

برهم کنش مکانیکی مابین زمین‌لرزه‌های بزرگ بخش شرقی ایران

اصغر راست‌بود^{۱*}

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دریافت: ۱۴۰۰/۷/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰

چکیده

آنالیز تغییرات تنش کولمب در عمق متوسط لرزه‌ای برای برآورد احتمال رخداد زمین‌لرزه در بسیاری از مناطق لرزه‌خیز به کار گرفته شده است. این مطالعات نشان می‌دهند که در اکثر موارد مکان رخداد زمین‌لرزه‌های بعدی متأثر از تغییرات تنش کولمب ناشی از زمین‌لرزه‌های قبلی در آن منطقه است. به منظور بررسی مکان احتمالی رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ، تغییرات تنش کولمب همالرزهای (Coseismic Coulomb Stress Changes) ۲۴ زمین‌لرزه تاریخی و دستگای با بزرگای بیشتر از ۵/۵ در بخش شرقی ایران به ترتیب تاریخی محاسبه شد. بررسی برهم کنش مکانیکی مابین زمین‌لرزه‌ها، ارتباط مکانی مابین آن‌ها را در حدود ۵۰ درصد از رویدادها نشان داد. همچنین به منظور آگاهی از این که در کدام قسمت از منطقه مورد مطالعه خطر لرزه‌ای بیشتر است، تغییرات تنش کولمب تجمعی همالرزهای بر روی صفحات گسلی با هندسه بهینه محاسبه شد. نتایج این محاسبات مناطق پرخطر و محتمل برای زمین‌لرزه‌های بزرگ بعدی را نشان داد. این مناطق برای گسل‌های شیب‌لغز عبارتند از: قسمتی از گسل بالهر (Balher) در جنوب غربی گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۴۰، قسمت شمالی گسل فردوس در غرب گسیختگی زمین‌لرزه دوم ۱۹۶۸ و قسمت جنوبی گسل فردوس در غرب گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۴۷، قسمتی از گسل محمدآباد در جنوب گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۴۱، قسمت‌هایی از گسل طیس در شرق گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۷۸. برای گسل‌های امتداد لغز نیز این مناطق عبارتند از: بخشی از گسل درونه در شمال گسیختگی زمین‌لرزه دوم ۱۹۰۳، قسمت غربی گسل دشت بیاض در غرب گسیختگی زمین‌لرزه سوم ۱۹۷۹، گسل دوست‌آباد در جنوب گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۴۷، قسمت انتهایی گسل آبیز در جنوب گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۹۷، ابتدای گسل نابند در جنوب گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۷۸.

کلیدواژه‌ها: تغییرات تنش کولمب، برهم کنش مکانیکی، گسل فعال، زمین‌لرزه، شرق ایران.

۱- مقدمه

گسل فعال، زمین‌لرزه دیگری می‌تواند در مجاورت این منطقه لرزه‌خیز روی دهد که این امر می‌تواند فعالیت لرزه‌ای بر روی یک گسل مشخص را تسریع کرده و یا به تعویق اندازد (King و همکاران، ۱۹۹۴). این ایده باعث تحقیقات متعددی در بسیاری از مناطق لرزه‌خیز جهان با آنالیز تغییرات تنش کولمب شده است که مشخص کند آیا می‌توان با این روش رخداد زمین‌لرزه‌ها را پیش‌بینی کرد یا خیر؟ این مطالعات نشان می‌دهند که مکان رخداد زمین‌لرزه‌های بعدی متأثر از تغییرات تنش ناشی از زمین‌لرزه‌های قبلی در آن منطقه است. این امر پیامدهای قابل توجهی را برای ارزیابی خطر لرزه‌ای و پیش‌بینی زمین‌لرزه دارد. در طول سه دهه گذشته تحقیقات مختلفی در ارتباط با چگونگی انتقال تنش در اثر رخداد زمین‌لرزه‌ها با استفاده از معیار تغییرات تنش کولمب انجام گرفته است. این تحقیقات به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند، برخی از تحقیقات انجام شده را می‌توان در هر سه دسته جای داد. دسته اول ارتباط مکانی زمین‌لرزه اصلی را با پس‌لرزه‌های بعد از آن مورد بررسی قرار می‌دهد که به بازه زمانی نسبتاً کوتاهی محدود می‌شود، دسته دوم به برهم کنش مابین زمین‌لرزه‌های بزرگ

رخداد زمین‌لرزه یکی از مخرب‌ترین و هراس‌انگیزترین پدیده‌های طبیعی است که از دیرباز دامن‌گیر بشر بوده است. کاهش خسارات و مرگ‌ومیر ناشی از زمین‌لرزه همواره یکی از قدیمی‌ترین دغدغه‌های بشر بوده و هست. کشور ایران یکی از کشورهای لرزه‌خیز جهان است که در امتداد کمربند لرزه‌خیز آلپ-همالیا قرار دارد. کمربند لرزه‌خیز آلپ-همالیا از غرب ناحیه مدیترانه تا جنوب شرقی آسیا امتداد دارد. فلات ایران در چندصد سال اخیر شاهد رخداد زمین‌لرزه‌های مخرب و ویرانگری بوده که تلفات و خسارات سنگینی را به همراه داشته است. اگر چه در شرایط کنونی آگاهی از زمان رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ و پس‌لرزه‌های احتمالی ناشی از آن‌ها به منظور کاهش خسارات جانی و مالی امکان‌پذیر نیست، اما می‌توان با مطالعه داده‌های زمین‌لرزه‌های گذشته، مناطق پرخطری که پتانسیل لرزه‌ای بالایی دارند را شناسایی کرد و با بهره‌گیری از این مطالعات در احداث سازه‌ها، خسارات ناشی از رخداد زمین‌لرزه‌ها را کاهش داد. در اثر تغییرات تنش پوسته ناشی از رخداد زمین‌لرزه بر روی یک

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۳۹۲۴۱۸

آدرس ایمیل: arastbood@tabrizu.ac.ir (ا. راست‌بود).

زمانی ۱۰۰۰ ساله برآورد گردیده و نشان داده شده است که تنش تا حد زیادی مستقل از رئولوژی فرضی بوده و خیلی به پیشینه لغزش در هر بخش گسل حساس است (Smith و Sandwell، ۲۰۰۶). چون در کل بخش جنوبی گسل سن آندریاس در طی ۱۵۰ تا ۳۰۰ سال گذشته زمین لرزه بزرگی رخ نداده است لذا انتظار می رود که تنش زمین ساختی در این بخش بالا باشد، براساس نتایج این تحقیق تنش کولمب نیز در حال حاضر در کل این بخش بالاست. تغییرات مکانی- زمانی تنش کولمب با استفاده از تغییرات نرخ لرزه خیزی و تفسیر زمین ساختی آن برای هوکایدو^۵ در شمال ژاپن بررسی شده است (Ghimire و همکاران، ۲۰۰۸).

روند تغییرات تنش کولمب در شمال شرقی کارائیب طی ۲۵۰ سال گذشته ناشی از تغییر شکل همالزهای، پسالزهای و بین لرزه ای با مدل سازی چرخه زمین لرزه برای یازده زمین لرزه با بزرگای بیش از ۷ مورد بررسی قرار گرفته است (Ali و همکاران، ۲۰۰۸). تغییر تنش کولمب مربوط به زمین لرزه ۲۰۰۵ کشمیر و خطر لرزه ای ناشی از آن مورد تحلیل قرار گرفته است (Gahalaut، ۲۰۰۹).

تغییرات تنش کولمب و لرزه خیزی مورد انتظار ناشی از آن برای زمین لرزه ۱۴ آوریل ۲۰۱۰ یوشوی^۶ چین با بزرگای موج سطحی ۷/۱ برآورد شده است (Shan و همکاران، ۲۰۱۱). حساسیت تغییر تنش کولمب ناشی از تغییر در مدل های منبع لرزه اصلی و پارامترهای گسل گیرنده با مطالعه موردی روی زمین لرزه ۲۰۱۱-۲۰۱۰ کریستچرچ^۷ نیوزیلند بررسی شده است (Zhan و همکاران، ۲۰۱۱). در تحقیق دیگری توزیع لغزش همالز و تغییر تنش کولمب مربوط به زمین لرزه ۶ آوریل ۲۰۰۹ با بزرگای گشتاوری ۶/۳ لوکویلا^۸ با حل مسئله معکوس جابه جایی های حاصل از GPS به انجام رسیده است (Serpelloni و همکاران، ۲۰۱۲). تغییر تنش کولمب ناشی از زمین لرزه ۱۱ آوریل ۲۰۱۲ اقیانوس هند با بزرگای گشتاوری ۸/۶ همراه با الگوی پس لرزه ها محاسبه شده است (Mahesh و همکاران، ۲۰۱۳).

