

برآورد نرخ لغزش گسل‌های پیرامون بم و کاربرد آن در ارزیابی خطر زمین لرزه

مرتضی طالبیان^{۱*}، سعید هاشمی طباطبایی^۲، مرتضی قنچی^۳، منوچهر قرشی^۴، علی بیت‌اللهی^۵، عباسی قلندرزاده^۶ و محمدعلی ریاحی^۲

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

^۲ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، وزارت مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

^۳ موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۴ پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۸/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۳/۱۹

چکیده

فلات ایران با قرارگیری بین دو صفحه عربی و اروپا-آسیا، سالانه حدود ۲۲ میلی متر کوتاه‌شدگی در راستای شمال-جنوب دارد. حدود ۹ میلی متر از این کوتاه‌شدگی سبب چین‌خوردگی و گسل خوردگی در زاگرس می‌شود و باقی‌مانده آن به‌طور عمده در البرز و کپه داغ جای می‌گیرد. بلوک مرکزی ایران تغییر شکل اندکی دارد بنابراین، متناسب با میزان کوتاه‌شدگی در البرز و کپه داغ، با سرعت حدود ۱۴ میلی متر در سال به سوی شمال حرکت می‌نماید. در خاور ایران، بلوک صلب و پایدار افغانستان قرار دارد که حرکت چندانی نسبت به اوراسیا ندارد بنابراین حرکت به سوی شمال ایران مرکزی نسبت به بلوک افغانستان تنش برشی راستگردی را در خاور ایران ایجاد می‌نماید که به ترتیب حدود ۸ و ۵ میلی متر در سال آن در راستای گسل‌های خاور و باختر دشت لوت جای می‌گیرند. یکی از مشکلات برآورد خطر زمین لرزه در خاور ایران کمبود داده‌های زمین لرزه‌ای، ژئودیتیک و ناشناخته بودن نرخ لغزش گسل‌ها است. از این رو در این پژوهش سعی شده است تا به کمک داده‌های موجود زمین‌شناسی و من‌یابی مطلق شیوه توزیع حرکت راستالغز بر روی گسل‌های این ناحیه تا حدودی برآورد شود. در ادامه با توجه به اهمیت گسل بم-برآوات و گسل زمین لرزه‌ای جنوب بم در برآورد خطر زمین لرزه در شهر بم این گسل به‌طور خاص مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه‌گیری از آبرفت‌های برخاسته در اثر جنبش گسل بم-برآوات در انتهای جنوبی این گسل، و تعیین من مطلق آنها به روش لومینسانس نوری، نرخ برخاستگی حدود ۰/۵ میلی متر در سال را برای این گسل مشخص می‌نماید. از آن جا که جنبش این گسل از نظر هندسی با گسل جنوب بم در ارتباط است، بنابراین به کمک این من‌یابی نرخ لغزش راستالغز راستگرد گسل جنوب بم نیز حدود ۲ میلی متر در سال برآورد می‌شود.

کلیدواژه‌ها: بم، زمین لرزه، ایران، نرخ لغزش، گسل

*نویسنده مسئول: مرتضی طالبیان

۱- مقدمه

زمین لرزه ۵ دی ماه ۱۳۸۲ (۲۴ دسامبر ۲۰۰۳) بم یکی از ویرانگرترین زمین لرزه‌های تاریخ کشورمان است. این زمین لرزه، جان بیش از ۳۲ هزار نفر را گرفت و افزون بر شهر بم کهن‌ترین سازه‌ی بزرگ خشت و گلی جهان، ارگ بم، نیز ویران شد. زمین لرزه بم به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعات لرزه‌نگاری و زمین‌شناسی قرار گرفت (e.g. Fielding et al., 2004; Talebian et al., 2004; Wang et al., 2004; Fialko et al., 2005; Nakamura et al., 2005; Funning et al., 2005; Tatar et al., 2005; Binet et al., 2005; Jackson et al., 2006). این زمین لرزه، نخستین زمین لرزه ویرانگر در سطح جهان بود که داده‌های با کیفیت بالا از ماهواره رادار (Envisat ASAR) مربوط به پیش و پس از زمین لرزه در اختیار بود و به کمک آن گسل زمین لرزه‌ای بم در مکانی دور از انتظار در باختر گسل شناخته شده بم-برآوات شناسایی شد. گسل‌های پیرامون بم در ادامه جنوبی سامانه گسل‌های باختر لوت قرار دارند که جنبش آنها در چند دهه اخیر زمین لرزه‌های به نسبت بزرگی را بویژه در منطقه گلباف و زرنند موجب شده است. اما هیچ گونه داده دستگامی از جنبش گسل‌های پیرامون بم پیش از رویداد اخیر در دست نیست و تراکم کم جمعیت در حاشیه کویر لوت موجب شده است که متأسفانه هیچ گونه داده تاریخی از جنبش‌های گذشته آن نیز در اختیار نباشد. از آنجا که برآورد خطر زمین لرزه بدون داشتن داده کافی بی‌اعتبار و غیر کاربردی است، در این بررسی سعی شده است تا به کمک روش‌های من‌یابی مطلق میانگین نرخ لغزش گسل بم-برآوات در درازنای تاریخ زمین‌شناسی به دست آید. این داده‌ها به ما این امکان را می‌دهد که توان لرزه‌زایی این گسل و میزان خطر احتمالی زمین لرزه در شهر بم را برآورد نماییم. بدیهی است مطالعات تکمیلی مانند بررسی‌های پارینه لرزه‌شناسی و ایجاد شبکه‌های ژئودیتیک محلی می‌تواند در آینده اطلاعات کامل‌تری را در این زمینه فراهم نمایند.

۲- زمین‌ساخت و لرزه‌خیزی

به‌طور کلی راستای گسل‌های خاور ایران شمال-جنوبی و ساز و کار آنها راستالغز راستگرد است. این سازوکار ناشی از حرکت به سوی شمال ایران مرکزی نسبت به بلوک صلب و پایدار افغانستان است که موجب ایجاد تنش برشی در خاور ایران می‌شود. در بخش مرکزی خاور ایران بلوک به‌نسبت هموار و غیر لرزه‌زای لوت قرار دارد. این بلوک در خاور و باختر به‌وسیله گسل‌های بزرگ و لرزه‌زا احاطه شده است. در دهه‌های اخیر گسل‌های باختر کویر لوت و بویژه گسل گوک فعالیت چشمگیری را از خود نشان داده‌اند. جنبش این گسل حداقل ۵ زمین لرزه بزرگ را در دو دهه گذشته موجب شده است (Berberian et al., 2001). گسل زمین لرزه‌ای بم که موجب رویداد زمین لرزه ویرانگر بم و جان باختن بیش از ۳۲ هزار نفر از هموطنانمان شد، در ادامه جنوبی همین سامانه گسل‌ها قرار دارد، در ادامه شمالی این سامانه حرکت راستالغز گسل گوک به چندین شاخه گسل انتقال می‌یابد که از مهم‌ترین آنها گسل‌های نایبند و کوهستان را می‌توان نام برد. با توجه به راستای گسل نایبند و پست بودن توپوگرافی در دو سوی آن، به نظر می‌رسد که ساز و کار این گسل به‌طور عمده راستالغز باشد در حالی که گسل کوهستان، با روند شمال باختری-جنوب خاوری ساز و کاری مایل داشته و موجب راندگی بلوک شمالی بر روی دشت جنوبی شده است (Talebian et al., 2006). راندگی شهادت در خاور گسل گوک جنبش لرزه‌زای قابل توجهی را در دهه‌های اخیر نشان نمی‌دهد و به‌نظر می‌رسد که بیشترین جنبش آن به صورت خزش باشد (Berberian et al., 1994). در سوی باختر این سامانه گسل‌های جرجافک و رفسنجان قرار دارند که آنها نیز فعالیت لرزه‌ای چندانی را در دهه‌های اخیر نشان نمی‌دهند اما باز دیده‌های صحرائی حاکی از جوان و جنب‌ب‌بودن آنها است.

