intra-mountain reverse fault, *Geophys. J. Int.* 164, 137-148.
- Talebian, M., Nazari, H., Jackson, J., Ghorashi, M. & Fielding, E., 2004- Coseismic surface features associated with the Bam earthquake of 26 dec 2003 in eastern Iran, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 6, 07842.
- Tavakoli, F., 2007- Present-day deformation and kinematics of the active faults observed by GPS in the Zagros and east of Iran , *Grenoble university* , Ph.d. Thesis.
- Tchalenko, J.S. & Berberian, M., 1975- Dasht-e Bayaz Fault, Iran: Earthquake and Earlier Related Structure in Bed Rock, *Geological Society of America Bulletin*, 86, 703-709.
- Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. & Chery, 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.
- Walker, R. & Jackson, J., 2002- Offset and evolution of the Gowk fault, S.E. Iran: a major intra-continental strike-slip system, *journal of structural geology*. 24. 1677-1698.
- Walker, R. & Jackson, J., 2004- Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran, *Tectonics*, Vol. 23, TC5010, doi:10.1029/2003TC001529.
- Walker, R., Jackson, J. & Baker, C., 2004- Active faulting and seismicity of the Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran, *Geophys. J. Int.* 157, 265- 282.
- Walker, R., Talebian, M., Sloan, R., Rasheedi, A., Fattahi, M. & Bryant, C., 2010- Holocene slip-rate on the Gowk strike-slip fault and implications for the distribution of tectonic strain in eastern Iran, *Geophysical Journal International*, doi: 10.1111/j.1365- 246X.2010.04538.

Structural Maturity of Active Faults and Evolutionary Pattern of Seismic Activity in Eastern Iran

N. Saboor ^{1*}, M.R. Ghassemi ², M. Eskandari ³, A. Nazari. F. ⁴, M. Ghorashi ⁵ & F. Seenaiian ⁶

¹ M.Sc., Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

² Associate Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

³ Ph.D., Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

⁴ M.Sc., School of Earth Sciences, Damghan University of Basic Sciences, Damghan, Iran

⁵ Associate Professor, Islamic Azad University, North Tehran Branch; Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

⁶ Ph.D., Building and Housing Research Center, Tehran, Iran

Received: 2013 April 23

Accepted: 2013 December 15

Abstract

Depending on their structural maturity, seismogenic faults, may rupture in one segment or as multiple segments; they also may show different slips on their segments. Mature faults break in long ruptures with small slip, while immature faults rupture as short segments but are more energetic. On the other hand, the mature faults demonstrate clustering pattern in their earthquake recurrence pattern. Also, the ground motions produced by earthquakes on immature faults are larger than those generated by earthquakes on mature faults. In this paper, we defined maturity of major faults in Eastern Iran seismotectonic Province, considering their segmentation, rupture length, displacement vector on the rupture and the history of clustered earthquake sequence on the fault. Then, the response spectrum of ground motions caused by large earthquakes occurred on these faults were calculated. To reduce the effect of unknown wave paths, we used ground motions recorded in the near field. Earthquakes of different mechanisms were selected in magnitude range from $M_w=5.7$ to 7.1 . We compared the obtained response spectrum with those resulted from the experimental model presented by Boore et al. (1997). Study of this parameter can help to recognized ground motion potential of the faults, and considering it in extracting attenuation equations increases the accuracy of the results for seismic hazard assessment. Using our evaluation for structural maturity of the faults, we try to present a model for evolution of seismic activity in Eastern Iran.

Keywords: Structural Maturity, Mature and Immature Fault, Near-field ground motion, Eastern Iran, Evolution Model of Seismic activity, Seismotectonic.

For Persian Version see pages 57 to 66

*Corresponding author: N. Saboor; E-mail: saboor.nayereh@gmail.com