تحلیل حساسیت تغییرات تنش کولمب نسبت به مدل شکست کولمب با مطالعه زمین لرزه ۲۰۰۸ ونچوان^۹ با بزرگای گشتاوری ۷/۹ انجام گرفته است (Wang و همکاران، ۲۰۱۴). تغییر تنش کولمب مربوط به زمین لرزه ۱۹ می سال ۲۰۱۱ سیمائو- کوتایای^{۱۰} ترکیه با بزرگای گشتاوری ۶ برآورد شده است (Görgün، ۲۰۱۴).

همبستگی مابین تنش کولمب انتشار یافته توسط زمین لرزه ۲۰۱۱ توهوکو- اوکی^{۱۱} و تغییر نرخ لرزه خیزی در کانتوی ژاپن بررسی شده است (Ishibe و همکاران، ۲۰۱۵). روند تغییرات تنش کولمب در اثر وقوع زمین لرزه در دوره ۱۴۰۰ ساله در شرق کالیفرنیا و غرب نوادا

اختصاص داشته و بازه های زمانی بلندتری را دربرمی گیرد. در هر دو دسته ارتباط مکانی مابین زمین لرزه ها بررسی می شود. دسته سوم با مدل سازی چرخه زمین لرزه به بررسی برهم کنش مابین زمین لرزه های رخ داده در طول چرخه می پردازد. در این دسته هم ارتباط مکانی و هم ارتباط زمانی مابین زمین لرزه ها مدنظر می باشد.

برهم کنش میان زمین لرزه اصلی و پس لرزه های ناشی از آن با استفاده از معیار تغییرات تنش کولمب در جنوب کالیفرنیا پس از زمین لرزه سال ۱۹۹۲ لندرز^۱ بررسی شده است (Simpson و Harris، ۱۹۹۲). همچنین King و همکاران (۱۹۹۴) بررسی کردند که چگونه رخداد یک زمین لرزه می تواند زمین لرزه های بعدی را در پی داشته باشد. آن ها با بررسی زمین لرزه سال ۱۹۹۲ لندرز با بزرگای گشتاوری ۷/۴ دریافتند که توزیع پس لرزه ها در مجاورت زمین لرزه اصلی می تواند توسط معیار تغییر تنش کولمب توجیه شود. پس لرزه های ناشی از زمین لرزه ارزینجان ترکیه با معیار تغییرات تنش کولمب مدل سازی شده (Nalbant و همکاران، ۱۹۹۶). همچنین می توان به کار Stein و همکاران در سال ۱۹۹۷ اشاره کرد. زمین لرزه هایی که باعث گسیختگی ۱۰۰۰ کیلومتر از گسل شمالی آناتولی در کشور ترکیه بین سال های ۱۹۳۹ تا ۱۹۹۲ شدند فرصتی را برای مطالعه رویدادهای بزرگ بعدی ایجاد کردند، و در سال ۱۹۹۹ زلزله های ایزمیت^۲ و دوزچه^۳ در مناطق مورد انتظار که تنش کولمب در آن افزایش یافته بود، اتفاق افتادند. همچنین روند تغییرات تنش کولمب در این تحقیق نشان داد که ۹ گسیختگی از ۱۰ گسیختگی در طول گسل شمال آناتولی در محل افزایش تنش کولمب ناشی از رخداد های پیشین اتفاق افتاده اند.

تحقیق انجام شده توسط Toda و همکارانش نیز در سال ۱۹۹۸ بر روی زمین لرزه کوبه در منطقه ای پر جمعیت در جنوب غرب ژاپن بود که بررسی کردند چگونه رخداد یک زمین لرزه، تنش را به گسل های اطراف منتقل کرده و احتمال رخداد زمین لرزه بعدی را افزایش می دهد. آن ها همچنین محل رخداد زمین لرزه های بزرگ بعدی و پس لرزه ها را توسط معیار شکست کولمب توضیح دادند. در تحقیق دیگری به آزاد سازی و تأخیر زمین لرزه ها با برهم کنش تنش گسل ها، در منطقه گسلی خیانشی در جنوب غربی چین پرداخته شده و مکان رخداد پس لرزه ها برآورد شده است (Zhang و همکاران، ۲۰۰۳). رهاسازی تنش کولمب زمین لرزه ها در طول گسل آتالانتی در قسمت مرکزی یونان برای دو رویداد بزرگتر از ۶ با الگوی تغییرات تنش مورد ارزیابی قرار گرفته است (Ganas و همکاران، ۲۰۰۶).

از مدل فوریه برای مدل سازی وابسته به زمان چرخه زمین لرزه در طول گسل سن آندریاس^۴ استفاده شده و تغییرات تنش کولمب در بازه

7. Christchurch
8. L'Aquila
9. Wenchuan
10. Simav-Kütahya
11. Tohoku-Oki

1. Landers
2. Izmit
3. Düzce
4. San Andreas
5. Hokkaido
6. Yushu

رودبار مورد مطالعه قرار گرفته است (Ansari و Sarkarinejad، ۲۰۱۴).

در ارتباط با منطقه مورد مطالعه تحقیق حاضر زارعی و همکاران (۱۳۹۶) اثر تغییرات تنش کولمب ناشی از زمین‌لرزه ۳۱ اوت ۱۹۶۸ دشت بیاض در چکانش^۱ رخدادهای بعد از آن یعنی زمین‌لرزه‌های ۱۹۷۶ و ندیک و ۱۹۷۹ کولی - بنیاد را بررسی کرده‌اند. همچنین مطالعه Zarei و همکاران (۲۰۱۹) ارتباط مکانی زمین‌لرزه‌های بزرگ در بازه زمانی ۱۹۳۶ تا ۱۹۷۹ را در منطقه لوت بررسی کرده و مناطق آماده برای رخدادهای آتی را تعیین کرده‌اند. همچنین در مطالعه دیگری (Marchandon و همکاران، ۲۰۲۱) تغییرات تنش کولمب در بازه ۱۹۳۶ تا ۱۹۹۷ علاوه بر دوره همالزهای برای دوره‌های پس‌الزهای و بین‌لرزه‌ای نیز برای این منطقه برآورد شده است. در تحقیق دیگری تأثیر تغییرات تنش کولمب زمین‌لرزه ۲۰ اردیبهشت ۱۳۷۶ قائن- بیرجند بر مدل‌های آماری وابسته به زمان در قسمتی از شرق ایران مورد بررسی قرار گرفته است (سرخوندی و همکاران، ۱۳۹۴).

به‌عنوان مطالعه موردی بخش شرقی منطقه برخورد مایل صفحه-های زمین‌ساختی عربستان- اوراسیا که تقریباً مطابق بر شرق ایران بوده و گسل‌های آبیز، دشت بیاض، محمدآباد، قائن، گناباد، طیس و فردوس را دربر می‌گیرد در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب این منطقه وجود اطلاعات نسبتاً مبسوط در مورد گسل‌های فعال و همچنین محل رخداد زمین‌لرزه‌های تاریخی در این منطقه است. منطقه شرق ایران، حداقل ۲۴ زمین‌لرزه با بزرگای بیش از ۵/۵ را طی ۵۰۰ سال گذشته تجربه کرده است. این رویدادها مدرکی برای رابطه برانگیختگی احتمالی مابین زمین‌لرزه‌ها را در این سیستم گسلی پیشنهاد می‌کند. هدف تحقیق حاضر این است که با توجه به زمین-لرزه‌های تاریخی از میان مناطق دارای گسل و بدون زمین‌لرزه تاریخی، مناطق آماده برای زمین‌لرزه‌های آتی را تعیین کند.

به‌منظور بررسی برهم‌کنش زمین‌لرزه‌های بزرگ و این‌که آیا زمین‌لرزه‌های مجاوری که در امتداد یک گسل رخ داده‌اند، از هم تأثیر پذیرفته‌اند یا نه، تغییرات تنش کولمب همالزهای زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی به‌ترتیب تاریخی و به‌صورت تجمعی محاسبه می‌شود. وقوع زمین‌لرزه توزیع تنش کولمب را در اطراف گسل تغییر می‌دهد. بیشترین حساسیت تغییرات تنش کولمب به‌میزان لغزش گسل می-باشد. با توجه به بزرگی دامنه لغزش در دوره همالزهای نسبت به دو دوره بین‌لرزه‌ای و پس‌الزهای قطعاً تغییرات تنش کولمب ناشی از لغزش همالزهای بیشتر از دوره پس‌الزهای و در دوره پس‌الزهای بیشتر از دوره بین‌لرزه‌ای خواهد بود.