را می‌توان با ترکیبی از اندازه‌گیری میزان حرکت نسبی آفریقا-اوراسیا و بردارهای لغزش زمین لرزه‌ها و همچنین اندازه‌گیری‌های اخیر بازشدگی دریای سرخ به دست آورد. بر این اساس، نرخ کوتاه‌شدگی در راستای تقریبی شمال-جنوب در ایران را می‌توان حدود ۳۰ میلی‌متر در سال در ۵۰ درجه خاوری و حدود ۴۰ میلی‌متر در سال در عرض ۶۰ درجه خاوری تعیین نمود (Jackson, 1992; DeMeta et al., 1994; Jistine et al., 1994; Chu & Gordon, 1998). از سوی دیگر بررسی داده‌های ژئودتیک اخیر مقداری کمتر و فقط حدود ۲۶ میلی‌متر در سال در ۶۰ درجه خاوری و ۲۲ میلی‌متر در سال در ۵۰ درجه خاوری را نشان می‌دهد (Sella et al., 2002; MC Chusky et al., 2003; Vernant et al., 2004; Masson et al., 2005). این تفاوت در سرعت حرکت اندازه‌گیری شده به وسیله برداشت‌های ژئودتیک و مدل‌های زمین‌ساختی افزون بر خطا در اندازه‌گیری‌ها می‌تواند بخشی به‌خاطر تفاوت در پنجره‌های زمانی این دو روش و یا تغییر در سرعت همگرایی صفحه عربی و اوراسیا در چند میلیون سال اخیر باشد. با توجه به این که در برآورد خطر زمین لرزه نرخ فعلی لغزش گسل‌ها مورد نظر است. بنابراین در این بررسی مبنای محاسبات بر اساس اندازه‌گیری‌های ژئودتیک قرار داده شده است.

۳-۲. نرخ حرکت به سوی شمال ایران مرکزی

کوتاه‌شدگی در ایران به‌طور کلی در سه زون اصلی البرز-کپه داغ، ایران مرکزی و زاگرس روی می‌دهد. با توجه به عرض جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، جابه‌جایی راستالغز در این بخش از خاور ایران ناشی از حرکت نسبی به سوی شمال ایران مرکزی نسبت به بلوک افغانستان است بنابراین با برآورد این حرکت می‌توان به میزان کلی حرکت راستالغز در خاور ایران دست یافت. یک راه برآورد این میزان حرکت استفاده از مدل‌های صفحه‌های زمین‌ساختی و داده‌های ژئودتیک موجود است اما از آن جا که این داده‌ها نرخ کوتاه‌شدگی در کل ایران را نشان می‌دهند، لذا نخست باید میزان کوتاه‌شدگی در زاگرس برآورد شود تا باقیمانده آن که مربوط به کوتاه‌شدگی در البرز-کپه داغ و ایران مرکزی است، به دست آید.

Jackson et al. (1995) و Jackson & McKenzie (1984, 1988) در زاگرس را حدود ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر در سال پیشنهاد می‌نمایند. این میزان کوتاه‌شدگی وابسته به فرضیاتی است که برای آن در نظر گرفته‌اند اما به‌طور تقریبی با حدود ۵۰ کیلومتر کوتاه‌شدگی در زاگرس و با فرض این که بیشترین تغییر شکل زاگرس در ۵ میلیون سال اخیر روی داده باشد، همخوانی دارد. از سوی دیگر داده‌های شبکه ژئودتیک کشوری مقداری کمتر و حدود ۷ تا ۱۱ میلی‌متر کوتاه‌شدگی در زاگرس مرکزی و خاوری را نشان می‌دهند (Tatar et al., 2002; Vernant et al., 2004). بنابراین با فرض این که کمینه مقدار کلی کوتاه‌شدگی ایران حدود ۲۲ میلی‌متر در سال باشد، میانگین باقیمانده کوتاه‌شدگی یعنی حدود ۱۳ میلی‌متر در سال مربوط به کوتاه‌شدگی در ایران مرکزی و البرز-کپه داغ است. داده‌های ژئودتیک همچنین مقدار ناچیز کوتاه‌شدگی در زون دگرگونه سنندج-سیرجان و آتشفشانی ارومیه-دختر و همچنین بخش داخلی ایران مرکزی نشان می‌دهند و به‌نظر می‌رسد که تقریباً تمامی دگرشکلی در زون البرز-کپه داغ و لبه شمالی ایران مرکزی متمرکز شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بخش مرکزی ایران مرکزی با سرعت حدود ۱۳ میلی‌متر در سال نسبت به اوراسیا (و در نتیجه نسبت به بلوک افغانستان) به سوی شمال حرکت می‌نماید و این حرکت به همان میزان جابه‌جایی راستالغز در خاور ایران ایجاد می‌نماید. نرخ همگرایی صفحه عربی به اوراسیا به سوی خاور افزایش می‌یابد (به‌عنوان مثال ۲۶ میلی‌متر در سال در ۶۰ درجه خاوری) بنابراین برآورد بالا کمینه میزان نرخ لغزش در خاور ایران است. متأسفانه به‌علت کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری ژئودتیک در پیرامون و بویژه داخل بلوک لوت، شیوه توزیع جابه‌جایی بر روی

گسل گوک به سوی جنوب به گسل سروستان متصل شده و سپس به وسیله راندگی در دامنه شمالی جبال بارز خاتمه می‌یابد. در جنوب باختری منطقه فعالیت لرزه‌ای پراکنده‌ای پیرامون گسل سروستان دیده می‌شود که به نظر در ارتباط با جنبش این گسل باشد. گسل میناب در باختر این گسل یک مرز زمین‌شناسی مهم و جداکننده زون ساختاری زاگرس از مکران است. صرف نظر از رومرکز تعدادی از زمین لرزه‌ها که بر رو و یا نزدیکی این گسل واقع می‌شوند، بیشتر زمین لرزه‌های پیرامون آن دارای ژرفای کانونی به نسبت بیشتر (تا حدود ۳۰ کیلومتر بوده) و به احتمال در ارتباط با راندگی‌های بخش خاوری زاگرس و فرورانش محلی پوسته قاره‌ای زاگرس به زیر ایران مرکزی است (Talebian and Jackson, 2004). در خاور کویر لوت گسل‌های نه، کهورک و نصرت‌آباد فعالیت لرزه‌ای به نسبت کمتری را در سده اخیر نشان می‌دهند. گسل زاهدان به وسیله راندگی سفیدابه در شمال خاتمه می‌یابد که جنبش آن در سال ۱۳۷۴ موجب رویداد ۵ زمین لرزه با بزرگی‌های ۵/۵ تا ۶/۲ شد (Berberian et al., 2000; Parsons et al., 2006).