بررسی صحیح‌تر تغییرات تنش کولمب در یک منطقه مستلزم حل صحیح‌تر مسئله معکوس در هر سه دوره و در نهایت مدل‌سازی چرخه

از ایالات متحده آمریکا بررسی شده و نشان داده شده است که توزیع مکانی زمین‌لرزه‌های بزرگ در این دوره زمانی تصادفی نیست و کمیت تغییرات تنش کولمب کنترل‌کننده دنباله زمین‌لرزه‌های بزرگ است و چندین گسل با توانایی ایجاد زمین‌لرزه با بزرگای گشتاوری بالای ۷ ممکن است نزدیک زمان گسیختگی (Verdecchia و Carena، ۲۰۱۶).

در تحقیق دیگری حساسیت تغییر تنش کولمب استاتیک در ارتباط با هندسه گسل مرجع و دامنه تنش منطقه‌ای با مطالعه موردی زمین‌لرزه سال ۲۰۱۶ پیدی جایا آچه^۱، با بزرگی گشتاوری ۶/۵ بررسی شده است (Kusumawati و همکاران، ۲۰۱۹). در تحقیقات دیگر الگوی تغییر تنش کولمب و توزیع پس‌لرزه‌های مرتبط با زمین‌لرزه نپال با بزرگی گشتاوری ۷/۸ مورد بررسی قرار گرفته است (Yang و همکاران، ۲۰۱۸؛ Zhou و همکاران، ۲۰۱۹).

تغییرات تنش کولمب ناشی از وقوع ۳۵ زمین‌لرزه تاریخی با بزرگای بیشتر از ۶/۵ در بازه زمانی حدود ۷۰۰ سال در سیستم گسلی شیانشوئی-شیانشوئی^۲ چین مورد بررسی قرار گرفته و گسل‌های صالاحا-موکسی^۳ و آنینگ^۴ به‌عنوان گسل‌های دارای تغییر تنش کولمب مثبت و دارای پتانسیل لرزه‌ای بالا تعیین شده‌اند (Bing و همکاران، ۲۰۱۶). ارتباط مکانی مابین سه زمین‌لرزه با بزرگای گشتاوری بیشتر از ۶ و با پس‌لرزه‌های مربوط به هر زمین‌لرزه اصلی با استفاده از روند تغییرات تنش کولمب در منطقه قفقاز مورد بررسی قرار گرفته است (Ahadov و Jin، ۲۰۱۹).

در تحقیق دیگری با توجه به در دسترس بودن مشاهدات ماهواره-ای از جابه‌جایی‌های سطحی نخست جهت بدست آوردن مشخصات هندسی و میزان لغزش‌ها مسئله معکوس برای سه زمین‌لرزه بزرگ در مرکز ایتالیا از آگوست تا اکتبر سال ۲۰۱۶ با ترکیب مشاهدات ماهواره-ای راداری و GPS حل شده و در ادامه ارزیابی کمی تغییرات تنش کولمب برای بررسی ارتباط مکانی سه زمین‌لرزه باهم و با پس‌لرزه‌های آن‌ها انجام گرفته و گسل‌های آماده برای وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ بعدی مشخص شده است (Xu و همکاران، ۲۰۲۰).

جعفری و آق‌آتابای (۱۳۹۱) پدیده برهم‌کنش مابین زوج زمین-لرزه‌های ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان و توزیع مکانی پس‌لرزه‌های ناشی از آن‌ها را بررسی کرده‌اند.

نوری و همکاران (۱۳۹۶) تغییرات نرخ لرزه‌خیزی و تنش کولمب مرتبط با زمین‌لرزه ۹ آوریل ۲۰۱۳ کاکي-شنبه ($M_w=6/3$) و توزیع مکانی پس‌لرزه‌های ناشی از آن را مطالعه کرده‌اند.

ملکی آسایش و حمزه‌لو (۱۳۹۴) نیز تغییرات تنش کولمب حاصل از زمین‌لرزه‌های ریگان و توزیع پس‌لرزه‌ها را بررسی کرده‌اند. تغییرات تنش کولمب و نرخ لرزه‌خیزی ناشی از زمین‌لرزه $M_w=7/3$ سال ۱۹۹۰

4. Anninghe
5. Triggering

1. Idie Jaya, Aceh
2. Xianshuihe-Xiaojiang
3. Salaha-Moxi

که بسیاری از مشاهدات میدانی را نیز توجیه می‌کند و نشان می‌دهد که می‌توان از معیار شکست کولمب برای تشریح مشاهدات میدانی استفاده کرد (King و همکاران، ۱۹۹۴). تغییر تنش کولمب با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_f = \tau_B - \mu' \sigma_B \quad (1)$$

که σ_f تغییر در تنش شکست بر روی گسل گیرنده در اثر لغزش روی گسل‌های چشمه است. گسل گیرنده کسلی است که تنش روی آن اعمال می‌شود و گسل چشمه کسلی است که زمین‌لرزه روی آن رخ داده است. τ_B تغییر تنش برشی روی گسل گیرنده، σ_B تغییر تنش نرمال روی گسل گیرنده و μ' ضریب اصطکاک مؤثر است. در محاسبات می‌توان تغییر تنش کولمب را بر روی گسل با هندسه معلوم یا با در نظر گرفتن جهت و میزان تنش زمین‌ساختی بر روی گسل‌های با هندسه بهینه محاسبه کرد (King و همکاران، ۱۹۹۴).

مطابق تحقیق انجام شده توسط King و همکاران (۱۹۹۴) تغییر مقدار ضریب اصطکاک بین ۰/۰ تا ۰/۷۵ که کلیه مقادیر ممکن آن را پوشش می‌دهد طرح توزیع تغییر تنش کولمب و همچنین جهت صفحات گسلی با هندسه بهینه را به مقدار کم تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین بیشترین حساسیت برآورد تغییر تنش کولمب به جهت تنش منطقه‌ای و بعد از آن مقدار ضریب اصطکاک بوده و حساسیتی به دامنه تنش منطقه‌ای ندارد. لذا در این تحقیق جهت تنش منطقه‌ای از تحقیق انجام شده توسط Zarifi و همکاران (۲۰۱۳) استخراج شده و برای ضریب اصطکاک از مقدار متوسط ۰/۴ استفاده گردید.

مدل به‌کار گرفته شده برای مدل‌سازی زمین‌لرزه، مدل تحلیلی Okada (۱۹۸۵) می‌باشد. در این مدل زمین به‌صورت نیم‌فضای کشسان همگن و ایزوتروپ فرض می‌شود. قطعاً فرض کردن زمین به‌صورت کروی و لایه‌بندی آن به‌صورت یک یا چند لایه کشسان روی یک یا چند لایه گرانروی کشسان و وارد کردن جابه‌جایی‌های مربوط به دوره بعد از زمین‌لرزه در محاسبات و همگن و ایزوتروپ فرض نکردن آن باعث بهبود نتایج محاسبه تغییر تنش کولمب و پیش‌یابی نزدیک‌تر به واقعیت خواهد گردید.

۳- محاسبات

۳-۱- پارامترهای توصیف کننده صفحات گسلی زمین‌لرزه‌های

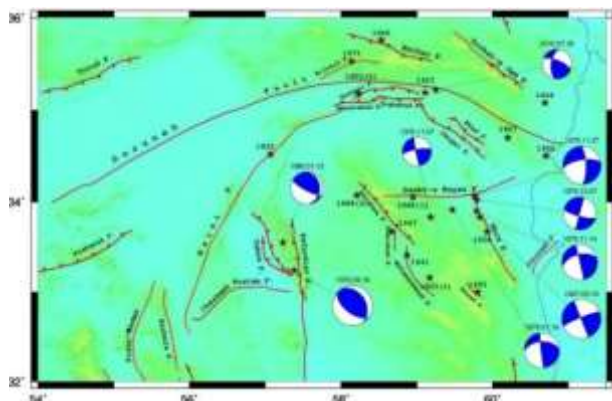
تاریخی و دستگاهی

به‌منظور آگاهی از پارامترهای توصیف کننده صفحات گسل زمین‌لرزه‌های تاریخی، ابتدا گسل‌های اصلی محتمل به رویدادهای تاریخی نسبت داده شد. سپس آزمون گسلش زمین‌لرزه تاریخی با اندازه‌گیری زاویه راستای گسل اصلی محتمل از روی نقشه گسل‌های فعال ایران به‌دست آمد (Hessami و همکاران، ۲۰۰۳). زاویه شیب زمین‌لرزه‌های تاریخی نیز براساس نوع گسلش گسل اصلی، با استفاده از تئوری گسلش اندرسون استنباط شد و زاویه ریک رویدادهای

زمین‌لرزه با لحاظ پارامتر زمان است. جهت مدل‌سازی چرخه زمین‌لرزه علاوه بر استفاده از مدل‌های ژئوفیزیکی نیازمند مشاهدات ژئودتیکی تغییر شکل سطحی زمین نظیر GPS و InSAR به‌عنوان قید برای حل مسئله معکوس می‌باشد که مدت زمان زیادی از اخذ داده توسط این سیستم‌ها نمی‌گذرد، لذا در مورد کل زمین‌لرزه‌های غیردستگاهی و حتی اکثر زمین‌لرزه‌های دستگاهی داده‌های ژئودتیکی غیر از زمین‌لرزه ۱۹۹۷ زیرکوه در دسترس نیست Sudhaus و Jonsson (۲۰۱۱). مدل لغزش متغیر نیز فقط برای زمین‌لرزه‌های ۱۹۷۸ طبس و ۱۹۹۷ زیرکوه در دسترس می‌باشد (Sudhaus و Jonsson، ۲۰۱۱؛ Hartzell و Mendoza، ۱۹۹۱). پس امکان حل مسئله معکوس و رسیدن به پارامترهای هندسی صحیح‌تر گسلش ناشی از زمین‌لرزه‌ها و بدنبال آن مدل‌سازی چرخه زمین‌لرزه با وارد کردن پارامتر زمان برای بازه زمانی ۵۰۰ ساله عملاً وجود ندارد. علاوه بر مدل لغزش محاسبه تغییرات تنش کولمب دارای عدم قطعیت‌های زیادی در ارتباط با صفحات گیرنده و همچنین انتخاب ضریب اصطکاک مؤثر می‌باشد لذا محاسبات مربوط به زمین‌لرزه‌های تاریخی که مکانیسم زلزله‌ها کاملاً مشخص نمی‌باشد و حتی اطلاعات کانون آن‌ها خیلی کم‌دقت است تقریبی بوده و خیلی قابل اعتماد نمی‌باشد. لذا در این تحقیق به‌جای حل مسئله معکوس با قید مشاهدات ژئودتیکی برای زمین‌لرزه‌های خاص از روابط تجربی Wells و Coppersmith (۱۹۹۴) مابین بزرگی زمین‌لرزه و پارامترهای هندسی گسیختگی برای کلیه زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی استفاده شده است. این روابط بسیار تقریبی بوده و خطای استفاده از نتایج این روابط در مدل‌سازی چرخه زمین‌لرزه و تغییرات تنش کولمب حاصل خیلی بیشتر از دامنه کم تغییرات تنش کولمب در دو دوره بین‌لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای خواهد شد و عملاً دامنه تغییرات تنش کولمب ناشی از این دو دوره در داخل دامنه تقریبات قرار خواهد گرفت. لذا در این تحقیق نقش زمان و چرخه زمین‌لرزه نادیده گرفته شده و تغییرات تنش کولمب فقط در دوره هم‌لرزه‌ای بین زمین‌لرزه‌های متوالی محاسبه شده و از تغییرات تنش کولمب در دوره بین‌لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای با توجه به دامنه کم تغییرات و نبود داده برای برآورد آن صرف‌نظر شده است. بدیهی است که نتایج برآورد تغییرات تنش کولمب در صورت وجود داده صحیح برای این دو دوره قطعاً می‌تواند متأثر از پارامتر زمان و چرخه زمین‌لرزه باشد.

۲- روش پژوهش

جهت مشخص کردن شرایطی که تحت آن شکستگی در سنگ اتفاق می‌افتد، معیارهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از معیارهایی که بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد معیار شکست کولمب است که در محاسبه آن هم تنش نرمال و هم تنش برشی اعمال‌شونده روی سطح گسلی نوپدید یا سطح گسل موجود که اصطکاک مانع از جنبش روی آن می‌شود، لحاظ می‌گردد. در کارهای آزمایشگاهی، سنگ‌های تحت فشار تقریباً از شرایط شکست کولمب تبعیت می‌کنند



شکل ۲- نقشه موقعیت زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی با بزرگای بیش از ۵/۵ مورد استفاده در محاسبه برهم‌کنش تغییرات تنش کولمب منطقه شرقی ایران. پارامترهای زمین‌لرزه‌ها در جدول (۱) آورده شده است. گسل‌ها برگرفته از حسامی و همکاران (۱۳۸۲). محل وقوع زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی با ستاره‌های سیاه رنگ مشخص شده است و سازوکارهای ژرفی برگرفته از CMT کره‌های آبی می‌باشند

۳-۲-۱- اطلاعات زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۵/۵

قبل از برآورد تغییرات تنش کولمب، بایستی مسئله معکوس حل شده و پارامترهای هندسی گسلش ناشی از زمین‌لرزه‌ها از جمله میزان لغزش، عمق، طول، عرض، زاویه ریک، راستا و شیب در دسترس باشد. پارامترهای گسیختگی و هندسی زمین‌لرزه‌هایی که جهت انجام مدل‌سازی در منطقه شرقی ایران مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در جدول (۱) آورده شده است.

۳-۲-۲- جهت تنش منطقه‌ای

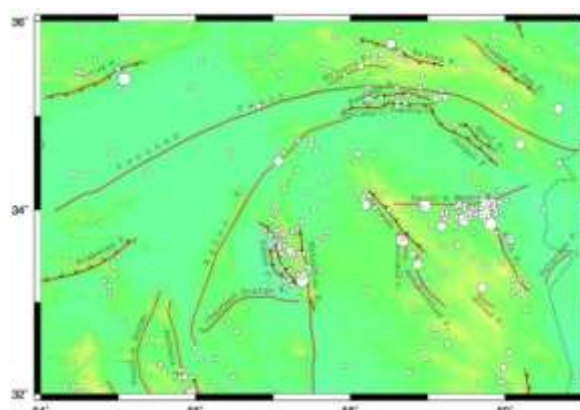
براساس تحقیقات انجام شده، بزرگی تنش منطقه‌ای تأثیری در نحوه توزیع تنش کولمب ندارد و تنها جهت تنش منطقه‌ای است که توجیه صفحه‌های آماده برای شکست را تغییر می‌دهد (King و همکاران، ۱۹۹۴). بنابراین در مدل‌سازی تغییرات تنش کولمب بر روی گسل‌ها با هندسه بهینه، تنها نیاز به تعریف جهت تنش منطقه‌ای در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بدین‌منظور مؤلفه‌های اصلی تنسور تنش منطقه‌ای از تحقیق صورت گرفته توسط Zarifi و همکاران (۲۰۱۳) در کل ایران استخراج شد. در این تحقیق از سازوکارهای ژرفی زمین‌لرزه‌های با عمق کمتر از ۴۰ کیلومتر در بازه زمانی سال‌های ۱۹۰۹ تا ۲۰۱۲، نرخ کرنش لرزه‌ای و بردارهای سرعت GPS جمع‌آوری شده مابین سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۱۱ برای برآورد مقدار و جهت نرخ‌های کرنش و تنش اصلی بیشینه در کل ایران استفاده شده است. خروجی جهت محورها اصلی تنش‌های فشاری و کششی حاصل از معکوس-سازی سازوکارهای ژرفی در جدول (۲) آورده شده است.

تاریخی نیز براساس نوع گسلش گسل اصلی، با استفاده از زوایای پیشنهادی Aki و Richards (۲۰۰۲) تعیین گردید.

پارامترهای صفحات گسلی زمین‌لرزه‌های دستگاهی تا قبل از سال ۱۹۷۶ میلادی، از پارامترهای مبنایی زمین‌لرزه‌های ایران تهیه شده توسط Mirzaei و همکاران (۱۹۹۷) و همچنین از پارامترهای گردآوری شده توسط Jackson و همکاران (۱۹۹۵) و از سال ۱۹۷۶ میلادی تاکنون از فهرست‌نامه CMT استخراج شد. جهت محاسبه پارامترهای گسیختگی یعنی طول، عرض و همچنین مقدار لغزش در اثر زمین‌لرزه، از روابط تجربی Wells و Coppersmith (۱۹۹۴) مابین بزرگی زمین‌لرزه و پارامترهای هندسی گسیختگی برای گسلش‌های امتداد لغز و شیب لغز استفاده شد.