۳-۳. نرخ لغزش گسل‌ها در خاور ایران

به‌طور معمول برای تعیین پارامترهای مورد نیاز برآورد خطر زمین لرزه (ضرایب گوتنبرگ-ریشر) از داده‌های دستگاهی و تاریخی زمین لرزه‌ها به همراه داده‌های زمین‌شناسی استفاده می‌شود. اما در منطقه‌ای مانند بم با داده‌های دستگاهی و تاریخی بسیار اندک (Ambraseys and Melville, 1982; Berberian, 1994) تعیین نرخ لغزش گسل‌ها نیاز به استفاده از دامنه وسیع‌تری از داده‌ها دارد. از نظر ساختاری جابه‌جایی در راستای گسل‌های راستالغز خاور ایران در ارتباط مستقیم با تغییر شکل و میزان کوتاه‌شدگی در ایران است. به این مفهوم که به سبب صلب و پایدار بودن بلوک افغانستان حرکت به سوی شمال ایران مرکزی ایجاد تنش برشی در خاور ایران می‌نماید که این تنش موجب حرکت راستالغز راستگرد گسل‌ها در خاور ایران می‌شود. از این رو در این بررسی نخست به چگونگی نرخ کوتاه‌شدگی در ایران و حرکت به سوی شمال ایران مرکزی می‌پردازیم و سپس به کمک آن نرخ کلی جابه‌جایی راستالغز در خاور ایران را برآورد می‌نماییم. در ادامه به کمک داده‌های زمین‌شناسی، ژئودتیک و سن‌یابی توزیع جابه‌جایی را بر روی گسل‌های خاور ایران مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۳-۳-۱. نرخ کوتاه‌شدگی کلی در ایران

همگرایی صفحه عربی و صفحه اوراسیا موجب تغییر شکل فلات ایران می‌شود. این تغییر شکل در خاور به وسیله بلوک صلب و پایدار افغانستان محدود می‌شود و از آنجایی که مرز زمین‌شناسی این تغییرات کم و بیش با مرز جغرافیایی ایران و افغانستان همخوانی دارد، کم و بیش تمامی تغییر شکل ناشی از آن در داخل مرزهای کشورمان روی می‌دهد. اگر چه راستای کلی کوتاه‌شدگی کم و بیش مشخص و در راستای شمال-شمال خاوری است اما در میزان کوتاه‌شدگی و راستای دقیق‌تر آن اختلاف نظر وجود دارد. این اختلاف نظر بخشی به‌خاطر چگونگی تفسیر باز شدن دریای سرخ و خلیج عدن است (Demets et al., 1994; Jestin et al., 1994; Chu and Gordon, 1998). دیگر آن به‌خاطر کمبود داده‌های ژئودتیک و نرخ کوتاه‌شدگی کمتری که این داده‌ها نشان می‌دهند، است (Mc Clusky et al., 2000; Sella et al., 2002; Mc Clusky et al., 2003; Vernant et al., 2004). مدل قدیمی حرکت صفحه‌ها براساس بی‌هنجاری‌های مغناطیسی سه میلیون سال اخیر در اقیانوس هند است که به‌خاطر پیچیده بودن حرکات صفحه‌ها در این بخش و چگونگی ارتباط با صفحه‌های آفریقا و سومالی از درجه اعتبار کمتری برخوردار است. بنابراین برآورد قابل اطمینان‌تر از این حرکت

معدودی از گسل‌ها تجمع می‌یابد، به مفهوم در نظر نگرفتن پتانسیل حرکت برای دیگر گسل‌ها از جمله گسل‌های ناشناخته است. بنابراین دور از انتظار نیست که این نرخ بالاتر از نرخ‌های به دست آمده به وسیله سن‌یابی و زمین‌ریخت‌شناسی باشد. از این رو به احتمال نرخ ژئودیتیک، دست کم برای گسل‌های گوک و ناینید غیر واقع بینانه و بیش از اندازه است. (Walker & Jackson, 2002) بر اساس بررسی‌های زمین‌ریخت‌شناسی نرخ لغزش ۲/۴ تا ۳ میلی‌متر در سال را برای گسل گوک برآورد می‌نمایند که با توجه به توضیح بالا و این که این برآورد، میانگین بازه زمانی طولانی‌تری است، احتمالاً واقع بینانه‌تر است. حرکت در راستای گسل گوک به سوی شمال به دو گسل ناینید و کوهبنان انتقال می‌یابد بنابراین برای هر کدام از این گسل‌ها انتظار نرخ لغزش کمتری نسبت به گسل گوک می‌رود. از این رو نرخ لغزش حدود ۱/۵ میلی‌متر در سال که بر اساس داده‌های سن‌یابی به دست آمده است (Conrad et al., 1981) دور از واقعیت به نظر نمی‌رسد. ایستگاه‌های اندازه‌گیری ژئودیتیک در دو سوی گسل کوهبنان (Vernant et al., 2004) حدود ۴ میلی‌متر کوتاه‌شدگی در راستای شمال-جنوب را گزارش می‌نمایند. این اندازه‌گیری بین دو نقطه به نسبت نزدیک انجام شده است، بنابراین از خطای کمتری برخوردار است و با توجه به راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری گسل کوهبنان به احتمال این گسل ترکیبی از حرکت راستالغز و کوتاه‌شدگی (هر کدام حدود ۲/۸ میلی‌متر در سال) را در خود جای می‌دهد.

به سوی جنوب جابه‌جایی گسل گوک به گسل سروستان انتقال می‌یابد. میزان جابه‌جایی واحدهای زمین‌شناسی در دو سوی این گسل مشابه گسل گوک است (Walker and Jackson, 2002)، بنابراین به احتمال نرخ لغزشی مشابه این گسل دارد. در جنوب باختری منطقه با وجود لرزه‌خیز بودن گسل سبزواران متأسفانه داده‌ای در ارتباط با نرخ لغزش آن در دست نیست. اما گسل میناب بر اساس داده‌های ژئودیتیک به‌طور غیر عادی نرخ لغزشی حدود ۱۱ میلی‌متر در سال را نشان می‌دهد. از آن جا که بخش زیادی از کوتاه‌شدگی در زاگرس به صورت غیر لرزه‌زا است (Masson et al., 2005)، بنابراین احتمالاً بخشی از دگرشکلی در راستای این گسل که زون زاگرس را از مکران جدا می‌نماید نیز به صورت خزش انجام می‌گیرد. چنانچه برآوردهای بالا درست باشند، می‌توان نتیجه گرفت که حدود ۵ میلی‌متر در سال حرکت راستالغز در راستای گسل‌های باختر کویر لوت انجام می‌گیرد و باقی‌مانده آن (تا حدود ۱۳ میلی‌متر در سال) یعنی حدود ۸ میلی‌متر در سال در خاور لوت جای می‌گیرد. در خاور کویر لوت، همان‌طور که پیشتر به آن پرداخته شد، برای گسل زاهدان حدود ۲/۵ میلی‌متر در سال و به همین شیوه محاسبه به میزان ۲ میلی‌متر در سال برای گسل نه باختری می‌توان در نظر گرفت. باقی‌مانده آن که در حدود ۳/۵ میلی‌متر در سال است احتمالاً در راستای دیگر گسل‌های این زون جذب می‌شود. برآوردهای بالا تنها تلاشی برای نزدیک شدن به واقعیت‌های زمین‌ساخت جنبا در خاور ایران با استفاده از داده‌های اندک موجود است و بدیهی است امکان خطا در آن وجود دارد. توسعه شبکه ژئودیتیک و بررسی‌های زمین‌ریخت‌شناسی تکمیلی بر روی این گسل‌ها، آزمونی بر درستی یا نادرستی این برآوردها در آینده خواهد بود.

۴- بررسی ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی گسل‌های زمین‌لرزه‌ای بم

از آن جا که گسل‌های زمین‌لرزه‌ای بم نزدیک‌ترین گسل‌ها به شهر بم بوده و بیشترین تأثیر را در برآورد خطر زمین‌لرزه دارند در این بخش به بررسی این گسل‌ها پرداخته می‌شود. زمین‌لرزه بم همراه با گسل خوردگی سطحی بود اما بر خلاف انتظار این گسیختگی در محل گسل از پیش شناخته شده بم-بروات دیده نشد. گسیختگی‌های سطحی در نخستین روز پس از زمین‌لرزه

گسل‌های خاور ایران با ابهامات بسیاری همراه است. از این رو در ادامه سعی می‌شود به کمک داده‌های زمین‌شناختی و ریخت‌زمین‌ساختی تا حدودی این کمبود برطرف شده و برآوردی اگر چه اولیه از نرخ لغزش گسل‌ها در خاور ایران به دست آید.