۳-۲- منطقه شرق ایران

محدوده مورد مطالعه شرق منطقه برخورد مایل صفحه‌های زمین-ساختی عربستان-اوراسیا جهت انجام محاسبات تغییرات تنش کولمب، در طول جغرافیایی ۵۴ تا ۶۱ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ تا ۳۶ درجه شمالی می‌باشد. طبق بررسی‌های انجام شده، بیش از ۳۰۰ رویداد لرزه‌ای با بزرگای بیش از ۴/۵ در سده اخیر در این منطقه رخ داده است که نشان از لرزه‌خیزی بالای این منطقه می‌باشد (شکل (۱)). در این بخش اندرکنش تغییرات تنش کولمب ۲۴ زمین‌لرزه تاریخی و دستگاهی با بزرگای بیشتر از ۵/۵ در بخش شرقی ایران مورد بررسی قرار می‌گیرد. زمین‌لرزه‌های مورد استفاده در برآورد تغییرات تنش کولمب به‌همراه گسل‌های منتسب به آن‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه لرزه‌خیزی منطقه شرقی ایران. گسل‌ها برگرفته از حسامی و همکاران (۱۳۸۲). موقعیت زمین‌لرزه‌ها با بزرگای بیش از ۴/۵ در سده اخیر از فهرست‌نامه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با دایره سفید رنگ نشان داده شده

یا قبل از سال ۱۴۹۳ میلادی رخ داده‌اند، و یا بزرگای کمی داشتند که در منابع تاریخی ثبت نشده‌اند. و اگر این زمین‌لرزه‌ها دستگاهی بوده‌اند، بزرگای آن‌ها کمتر از ۵/۵ بوده که در انجام محاسبات وارد نشده است.

در اثر افزایش تنش زمین‌لرزه نخست ۱۹۰۳ بر روی گسل محمدآباد، قسمت شمالی این گسل در سال ۱۹۴۱ گسیخته شد (شکل ۳-خ). زمین‌لرزه ۱۹۴۱ نیز با ایجاد تنش بر روی گسل دوست‌آباد باعث گسیخته شدن این گسل و ایجاد زمین‌لرزه ۱۹۴۷ شد (شکل ۳-د). زمین‌لرزه بزرگ ۱۹۴۷ تنش را در قسمت انتهایی گسل دشت بیاض افزایش داد و سبب ایجاد زمین‌لرزه ویرانگری در اواخر اوت ۱۹۶۸ شد (شکل ۳-ز). چند روز بعد در سپتامبر ۱۹۶۸، زمین‌لرزه دیگری در غرب صفحه گسیخته‌گی حادثه اول و بر اثر تهییج این زمین‌لرزه در نزدیکی گسل فردوس روی داد (شکل ۳-ز).

براساس محاسبات انجام شده، صفحه گسیخته‌گی زمین‌لرزه ۱۹۷۶ در منطقه کاهش تنش زمین‌لرزه اوت ۱۹۶۸ قرار دارد، بنابراین وقوع زمین‌لرزه ۱۹۷۶ را نمی‌توان توسط حوادث گذشته توجیه کرد (شکل ۳-س). افزایش تنش در سمت شرق گسلش زمین‌لرزه نخست ۱۹۶۸، منجر به رخداد زمین‌لرزه نخست سال ۱۹۷۹ شد (شکل ۳-ص). زمین‌لرزه دوم ۱۹۷۹ در اثر افزایش تنش حوادث سیستم‌های گسلی دشت بیاض و آبیز، قسمت شمالی گسل آبیز را گسیخت (شکل ۳-ش).

وقوع زمین‌لرزه دوم ۱۹۷۹ بر روی گسل آبیز^۱ از سمت جنوب و وقوع زمین‌لرزه اول ۱۹۶۸ بر روی گسل دشت بیاض از سمت شرق، موجب افزایش تنش در قسمت غربی گسل دشت بیاض شد و به فاصله ۱۳ روز بعد از حادثه دوم ۱۹۷۹، زمین‌لرزه‌ای به بزرگی گشتاوری ۷/۱، قسمت شرقی گسل دشت بیاض را گسیخت (شکل ۳-ط). زمین‌لرزه چهارم ۱۹۷۹ در اثر تهییج زمین‌لرزه دوم ۱۹۷۹، قسمت شمالی گسل آبیز را گسیخت (شکل ۳-ظ).

زمین‌لرزه بزرگی در سال ۱۹۷۸ میلادی بر روی گسل طبس رخ داد که به دنبال آن زمین‌لرزه دیگری در سال ۱۹۸۰ میلادی در شمال صفحه گسیخته‌گی زمین‌لرزه ۱۹۷۸ روی داد (شکل ۳-ع). افزایش تنش ناشی از اندرکنش حوادث سیستم گسلی آبیز، منجر به شکست قسمت جنوبی گسل آبیز و ایجاد زمین‌لرزه بزرگ ۱۹۹۷ شد (شکل ۳-غ). تنش ایجاد شده توسط زمین‌لرزه ۱۹۲۳ بر روی گسل درونه باعث تهییج زمین‌لرزه ۲۰۱۰ شد (شکل ۳-ف).

شکل ۴-الف تغییرات تنش کولمب را برای گسل‌های معکوس با هندسه بهینه نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مناطق پرخطر و محتمل برای ایجاد زمین‌لرزه‌های بزرگ، مناطقی هستند که در محدوده افزایش تنش کولمب همالرزه زمین‌لرزه‌های گذشته، گسل فعالی هم‌جهت با جهات بهینه گسل‌های معکوس موجود باشد.

جدول ۲- جهات تنش منطقه‌ای در مناطق مختلف شرق ایران
مطابق تحقیق Zarifi و همکاران (۲۰۱۳) شماره سلول‌ها در شکل (۷)
نشان داده شده

شماره سلول	$\sigma_1^{(c)}$	$\sigma_2^{(c)}$	$\sigma_3^{(c)}$
ریک	آزیموت	ریک	آزیموت
۸/۶	۱۳۰/۸	۷۳/۳	-۱۰۸/۸
۶۴/۸	۱۴۲/۴	۲۵/۰	-۴۲/۲
۸/۶	۱۳۰/۸	۷۳/۳	-۱۰۸/۸

۳-۳- برآورد برهم‌کنش مکانیکی مابین زمین‌لرزه‌های بزرگای بیش از ۵/۵ در بخش شرق منطقه برخورد مایل صفحه-های زمین‌ساختی عربستان-اوراسیا

در این بخش برهم‌کنش تنش مابین سیستم‌های گسلی کپه‌داغ، باغان، شیروان و غلامان با استفاده از معیار شکست کولمب مورد مطالعه قرار گرفته است. در برآورد تغییرات تنش کولمب فرض شده است که پوسته شرقی ایران قبل از زمین‌لرزه تاریخی سال ۱۴۹۳ میلادی یعنی در سال شروع برآورد فاقد هر گونه تنش بوده و تمامی تنش‌های انباشته شده در آن در طول زمین‌لرزه‌های ماقبل تاریخی تخلیه شده است. بنابراین در سال ۱۴۹۳ میلادی پوسته عاری از هر گونه تنش مثبت و منفی می‌باشد.

شکل (۳) تغییرات تنش کولمب همالرزه تجمعی محاسبه شده بعد از هر زمین‌لرزه را با استفاده از مؤلفه‌های مرتبط با تنش یعنی توجیه گسل و جهت لغزش حادثه بعدی در منطقه شرقی ایران با استفاده از داده‌های جدول (۱) نشان می‌دهد. تاریخ آخرین رخداد در زیر هر شکل نوشته شده است. صفحه گسیخته‌گی زمین‌لرزه ۱۹۰۳ تأثیر چندانی از تنش ناشی از زمین‌لرزه ۱۴۹۳ نپذیرفته است (شکل ۳-الف). تغییرات تنش کولمب با افزایش فاصله به صفر میل می‌کنند. از طرف دیگر بخش مهمی از تغییرات تنش کولمب گذرا هستند و اثرات آن‌ها با گذر زمان از بین می‌رود و لذا نمی‌توان ادعا کرد که زمین‌لرزه ۱۴۹۳ بتواند روی زمین‌لرزه صده اخیر تأثیر زیادی داشته باشد چون امکان دارد که تأثیر تنش‌های تکتونیکی و تغییر تنش کولمب ناشی از گرانروی کشسان که در این تحقیق برآورد نشده در بازه زمانی زیاد خیلی بیشتر باشد. زمین‌لرزه دوم ۱۹۰۳ بدون هیچ تهییجی از حوادث پیشین، بر روی گسل کاشمر روی داد (شکل ۳-ب). زمین‌لرزه‌های دیگری نیز وجود دارند که حوادث گذشته وقوع آن‌ها را توجیه نکردند. این زمین‌لرزه‌ها عبارتند از: ۱۹۰۷ (شکل ۳-پ)، ۱۹۱۸ (شکل ۳-ت)، ۱۹۲۳ (شکل ۳-ث)، ۱۹۳۳ (شکل ۳-ج)، ۱۹۳۶ (شکل ۳-چ)، ۱۹۴۰ (شکل ۳-ح)، ۱۹۵۰ (شکل ۳-ذ)، ۱۹۷۱ (شکل ۳-ز) و ۱۹۷۸ (شکل ۳-ش). اگر هر حادثه‌ای توسط زمین‌لرزه‌های پیشین منطقه تهییج شده باشد، این زمین‌لرزه‌ها اگر تاریخی بوده‌اند

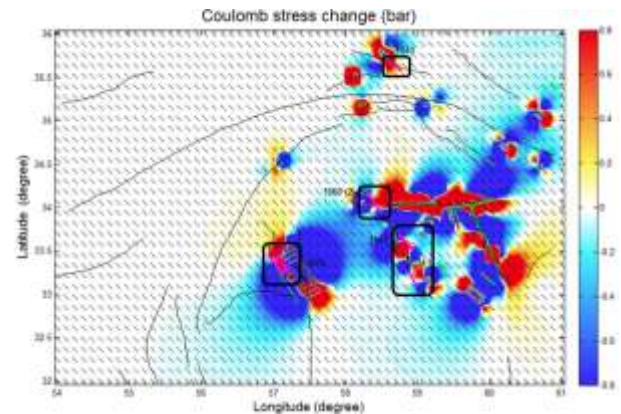
فعالی هم‌جهت با جهات بهینه گسل‌های امتداد لغز موجود باشد. گسل‌های موجود در منطقه که مستعد گسیختگی و ایجاد زمین‌لرزه می‌باشند و با رنگ صورتی نشان داده شده‌اند، عبارتند از:

- ۱- بخشی از گسل امتداد لغز چپ‌گرد درونه در شمال صفحه گسیختگی زمین‌لرزه دوم ۱۹۰۳،
- ۲- قسمت غربی گسل امتداد لغز چپ‌گرد دشت بیاض در غرب صفحه گسیختگی زمین‌لرزه سوم ۱۹۷۹،
- ۳- گسل امتداد لغز راست‌گرد دوست‌آباد در جنوب صفحه گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۴۷،
- ۴- قسمت انتهایی گسل امتداد لغز راست‌گرد آبیز در جنوب صفحه گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۹۷،
- ۵- ابتدای گسل امتداد لغز راست‌گرد نایبند در جنوب صفحه گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۷۸.

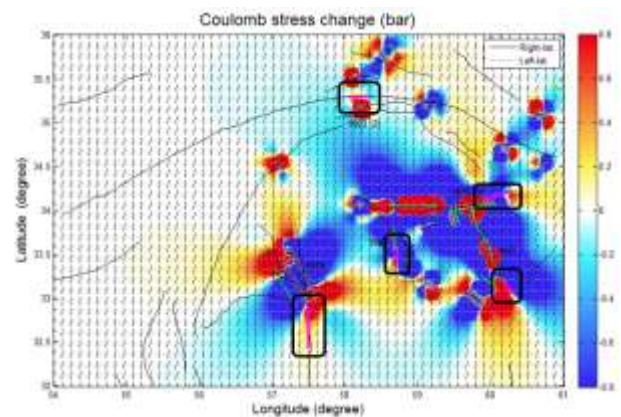
۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌منظور بررسی برهم‌کنش مکانیکی احتمالی زمین‌لرزه‌ها، از اطلاعات ۲۴ زمین‌لرزه تاریخی و دستگاهی با بزرگای بیشتر از ۵/۵ که از سال ۱۴۹۳ تا ۲۰۱۰ میلادی در بخش شرقی منطقه برخورد مایل صفحات زمین‌ساختی عربستان- اوراسیا رخ داده‌اند، جهت محاسبه برهم‌کنش تغییرات تنش کولمب تجمعی بر روی صفحات گسلی زمین‌لرزه‌های بعدی، استفاده شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها، ارتباط مکانی حدود ۵۰ درصد از رویدادها را که فاصله مکانی و زمانی کوتاهی با زمین‌لرزه‌های قبلی منطقه داشتند را به‌خوبی نشان داد. همچنین جهت تعیین مناطق پرخطر و گسل‌هایی که آماده گسیختگی و ایجاد زمین‌لرزه‌های بزرگ هستند، تغییرات تنش کولمب هم‌لرزه‌ای زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی بر روی صفحات گسلی شیب‌لغز و راست‌لغز با هندسه بهینه محاسبه گردید. و گسل‌هایی که آماده گسیختگی بودند مشخص گردید. این مناطق برای گسل‌های شیب‌لغز عبارتند از:

- ۱- قسمتی از گسل بالهر در جنوب غربی صفحه گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۴۰ میلادی،
 - ۲- قسمت شمالی گسل معکوس فردوس در غرب صفحه گسیختگی زمین‌لرزه دوم ۱۹۶۸ و قسمت جنوبی گسل معکوس فردوس در غرب صفحه گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۴۷،
 - ۳- قسمتی از گسل معکوس محمدآباد در جنوب صفحه گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۴۱،
 - ۴- قسمت‌هایی از گسل معکوس و فعال طبس در شرق صفحه گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۷۸.
- برای گسل‌های امتداد لغز نیز این مناطق عبارتند از:
- ۱- بخشی از گسل امتداد لغز چپ‌گرد درونه در شمال صفحه گسیختگی زمین‌لرزه دوم ۱۹۰۳،
 - ۲- قسمت غربی گسل امتداد لغز چپ‌گرد دشت بیاض در غرب صفحه



(الف)



(ب)

شکل ۴- تغییرات تنش کولمب محاسبه شده بر روی گسل‌های با هندسه بهینه: (الف) شیب‌لغز، (ب) امتداد لغز رنگ زمینه نشان‌دهنده تغییرات تنش کولمب برحسب بار می‌باشد. گسل‌های ایجاد کننده تغییرات تنش کولمب با رنگ سبز، گسل‌های فعال منطقه با رنگ مشکی و گسل‌هایی که آماده گسیختگی و ایجاد زمین‌لرزه می‌باشند با رنگ صورتی در داخل مستطیل سیاه رنگ نشان داده شده است

گسل‌های موجود در منطقه که مستعد گسیختگی و ایجاد زمین‌لرزه می‌باشند و با رنگ صورتی نشان داده شده‌اند، عبارتند از:

- ۱- قسمتی از گسل بالهر در جنوب غربی صفحه گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۴۰ میلادی،
- ۲- قسمت شمالی گسل معکوس فردوس در غرب صفحه گسیختگی زمین‌لرزه دوم ۱۹۶۸ و قسمت جنوبی گسل معکوس فردوس در غرب صفحه گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۴۷
- ۳- قسمتی از گسل معکوس محمدآباد در جنوب صفحه گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۴۱،
- ۴- قسمت‌هایی از گسل معکوس و فعال طبس در شرق صفحه گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۷۸.

شکل (۴-ب) تغییرات تنش کولمب را برای گسل‌های امتداد لغز با هندسه بهینه نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مناطق پرخطر و محتمل برای ایجاد زمین‌لرزه‌های بزرگ، مناطقی هستند که در محدوده افزایش تنش کولمب هم‌لرزه زمین‌لرزه‌های گذشته، گسل

گسیختگی زمین‌لرزه سوم ۱۹۷۹،

۳- گسل امتداد لغز راست‌گرد دوست‌آباد در جنوب صفحه گسیختگی

زمین‌لرزه ۱۹۴۷،

۴- قسمت انتهایی گسل امتداد لغز راست‌گرد آبیز در جنوب صفحه

گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۹۷،

۵- ابتدای گسل امتداد لغز راست‌گرد نایبند در جنوب صفحه

گسیختگی زمین‌لرزه ۱۹۷۸.