۳-۳. توزیع جابه‌جایی بر روی گسل‌های خاور ایران

(Walker and Jackson, 2002) با بررسی میزان جابه‌جایی کلی برخی از گسل و با این فرض که بیشترین تغییر شکل پوسته ایران در ۵ میلیون سال اخیر روی داده است، نرخ لغزش را برای تعدادی از گسل‌های خاور ایران برآورد نمودند. (Allen, 2004) نیز با بررسی زمین‌ساخت ناحیه‌ای، تغییر شکل در پوسته ایران را مربوط به ۳/۵ تا ۷ میلیون سال اخیر و به طور متوسط ۵ میلیون سال اخیر می‌داند. متأسفانه داده‌های اندک برداشت‌های ژئودیتیک کمک چندانی به تعیین نرخ لغزش دقیق‌تر گسل‌ها در این منطقه نمی‌نمایند اما داده‌های اخیر سن‌یابی پیرامون گسل‌های این ناحیه می‌تواند آزمونی بر درستی و یا نادرستی برآوردهای مبتنی بر داده‌های زمین‌شناسی باشد. تنها موردی که هر دو برآورد زمین‌شناسی و سن‌یابی مطلق برای آن در دست است گسل زاهدان در شمال خاوری منطقه مورد مطالعه و راندگی سفیدابه در انتهای شمالی آن است. لایه‌های زمین‌شناسی در راستای این گسل جابه‌جایی در حدود ۱۳ کیلومتر را نشان می‌دهند که با فرض این که این جابه‌جایی در ۵ میلیون سال اخیر روی داده باشد، نرخ لغزش راستالغز ۲/۶ میلی‌متر در سال برای آن به دست خواهد آمد. گسل راستالغز زاهدان در انتهای شمالی خود به وسیله گسل راندگی سفیدابه خاتمه می‌یابد. پایان یافتن حرکت راستالغز به وسیله راندگی‌ها پدیده‌های است که به خوبی در ایران و دیگر نقاط جهان شناخته شده است (e.g. Bayasgalan, 1999) و میزان حرکت راندگی در یکی وابسته به میزان حرکت راستالغز در گسل دیگر دارد. جنبش گسل سفیدابه در سال ۱۳۷۲ پنج زمین‌لرزه با بزرگی ۵/۵ تا ۶/۲ را ایجاد نمود. گسیختگی سطحی همراه با این زمین‌لرزه‌ها ساز و کار نرمال را نشان می‌داد اما سازوکار کانونی آنها همگی راندگی و بیانگر جنبش گسل پنهان بود (Berberian et al., 2000). پس از رویداد زمین‌لرزه به منظور تعیین نرخ لغزش این گسل از رسوبات دریاچه‌ای برخاسته بر اثر رشد گسل نمونه‌برداری و به تازگی تعیین سن شده است (Parsons et al., 2005). نتایج سن‌یابی بیانگر نرخ همگرایی حدود ۱/۵ میلی‌متر برای گسل راندگی سفیدابه است. راستای گسل سفیدابه زاویه‌ای در حدود ۵۵ درجه با راستای کلی گسل زاهدان می‌سازد بنابراین ۲/۶ میلی‌متر در سال حرکت راستالغز می‌تواند حدود ۱/۵ میلی‌متر کوتاه‌شدگی (عمود بر راستای گسل) را برای گسل سفیدابه موجب شود:

$$2.6 * \cos 55 = 1.49$$

از این مقایسه یک نتیجه‌گیری جالب می‌توان داشت، که فرض رخ دادن بیشترین تغییر شکل در ایران در ۵ میلیون سال اخیر، دست کم در این بخش از کشور دور از واقعیت نبوده و از آن می‌توان در برآورد نرخ لغزش دیگر گسل‌ها استفاده نمود. نرخ لغزش‌های موجود برای گسل‌های پیرامون بم در شکل ۱ نمایش داده شده است. فلش اشاره به گسل‌هایی است که داده‌هایی در ارتباط با نرخ لغزش آنها در دست است. فلش سرخ رنگ نرخ لغزش‌های به دست آمده براساس بررسی‌های زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی و با فرض این که بیشترین تغییر شکل در خاور ایران در ۵ میلیون سال اخیر روی داده است را نشان می‌دهد. فلش سبز رنگ نرخ‌های به دست آمده براساس سن‌یابی مطلق را نشان می‌دهد و فلش آبی رنگ بر اساس ترکیبی از داده‌های ژئودیتیک و زمین‌شناسی است. نرخ اخیر با توجه به این که هیچ نقطه اندازه‌گیری در داخل بلوک لوت نداشته است، بیشتر بر پایه ترکیبی از گمان‌های زمین‌شناسی و میزان کلی حرکت راستالغز در خاور ایران است (Vernant et al., 2004). فرض این که جابه‌جایی دیده شده بین ایستگاه‌های برداشت ژئودیتیک بر روی تعداد

دانه‌های ریز کوارتز، که کم و بیش به فراوانی در محیط صحرایی ایران یافت می‌شود، باشد. در این روش، زمان سپری شده از آخرین باری که نمونه آفتاب خورده است تعیین می‌شود، بنابراین سن به دست آمده در واقع بیانگر زمان جاری شدن سیلابی است که مواد خود را بر روی رسوبات کهن تر نهشته است. حال چنانچه این رسوبات به وسیله جنبش گسل جابه‌جا شده باشند، با اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی و سن نمونه می‌توان نرخ لغزش این گسل را تعیین نمود.

همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، گسل اصلی زمین لرزه بزم گسل راستالغز جنوب بزم است. سازوکار این گسل به طور کامل راستالغز است از این رو رسوبات را به صورت شاقولی جابه‌جا نمی‌نمایند و کاربرد روش‌های سن‌یابی در این مورد بدون روش‌های پیچیده حفر ترانسه‌های موازی و مطالعات پارینه لرزه‌شناختی امکان‌پذیر نیست. اما از آن‌جا که جنبش گسل جنوب بزم با گسل بزم-براوات در ارتباط است (به بخش بعدی مراجعه نمایید) بنابراین با تعیین نرخ لغزش یکی می‌توان به نرخ لغزش دیگری دست یافت. این گسل اسکارپ مشخصی را در سطح زمین ایجاد نموده است که در راستای آن رسوبات دشت سیلابی و رودخانه‌ای تا حدود ۳۰ متر برخاستگی دارند. میزان جابه‌جایی به سمت جنوب و انتهای گسل کاهش می‌یابد. به منظور تعیین نرخ لغزش این گسل از بخش انتهایی اسکارپ که جوان‌تر بوده و کمتر مورد فرسایش قرار گرفته است نمونه‌گیری شد. شکل‌های ۵ و ۶ مکان‌های نمونه‌گیری را در انتهایی‌ترین بخش برخاسته تاقدیس بزم-براوات نشان می‌دهند. این رسوبات از نوع رودخانه‌ای بوده و در نتیجه رشد گسل، هم‌اکنون به میزان ۳۲۵ سانتی‌متر بالاتر از سطح آبراهه مجاور قرار دارند. به منظور کاهش خطا، سه نمونه از ترازهای مختلف برداشته شده است. افزون بر آن، از این نمونه‌ها در تعیین نرخ رسوب‌گذاری دشت سیلابی نیز استفاده خواهد شد. سن این نمونه‌ها که به ترتیب از بالا به پایین با شماره‌های ۱ تا ۳ مشخص شده‌اند، در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به توالی رسوبی، نمونه‌های بالاتر دارای سن جوان‌تر هستند و بالاترین لایه آن پیش از شروع برخاستگی تاقدیس بر جای گذاشته شده است بنابراین سن جوان‌ترین رسوبات بیانگر زمان شروع بالآمدگی در آن بخش از تاقدیس است. پس از آن به علت بالا بودن این بخش نسبت به دشت پیرامون، رسوبگذاری بر روی آن متوقف شده و فرسایش شروع می‌شود. به علت محدودیت‌های روش سن‌یابی تعیین سن دقیق بالاترین لایه امکان‌پذیر نیست و نمونه‌ها باید همگی از ژرفای حداقل نیم متری برداشته شوند. نمونه شماره یک از ژرفای ۷۰ سانتی‌متری و ارتفاع ۲۵۵ سانتی‌متری نسبت به کف آبراهه مجاور برداشته شد و سنی که برای آن محاسبه شده است، حدود ۹۱۷۰ سال است. بدیهی است رسوبات بالایی جوان‌تر هستند پس چنانچه سن این نمونه به بالاترین لایه نسبت داده شود در آن صورت کمینه نرخ بالا آمدگی تاقدیس در این قسمت به روش $0.35 \text{ mm/y} = (2550+700)/9170$ محاسبه می‌شود. توالی سنی دو نمونه دیگر تأییدی بر نتایج سن‌یابی است و از آنها می‌توان برای تعیین نرخ رسوبگذاری نیز استفاده نمود. بر این اساس میانگین نرخ رسوبگذاری حدود $0.18/1$ میلی‌متر در سال است و از آنجا که سطح حاضر دشت به عنوان سطح مبنای محاسبات بالا استفاده شده است، بنابراین به منظور تعیین نرخ واقعی رشد تاقدیس بزم-براوات نرخ رسوب‌گذاری دشت نیز باید به آن اضافه شود:

$$0.35 + 0.18 = 0.53 \text{ mm/y}$$

یادآور می‌شود که نرخ‌های بالا بدون در نظر گرفتن فرسایش و این که بالاترین لایه در محل‌های نمونه‌گیری سن کمتری دارد، محاسبه شده بنابراین بیانگر کمینه مقدار هستند. از سوی دیگر این مقدار بالا آمدگی ناشی از مؤلفه شاقولی لغزش بر

در شمال بزم شناسایی شد اما گسل خوردگی زمین لرزه‌های اصلی در جنوب بزم تا زمان دریافت داده‌های ماهواره رادار (چند هفته بعد) همچنان ناشناخته مانده بود. گسیختگی جنوب بزم بزرگ‌ترین گسیختگی همراه با زمین لرزه بزم بود که نخستین بار به کمک داده‌های رادار (Envisat ASAR) شناسایی شد (Talebian et al., 2004). گسل زمین لرزه‌ای در این بخش از چهار قطعه اصلی تشکیل شده است و در مجموع درازای آن حدود ۸ کیلومتر است (شکل ۳). این قطعات هرکدام از قطعات کوچک تری با درازای ۵۰ تا ۱۰۰ متر تشکیل شده‌اند و در مجموع روند کلی شمال-جنوب را دارند. بیشینه جابه‌جایی اندازه‌گیری شده در قطعه میانی و حدود ۲۰ سانتی‌متر است. قطعات گسلی به صورت پلکانی و با جهش به چپ به یکدیگر متصل می‌شوند و بیانگر حرکت راستالغز راستگرد هستند. جابه‌جایی شاقولی در راستای گسل ناچیز و تنها به طور محلی در انتهای قطعات و ناشی از انتقال حرکت از یک قطعه به قطعه دیگر است. قطعه جنوبی راستایی متفاوت (حدود ۵۰ تا ۶۰ درجه) داشته و حدود ۵ سانتی‌متر جابه‌جایی راستالغز راستگرد و ۱۲ سانتی‌متر جابه‌جایی شاقولی (فروافتادگی بلوک جنوب خاوری) نشان می‌دهد. انتهای شمالی گسل جنوب بزم به تدریج در حاشیه جنوبی شهر ناپدید شده و ادامه آن به داخل شهر قابل پیگیری نیست. در فاصله حدود ۴ کیلومتری خاور گسل جنوب بزم، گسل معکوس بزم-براوات دیده می‌شود. این گسل با درازای حدود ۱۲ کیلومتر مشخص‌ترین گسل موجود پیرامون بزم است و نخستین بار به وسیله Berberian (1976) گزارش شده و در نقشه‌های زمین‌شناسی به خوبی نمایش داده شده است. گسل بزم-براوات اسکارپ مشخصی را در سطح زمین ایجاد نموده است که به صورت چین خوردگی لایه رسوبات دانه ریز به احتمال با سن کواترن زیرین در سطح زمین دیده می‌شود. شیب اسکارپ در سمت خاور تند و در باختر ملایم است و بیانگر وجود گسلی معکوس با شیب به سوی باختر و پنهان در زیر این تاقدیس است. در سطح زمین گسل بزم-براوات برش مشخصی از لایه‌ها را نشان نمی‌دهد.

پس از زمین لرزه، تنها درزه‌های بسیار کوچک با بازشدگی کمتر از ۱ سانتی‌متر در جلو این اسکارپ دیده شد. این بازشدگی‌ها بسیار ناچیز و این احتمال نیز وجود دارد که در ارتباط با جنبش نیرومند زمین و نشست رسوبات جوان باشد. اسکارپ گسل راندگی بزم-براوات به سوی شمال و جنوب به تدریج از بین می‌رود. این موضوع به صورت پلانچ تاقدیس پوشاننده گسل بویژه در بخش جنوبی آن دیده می‌شود. رشد تاقدیس به سوی جنوب همچنین موجب شده است که آبراهه‌هایی که از سوی باختر به خاور جریان دارند، از مسیر خود منحرف شده و به سوی انتهای جنوبی تاقدیس روان شوند. آثار عبور مستقیم آبراهه‌ها پیش از بالآمدگی و در شروع رشد تاقدیس امروزه به صورت دره‌های خشک و پادگانه‌های آبرفتی بویژه در انتهای تاقدیس دیده می‌شوند. از این پادگانه‌ها برای تعیین سن مطلق نمونه‌گیری شده است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

۴-۱. سن یابی مطلق و نرخ لغزش گسل جنوب بزم

به طور معمول برای تعیین نرخ لغزش گسل‌ها از روش‌های مختلف سن‌یابی استفاده می‌شود که هر کدام مزیت‌ها و محدودیت‌های خاص خود را دارند. روش سن‌یابی ترمولومینسانس نوری یکی از جدیدترین و دقیق‌ترین روش‌های سن‌یابی است که به تازگی در بررسی‌های زمین‌شناختی کاربرد گسترده‌ای یافته است. مزیت روش یادشده در این است که در مناطق کویری با شدت نور آفتاب زیاد بهترین نتیجه را به دست می‌دهد. از طرف دیگر نمونه‌ی مورد استفاده فقط کافی است که حاوی

معکوس و ۸۰٪ آن را ناشی از حرکت راستالغز می‌داند.

۴-۳. برآورد نرخ لغزش گسل زمین‌لرزه‌ای جنوب بم

از محاسبات بالا نتیجه می‌گیریم که به طور متوسط نرخ لغزش گسل بم- براوات حدود ۰/۵۹ (۰/۵۲ تا ۰/۶۷) میلی‌متر در سال است. میانگین نسبت نرخ لغزش گسل بم- براوات به گسل جنوب بم نیز حدود ۲۲/۵٪ (۱۸ تا ۲۷) است. بنابراین به احتمال نرخ لغزش گسل جنوب بم حدود ۲ میلی‌متر در سال خواهد بود. بدیهی است تعیین نرخ لغزش دقیق‌تر این گسل نیازمند به بررسی‌های تکمیلی و استفاده از روش‌های مختلف پارینه لرزه‌شناسی و یا ژئودتیک دارد.