با توجه به مطالب مطرح شده اگر تغییر تنش کولمب با در نظر گرفتن مشخصات بین‌لرزه‌ای گسل‌ها برای دوره بین‌لرزه‌ای مدل‌سازی شده و با توجه به تغییرات تنش کولمب ناشی از حرکات هم‌لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای کالیبره گردد، می‌توان از مدل حاصل به عنوان ابزاری با دقت بالاتر برای هشداردهی قبل از رخداد زمین‌لرزه و یا پیش‌یابی زمین‌لرزه استفاده نمود. دقت مدل بستگی به دقت پارامترهای ورودی آن خواهد داشت. بزرگترین مشکل موجود در این زمینه عدم وجود اطلاعات دقیق در مورد گسل‌های فعال و یا وجود اطلاعات کم دقت در این زمینه می‌باشد.

در این تحقیق جهت ارتباط شدت زمین‌لرزه با پارامترهای منبع نظیر طول، عرض و میزان لغزش از روابط تجربی Wells و Coppersmith (۱۹۹۴) استفاده شد. که این روابط از طریق برازش به‌دست آمده و دقیقاً منطبق بر واقعیت نیستند. جهت رسیدن به روابط دقیق‌تر در این زمینه استفاده از روابط تجربی Nowroozi (۱۹۸۵) که برای زمین‌لرزه‌ها در محدوده فلات ایران به‌دست آورده، پیشنهاد می‌شود. همچنین میزان لغزش گسلی به‌دست آمده برای زمین‌لرزه در کل طول و عرض گسلش ثابت فرض شده است، در حالی که اصولاً دامنه لغزش از مرکز کانونی زمین‌لرزه به طرفین گسلش و به سمت بالا و پایین کاهش می‌یابد. برای زمین‌لرزه‌های که امروزه رخ می‌دهند حل مسئله معکوس با قید توأم مشاهدات ماهواره‌ای راداری و GPS که امروزه به سهولت در دسترس است و استفاده از نتایج حاصل در برآورد تغییرات تنش کولمب به بهبود و واقعی‌تر شدن نتایج حاصله کمک فراوانی خواهد کرد.

در این تحقیق تغییرات تنش کولمب ناشی از زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالای ۵/۵ محاسبه شده است، علت این انتخاب عدم قطعیت زیاد داده‌ها و بازه زمانی بزرگ در نظر گرفته شده برای آن‌ها می‌باشد که کلیه زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی ثبت شده را شامل می‌شود. از طرفی زمین‌لرزه‌های کوچک‌تر نیز در تغییرات تنش کولمب نقش داشته و باعث متحرک شدن منطقه افزایش یا کاهش تنش کولمب با زمان می‌شوند که در تعیین مکان رخداد زمین‌لرزه‌های بعدی مؤثر است. چون تغییر تنش کولمب برای لغزش‌های هم‌لرزه محاسبه شده و رفتار پوسته زمین برای لغزش هم‌لرزه به‌صورت کشسان می‌باشد و در این حالت اصل برهم‌نهی (Superposition) برقرار می‌باشد و تغییرات تنش کولمب ناشی از هر زمین‌لرزه به‌صورت جبری باهم جمع می‌شوند پس زمین‌لرزه‌های کوچکی که مناطق تغییر تنش کولمب

مثبت و منفی آن‌ها به گسل‌های اطراف نمی‌رسد می‌توانند در اثر تجمع تغییر تنش کولمب در آینده بر گسل‌های اطراف تأثیرگذار باشند، لذا پیشنهاد می‌شود برای پیش‌یابی مکان زمین‌لرزه‌های بعدی، جهت افزایش صحت برآورد محدوده بزرگای کمتری برای زمین‌لرزه‌ها در نظر گرفته شده و علاوه بر زمین‌لرزه‌های اصلی و پس‌لرزه‌های بزرگ بعد از آن، پس‌لرزه‌های کوچکتر نیز وارد محاسبات گردد.

اعتبار مطالعه لرزه‌خیزی تا حدود زیادی به دقت مکان‌یابی زمین‌لرزه‌های ثبت شده، به عنوان اطلاعات پایه وابسته است. از آنجا که مختصات جغرافیایی زمین‌لرزه‌های دستگاهی که در کاتالوگ‌های مختلف ثبت شده با یکدیگر متفاوت می‌باشند، بنابراین برای به‌دست آوردن محل دقیق رخداد زمین‌لرزه‌ها، ایجاد شبکه‌های لرزه‌نگاری با تراکم بالا در مناطقی که پتانسیل لرزه‌ای بالایی دارند، توصیه می‌شود. تغییر در مقدار ضریب اصطکاک، نحوه توزیع تنش کولمب را تا حدی تغییر داده و همچنین تاحدودی منجر به تغییر جهت صفحات گسلی با هندسه بهینه می‌شود، توصیه می‌گردد مقدار ضریب اصطکاک با توجه به مطالعات زمین‌شناسی منطقه‌ای تعیین شود.

در این تحقیق تغییرات تنش کولمب فقط در دوره هم‌لرزه‌ای برآورد شد، با توجه به لغزش گسل در هر سه دوره هم‌لرزه‌ای، بین-لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای، تغییرات تنش کولمب در دو دوره بین‌لرزه‌ای و پس‌لرزه‌ای نیز اجتناب‌ناپذیر است. این موضوع باعث تغییرات تنش کولمب با زمان خواهد شد. تغییرات زمانی تنش، می‌تواند گسل‌های اطراف را حتی پس از مدت زمان زیاد به نقطه شکست برساند (Smith و Sandwell, ۲۰۰۳) لذا استفاده از اصل تناظر (Segall, ۲۰۱۰) و وارد کردن پارامتر زمان با انجام تبدیل لاپلاس معکوس روی روابط تحلیلی Okada (۱۹۸۵) جهت مدل‌سازی چرخه زمین‌لرزه که تحت عنوان مدل فوریه مطرح است (Smith و Sandwell, ۲۰۰۶) و برآورد تغییرات تنش کولمب در طول چرخه برای هر سیستم گسلی پیشنهاد می‌شود.

تحقیق حاضر فقط برای یک حالت از اطلاعات گسلی اجرا شده است. با توجه به عدم قطعیت در جواب‌های حاصل از حل مسئله معکوس انجام این تحقیق برای حالت‌های مختلف حاصل از حل مسئله معکوس با انواع روش‌های متداول و مقایسه نتایج حاصله توصیه می‌شود.

۵- مراجع

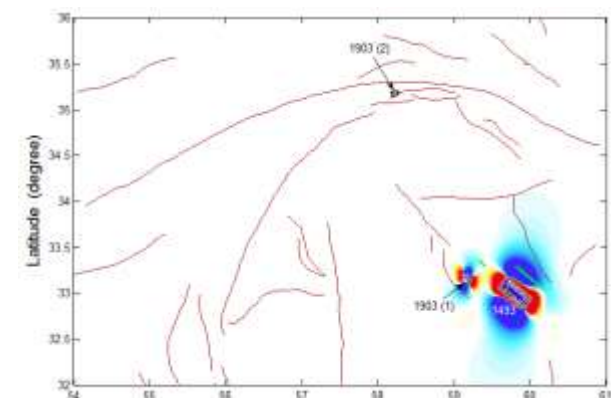
جعفری حاجتی ف، آق آتابای م، "بررسی پدیده برهم‌کنش بین زوج زمین‌لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر- ورزقان و توزیع مکانی پس‌لرزه-ها"، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۳۹۲، ۷ (۳)، ۱۳-۲۴.
حسامی خ، جمالی ف، طیبی ه، "نقشه گسل‌های فعال ایران"، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۲.
زارعی س، خطیب م، زارع م، موسوی س م، "اثر تغییرات تنش کولمب ناشی از زمین‌لرزه ۳۱ اوت ۱۹۶۸ دشت بیاض در چکانش