۵- نتیجه‌گیری

به طور کلی با ترکیب نتایج به دست آمده از داده‌های سنایی مطلق، ژئودتیک، زمین‌ساخت ناحیه‌ای، و زمین‌ریخت‌شناسی می‌توان به این نتیجه رسید که خاور ایران در مجموع حدود ۱۳ میلی‌متر در سال حرکت به سوی شمال ایران مرکزی (در طول جغرافیایی ۵۶ خاوری) را نسبت به افغانستان (در طول جغرافیایی ۶۱ خاوری) در خود جای می‌دهد. با توجه به غیر لرزه‌خیز بودن بخش مرکزی لوت بیشترین میزان این حرکت در راستای گسل‌های راستالغز خاور و باختر لوت انجام می‌گیرد. در یک نگاه کلی، گسل‌های باختر لوت در مجموع حدود ۵ میلی‌متر در سال حرکت راستالغز دارند و باقیمانده آن که حدود ۸ میلی‌متر است در خاور لوت جای می‌گیرد. نرخ لغزش گسل‌های راستالغز خاور ایران اگر چه در بخش‌های مختلف اندکی متفاوت است اما به طور کلی در محدوده ۱/۵ تا ۳ میلی‌متر در سال قرار می‌گیرند. بر اساس نتایج سن‌یابی میانگین رشد سالیانه اسکارپ گسل بم-بروات حدود ۰/۵ میلی‌متر در سال در راستای شاقولی است. این میزان بالا آمدگی با حدود دو میلی‌متر در سال حرکت راستالغز گسل زمین‌لرزه‌ای جنوب بم در ارتباط است. با توجه به درازای گسل جنوب بم این نرخ لغزش گشتاور لازم برای رویداد دو زمین‌لرزه با بزرگی حدود ۶/۵ (بافرض حدود ۱۵ کیلومتر ستبرای لایه لرزه‌زا) در طی هزار سال را فراهم می‌نماید.

روی سطح گسل است اما با توجه به این که شیب گسل حدود ۷۰-۸۰ درجه است (Jackson et al., 2006) بنابراین مؤلفه افقی لغزش ناچیز (حدود ۵٪) بوده و نرخ بالا آمدگی تاقدیس را می‌توان معادل نرخ لغزش بر روی سطح گسل در نظر گرفت.

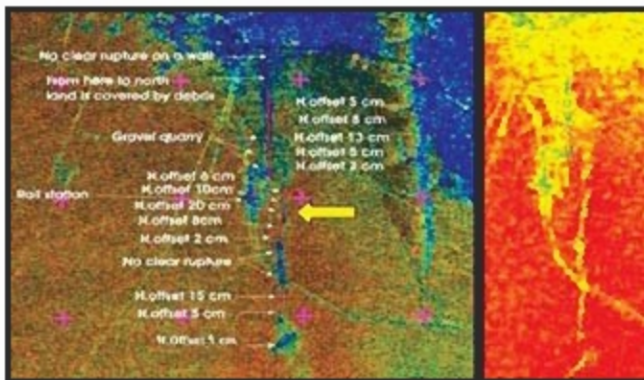
۴-۲. برآورد نسبت نرخ لغزش گسل راستالغز جنوب بم به گسل معکوس بم-

بروات

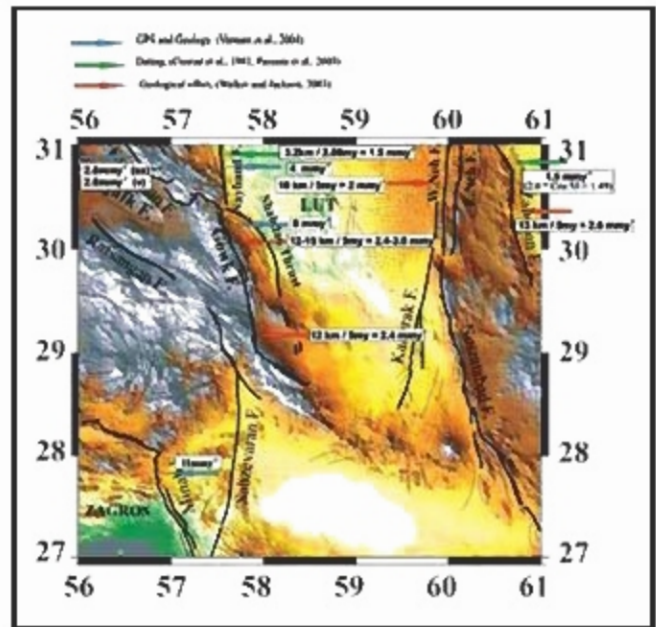
همانطور که پیش از این یادآوری شد، به کمک روش‌های سن‌یابی برآورد مستقیم نرخ لغزش گسل راستالغز و پنهان جنوب بم به آسانی امکان‌پذیر نیست. بنابراین می‌توان به طور غیر مستقیم از نرخ لغزش به دست آمده برای گسل بم- براوات استفاده کرد. بدین منظور لازم است جنبش نسبی این دو گسل نسبت به یکدیگر مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه با استفاده از داده‌های ژئودتیک و زمین‌لرزه‌ای به بررسی این موضوع پرداخته می‌شود. (McKlusky et al. (2003 بردار حرکت کلی عربستان نسبت به اوراسیا را بر اساس ایستگاه ژئودتیک بحرین دارای دو مؤلفه شمالی به میزان ۲۰/۷۹ و مؤلفه خاوری ۳/۷۲ میلی‌متر در سال تعیین می‌نمایند. (Vernant et al., (2004 نیز این دو مؤلفه را ۲۲/۰۷ میلی‌متر شمالی و ۲/۹۷ میلی‌متر خاوری تعیین می‌نمایند. ایشان همچنین برای ایستگاه کرمان نیز این دو مؤلفه را ۱۶/۴۳ و ۱/۶۷ میلی‌متر در سال تعیین می‌نمایند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به طور متوسط بردار حرکتی ایران رو به شمال- شمال خاوری است و زاویه‌ای حدود ۶ تا ۱۰ درجه نسبت به شمال را داراست. از طرف دیگر، گسل بم- براوات نیز دارای روند حدود ۴ درجه در جهت شمال- شمال باختری است بنابراین بردار حرکتی ایران زاویه‌ای در حدود ۱۰-۱۵ درجه با راستای گسل بم- براوات می‌سازد. همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، کوتاه شدگی پوسته در منطقه بم به دو مؤلفه راستالغز و معکوس تقسیم شده است که مؤلفه راستالغز آن بر روی گسل جنوب بم و مؤلفه معکوس آن بر روی گسل بم- براوات جای می‌گیرد. نسبت این دو مؤلفه تابعی از زاویه تمایل حرکت کلی نسبت به راستای گسل‌ها است که با توجه به مقادیر بالا حدود ۱۸ تا ۲۷ درصد معکوس و مانده آن راستالغز تعیین می‌شود. این مقدار با یافته‌های (Funning et al. (2004 که به کمک داده‌های ماهواره رادار زمین‌لرزه بم را مدل‌سازی نمودند نیز هم‌هنگی دارد. ایشان مدل‌هایی که به زمین‌لرزه نسبت می‌دهند حدود ۲۰٪ انرژی زمین‌لرزه را ناشی از حرکت

جدول ۱- نتایج تعیین سن مطلق نمونه‌های مربوط به گسل بم- براوات

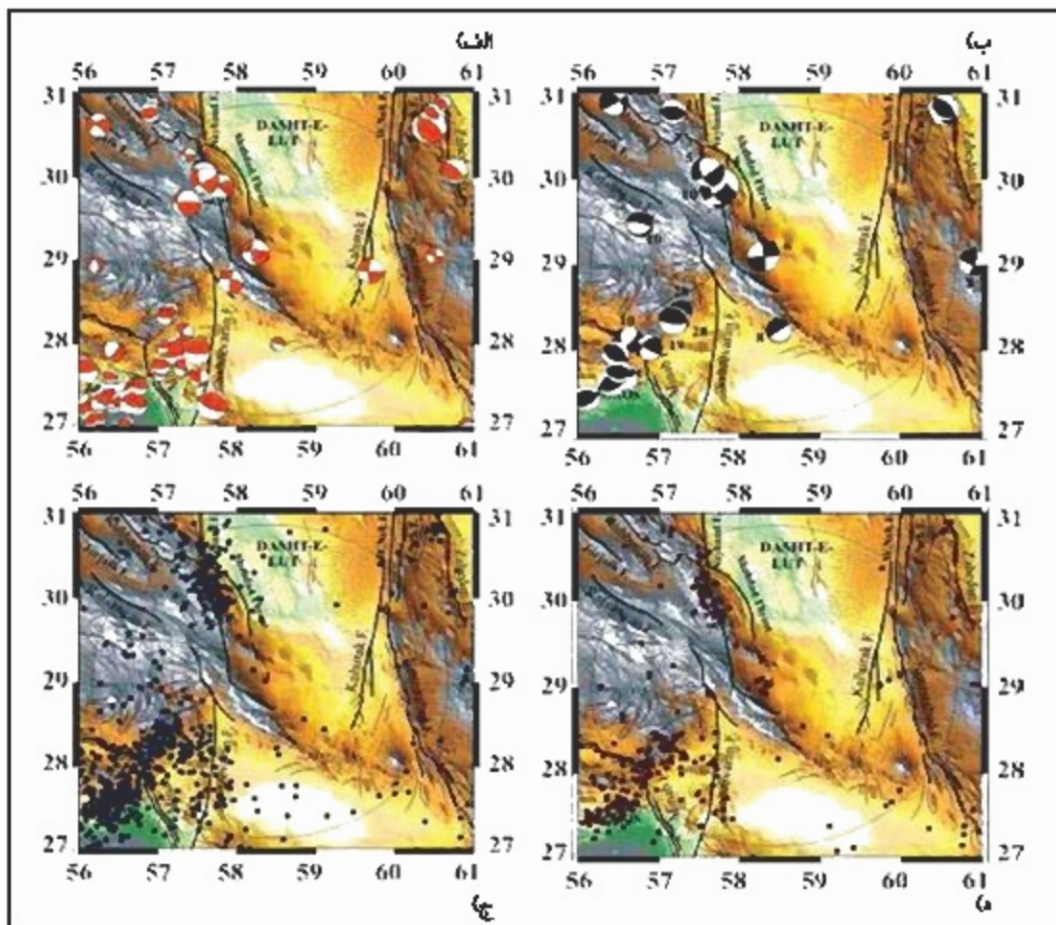
Sample ID	Elevation relative to nearest drainage level	Depth from surface(cm)	Annual (Gy/ka)	±	Age (ka)	±
B1 Drainage 1 (top)	255	70	5.01	0.20	9.17	1.5
B2 Drainage 1 (Middle)	135	190	4.52	0.20	11.07	0.9
B3 Drainage 1 (bottom)	70	255	3.22	0.17	19.21	1.8



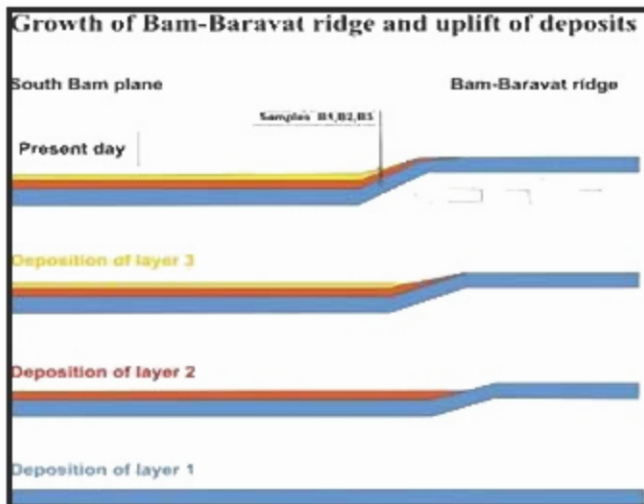
شکل ۳- جایی‌جایی‌های لغزش‌گیری شده بر روی گسل زمین‌لرزه‌ای بم، نقش زرد رنگه مکان پیشینه جابه‌جایی سطحی را نشان می‌دهد هر دو تصویر سمت چپ و راست بر اساس پردازش داده‌های ماهواره رادار Envisat تهیه شده‌اند (Fielding et al., 2005) و گسستگی سطحی همراه با زمین‌لرزه بم را نشان می‌دهند. دایره کوچک در تصویر سمت راست نقاط GPS اندازه‌گیری شده بر روی زمین است.



شکل ۱- نرخ لغزش گسل‌ها در جنوب ایران که به روش‌های گوناگون برآورد شده است



شکل ۲- لرزه‌خیزی بم و پیرامون آن الف) سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها پیرامون بم بر اساس کاتالوگ دانشگاه هاروارد پیشتر سازوکارها را استانتز و حرکت راستگرد را پروژه در راستای گسل‌های گوکک، سروستان و کهورک نشان می‌دهند. ب) سازوکارهای بازنگری شده به وسیله مدل‌سازی نواحی درونی زمین‌لرزه (برگرفته از Jackson, 2001). این سازوکارها دارای خطای بسیار کمتری پروژه در همین ژرفا هستند. اعداد نمایانگر ژرفای یا خطای لند که زمین‌لرزه‌ها (چ) و مرکز زمین‌لرزه‌های منتشر شده در کاتالوگ ISC پس از سال ۱۹۹۶. د) و مرکز زمین‌لرزه‌ها بر اساس کاتالوگ Engdahl (2002). این داده‌ها دارای خطای و مرکز کمتری نسبت به دیگر کاتالوگ‌ها بوده و نسیج آنها تطابق بهتری را با گسل‌های اصلی منطقه دارد.



شکل ۵- نمای شماتیکی از رسوبگذاری و رشد حوضان تقدیس هم- پراوات و محل های نمونه گیری



شکل ۶- گسل عمودگی سطحی همراه با زمین لرزه هم در جنوب هم. امای نزدیکه، چابہ جایی راستانتر راستگرد را نشان می دهد.



شکل ۷- آبرفت های بالا آمده در انتهای تقدیس هم- پراوات و محل های نمونه گیری

References

Allen, M., Jackson, J. & Walker, E., 2004- Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long term deformation rates. *Tectonics*, 23, TC2008.

Ambraseys, N. N. & Melville, C. P., 1982- A history of Persian earthquakes, Cambridge University Press, UK, 219pp.

Bayasgalan, A., Jackson, J., Ritz, J-R. & Carretier, S., 1999- Field examples of strike-slip fault terminations in Mongolia and their tectonic significance, *Tectonics*, 18, 394-411.

Berberian, M., 1976- Contribution to the seismotectonics of Iran (Part II). Report No. 39, Geological Survey of Iran.

Berberian, M., 1994- Natural hazards and the first earthquake catalogue of Iran. Volume 1: Historical hazards in Iran prior to 1900. *Int. Inst. Earthquake Engineering and Seismology*, Tehran, 603pp.

Berberian, M. & Qorashi, M., 1994- Co-seismic fault-related folding during the south Gohaf earthquakes of November 20, 1989, in

Berberian, M., Jackson, J. A., Qorashi, M., Talebian, M., Khatib, M. M. & Priestley, K., 2000- The 1994 Seffidabeh earthquakes in eastern Iran: blind thrusting and bedding-plane slip on a growing antiform, and active tectonics of the Sistan suture zone. *Geophys. J. Int.*, 142, 283-299.

Binet, R. & Bollinger, L., 2005- Horizontal coseismic deformation of the 2003 Bam (Iran) earthquake measured from SPOT-5 THR satellite imagery, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L02307.

Chu, D. and Gordon, R. G., 1998- Current plate motions across the Red Sea, *Geophys. J. Int.*, 135, 313 - 328.

DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F. and Stein, S., 1994- Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2191-2194.

Engdahl, R. R., van der Hilst, R. & Buland, R., 1998- Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 3, 722-743.

Fialko, Y., Sandwell, D., Simons, M. & Rosen, P., 2005- Three-dimensional deformation caused by the Bam, Iran, earthquake and the origin of shallow slip deficit. *Nature*, 433, 295-299.

- Fielding, E. J., Wright, T. J., Muller, J., Parsons, B. E. & Walker, R., 2004- Aseismic deformation of a fold-and-thrust belt imaged by synthetic aperture radar interferometry near Shahdad, southern Iran. *Geology*, 32, 577– 580.
- Fielding, E. J., Talebian, M., Rosen, P. A., Nazari, H., Jackson, J. A., Ghorashi, M. & Walker, R., 2005- Surface ruptures and building damage of the 2003 Bam, Iran earthquake mapped by satellite synthetic aperture radar interferometric correlation. *J. Geophys. Res.*, 110, B03302.
- Fu, B., Yoshiki, N., Lei, X., Toda, S. & Awata, Y., 2004- Mapping active fault associated with the 2003, Mw 6.6 Bam (SE Iran) earthquake with ASTER 3D images. *Remote Sensing of Environment*, 92, 153–157.
- Funning, G. J., Parsons, B. E., Wright, T. J., Jackson, J. A. & Fielding, E. J., 2005. Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat advanced synthetic aperture radar imagery. *J. Geophys. Res.*,
- Jackson, J., 1992- Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey and the Caucasus, *J. Geophys. Res.*, 97, 12471-12479.
- Jackson, J., 2001- Living with earthquakes: know your faults. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 5, Special Issue 1, 5-1.
- Jackson, J. and McKenzie, D., 1984-, Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey and Pakistan, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 77, 185– 264.
- Jackson, J. and McKenzie, D., 1988- The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East, *Geophys. J.*, 93, 45 – 73.
- Jackson, J. A., Haines, J. and Holt, W., 1995 - The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran, *J. Geophys. Res.*, 100, 15, 205– 15,219.
- 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, 3, 1270-1292, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03056.x.
- Jestin, F., Huchon, P. and Gaulier J. M., 1994- The Somalia plate and the East African Rift System: Present-day kinematics, *Geophys. J. Int.*, 116, 637 – 654.
- Masson, F., Chéry, J., Martinod, J., Hatzfeld, D., Vernant, P., Tavakoli, F. & Ashtiani, A., 2005- Seismic versus aseismic deformation in Iran inferred from GPS and seismicity data, *Geophys. J. Int.*, 160, 217–226.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H.-G., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksoz, M.N. and Veis, G., 2000- Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus, *J. Geophys. Res.*, 105, 5695-5719,
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D., Tealeb, A., 2003- GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions, *Geophysical Journal International*, 155 (1), 126–138 doi:10.1046/j.1365-246X.2003.02023.x
- Nakamura, T., Suzuki, S., Sadeghi, H., Aghada, S. M. F., Matsushima, T., Ito, Y., Hosseini, S. K., Gandomi, A. J. & Maleki, M., 2005- Source fault structure of the 2003 Bam earthquake, southeastern Iran, inferred from the aftershock distribution and its relation to the heavily damaged area: existence of the Arg-e-Bam fault proposed. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L09308.
- Parsons, B., Wright, T., Rowe, P., Andrews, J., Jackson, J., Walker, R., Khatib, M., Talebian, M., Bergman E., and Engdahl, E. R., 2005- The 1994 Sefidabeh (eastern Iran) earthquakes revisited: new evidence from satellite radar interferometry and carbonate dating about the growth of an active fold above a blind thrust fault, *Geophys. J. Int.* doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02655.x.
- Sella, G. F., Dixon, T. H. & Mao, A., 2002- REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy, *J. Geophys. Res.*, 107(B4), 10.1029/2000JB000033.
- Talebian, M. & Jackson, J., 2004- A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran. *Geophys. J. Int.*, 156, 506–526.
- Talebian, M., Fielding, E., Funning, G., Ghorashi, M., Jackson, J., Nazari, H., Parsons, B., Priestley, K., Rosen, P., Walker, R. & Wright, T., 2004- The 2003 Bam (Iran) earthquake: rupture of a blind strike-slip fault. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L11611.
- Talebian, M., Biggs, J., Bolourchi, M., Copley, A., Ghassemi, A., Ghorashi, M., Hollingsworth, J., Jackson, J., Nissen, E., Oveisi, B., Parsons, B., Priestley, K. & Saiidi, A., 2006- The Dahuyeh (Zarand) earthquake of 22 February 2005 in central Iran: reactivation of an intra-mountain thrust, *Geophys. J. Int.*, 164, 137-148, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02839.x.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., Martinod, J., Walpersdorf, A., Ghafori-Ashtiany, M. & Chéry, J., 2002- The present day deformation of the Central Zagros (Iran), *Geophys. Res. Lett.*, 29, 33-1 to 33-4, doi:10.1029/2002GL015159.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., Moradi, A. S. & Paul, A., 2005- The 2003 December 26 Bam earthquake (Iran), Mw 6.6, aftershock sequence. *Geophys. J. Int.*, 163, 90-105.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R. Tavakoli, F. and Chéry, J., 2004- Contemporary Crustal Deformation and Plate Kinematics in Middle East Constrained by GPS measurements in Iran and Northern Oman, *Geophys. J. Int.*, 157, 381-398.
- Walker, R. & Jackson, J.A., 2002- Offset and evolution of the Gowk fault, S.E. Iran: a major intra-continental strike-slip system. *J. Struct. Geol.*, 24, 1677–1698.
- Walker, R. & Jackson, J., 2004- Active tectonics and late Tertiary strain distribution in central and eastern Iran. *Tectonics*, 23, TC5010.
- Wang, R., Xia, Y., Grosser, H., Wetzell, H.-U., Kaufmann, H. & Zschau, J., 2004- The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: precise source parameters from satellite radar interferometry, *Geophys. J. Int.*, 159, 917– 922.

Estimating Slip Rates of Faults around Bam and their Application in Evaluation of Earthquake Hazard

M. Talebian¹, A. H. Taheri², M. Fattahi³, M. Ghazali⁴, A. Behrooz⁵, A. Ghafarollahi⁶ & M.A.Riahi⁷

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

²Building and Housing Research Center, Tehran, Iran

³Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2008 May 08

Accepted: 2008 November 10

Abstract

The Indian plateau lies between the Arabian and Eurasian plates and accommodates approximately 22 mm/yr of N-S shortening. About 9 mm/y of this shortening is taken up by folding and thrusting in the Zagros while the remaining 13 mm/yr is taken up in the Alborz and Kopah-Dagh. The Central Iran block is relatively stable and thus moves to the north with an average velocity of about 15 mm/y. As the stable Afghanistan block lies to the east, the northward motion of Central Iran produces a right-lateral shear in eastern Iran, which is distributed mainly over a few major faults to the west (~5 mm/yr) and east (~ 8 mm/yr) of the Lut desert. Limited information is available about the slip rates of individual faults in eastern Iran; therefore in this study we try to combine all geological, geodetic and available Quaternary dating results to estimate the fault slip rates and distribution of active deformation in eastern Iran. Finally, we report the results from D_{63L} dating of samples taken from uplifted plain deposits near the south end of the Bam-Baravat fault. These results show that this fault is growing in the vertical direction with at a rate of ~ 0.5 mm/y. Considering geometric relation between the Bam-Baravat and the south Bam earthquake fault, we estimate a slip rate of about 2 mm/y for the south Bam earthquake fault.

Key Words: Bam, Earthquake, Iran, Slip Rate, Fault

For Further Volumes see pages 149 to 156

*Corresponding author: M.Talebian; E-mail: Talebian@gsi.ir