- southern California faults after the 1992 Landers earthquake", 1992, *Nature* 360, 251-254. <https://doi.org/10.1038/360251a0>.
- Hartzell S, Mendoza C, "Application of an iterative least-squares waveform inversion of strong-motion and teleseismic records to the 1978 Tabas, Iran, earthquake", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1991, 81 (2), 305-331. <https://doi.org/10.1785/BSSA0810020305>.
- Hessami K, Jamali F, Tabassi H, "Major active faults of Iran", IIEES, Tehran, 2003.
- Ishibe T, Satake K, Sakai S, Shimazaki K, Tsuruoka H, Yokota Y, Nakagawa S, Hirata N, "Correlation between Coulomb stress imparted by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and seismicity rate change in Kanto", Japan, *Geophysical Journal International*, 2015, 201, 112-134. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv001>.
- Jackson J, Priestley K, Allen M, Berberian M, "Active tectonics of the South Caspian Basin", *Geophysical Journal International*, 2002, 148 (2), 214-245. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01588.x>.
- Jackson JA, Haines AJ, Holt WE, "The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran", *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100, 15205-15209, <https://doi.org/10.1029/95JB01294>.
- King GCP, Stein RS, Lin J, "Static Stress Changes and the Triggering of earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84 (3), 935-953, <https://doi.org/10.1785/BSSA0840030935>.
- Kusumawati D, Sahara DP, Nugraha AD, Puspito NT, "Sensitivity of static Coulomb stress change in relation to source fault geometry and regional stress magnitude: case study of the 2016 Pidie Jaya", Aceh earthquake (Mw=6.5), Indonesia, *Journal of Seismology*, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09878-3>.
- Mahesh N, Shrivastava and Reddy CD, "The Mw 8.6 Indian Ocean Earthquake on 11 April 2012: Coseismic Displacement, Coulomb Stress Change and Aftershocks Pattern", *Journal of Geological Society of India*, 2013, 81, 813-820. <https://doi.org/10.1007/s12594-013-0106-7>.
- Marchandon M, Vergnolle M, Cavalié O, "Fault interactions in a complex fault system: insight from the 1936-1997 NE Lut earthquake sequence", *Geophysical Journal International*, 2021, 224 (2), 1157-1173. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa451>.
- Mirzaei N, Gao M, Chen YT, "Evaluation of uncertainty of earthquake parameters for the purpose of seismic zoning of Iran", *Earthquake Research in China*, 1997, 11, 197-212.
- Nalbant SS, Baraka AA, Alptekin O, "Failure Stress Change Caused by the 1992 Erzincan Earthquake (Ms=6.8)", *Geophysical research letters*, 1996, 23 (13), 1561-1564. <https://doi.org/10.1029/96GL01323>.
- Nowroozi AA, "Empirical relations between magnitudes and fault parameters for earthquakes in Iran", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75 (5), 1327-1338. <https://doi.org/10.1785/BSSA0750051327>.
- Okada Y, "Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75, 4, 1135-1154. <https://doi.org/10.1785/BSSA0750041135>.
- Sarkarinejad K, Ansari S, "The Coulomb Stress Changes and رخدادهای آتی"، فصلنامه علمی- پژوهشی علوم و مهندسی زلزله، ۱۳۹۶، ۴ (۳)، ۱۷-۳۲.
- سرخوندی س، زعفرانی ح، قلندرزاده ع، "بررسی تأثیر تغییرات تنش کولمب بر مدل های زمان وابسته در شرق ایران"، فصلنامه علمی- پژوهشی علوم و مهندسی زلزله، ۱۳۹۴، ۲ (۴)، ۱-۱۰.
- نوری ب، هاشمی س ن، ملکی آسایش ب، "مطالعه تغییرات نرخ لرزه- خیزی و تنش کولمب مرتبط با زمین لرزه ۹ آوریل ۲۰۱۳ کاکي- سنبه (Mw=۶/۳) و توزیع مکانی پس لرزه ها"، فیزیک زمین و فضا، ۱۳۹۶، ۴۳ (۲)، ۳۳۹-۳۵۳. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2017.61670>
- ملکی آسایش ب، حمزه لوح، "تغییرات تنش کولمب حاصل از زمین- لرزه های ریگان و توزیع پس لرزه ها"، فصلنامه علمی- پژوهشی علوم و مهندسی زلزله، ۱۳۹۴، ۲ (۳)، ۱-۱۰.
- Ahadov B, Jin S, "Effects of Coulomb stress change on Mw ≥ 6 earthquakes in the Caucasus", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2019, 297, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.106326>.
- Aki K, Richards PG, "Quantitative Seismology", University Science Books, ISBN: 0935702962, 700 pp, 2002.
- Ali ST, Freed AM, Calais E, Manaker DM, McCann WR, "Coulomb stress evolution in northeastern Caribbean over the past 250 years due to coseismic, postseismic and interseismic deformation", *Geophysical Journal International*, 2008, 174, 904-918. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03634.x>.
- Ambraseys N, Melville C, "A History of Persian Earthquakes. Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- Berberian M, "Natural hazards and the first earthquake catalogue of Iran", 1, Historical hazards in Iran prior to 1900, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), 1994, 603 pp.
- Bing Y, Shinji T, Aiming L, "Coulomb Stress evolution history as implication on the pattern of strong earthquakes along the xianshuihe-xiaojiang fault system", *China, Journal of Earth Science*, 2016, 29, 2, 427-440. <https://doi.org/10.1007/s12583-018-0840-2>.
- Gahalaut VK, "Coulomb stress change due to 2005 Kashmir earthquake and implications for future seismic hazards", *Journal of Seismology*, 2009, 13 (3), 379-386. <https://doi.org/10.1007/s10950-009-9169-8>.
- Ganas A, Sokos E, Agalos A, Leontakianakos G, Pavlides S, "Coulomb stress triggering of Earthquakes along the Atalanti Fault, central Greece: Two April 1894 M6+ events and stress change patterns", *Tectonophysics* 2006, 420, 357-369. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.03.028>.
- Ghimire S, Katsumata K, Kasahara M, "Spatio-temporal evolution of Coulomb stress in the Pacific slab inverted from the seismicity rate change and its tectonic interpretation in Hokkaido, Northern Japan", *Tectonophysics*, 2008, 455, 25-42. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.04.017>.
- Görgün E, "Source characteristics and Coulomb stress change of the 19 May 2011 Mw 6.0 Simav-Kütahya earthquake", 2014, Turkey, *Journal of Asian Earth Sciences*, 87, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.02.016>.
- Harris RA, Simpson RW, "Changes in static stress on

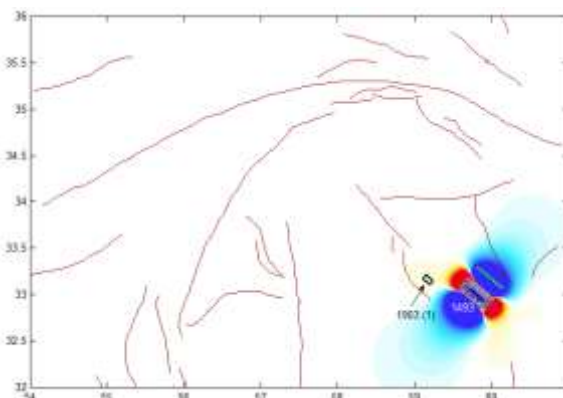
- stress change", *Geophysical Journal International*, 2020, 221 (1), 451-466.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggaa036>.
- Yang Y, Chen Q, Xu Q, Liu G, Hu JC, "Source model and Coulomb stress change of the 2015 Mw 7.8 Gorkha earthquake determined from improved inversion of geodetic surface deformation observations", *Journal of Geodesy*, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1164-9>.
- Yamaji A, "The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data", *Journal of Structural Geology*, 2000, 22, 7, 441-452. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(99\)00163-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00163-7).
- Yamaji A, Sato K, "Distances for the solutions of stress tensor inversion in relation to misfit angles that accompany the solutions", *Geophysical Journal International*, 2006, 167, 2, 933-942. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03188.x>.
- Yousefi-Bavil A, Moayyed M, "Paleo and modern stress regimes of central North Tabriz Fault", *Eastern Azerbaijan Province, NW Iran*, *Journal of Earth Science*, 2015, 26, 3, 361-372. <https://doi.org/10.1007/s12583-015-0549-4>.
- Zarei S, Khatib MM, Zare M, Mousavi SM, "Evaluation of seismicity triggering: insights from the coulomb static stress changes after the 30 August 1968 Dasht-e-Bayaz Earthquake (Mw=7.1), Eastern Iran", *ISSN 0016-8521, Geotectonics*, 2019, 53, 5, 601-616. <https://doi.org/10.1134/S0016852119050078>.
- Zarifi Z, Nilfouroushan F, Raeesi M, "Crustal stress map of iran: insight from seismic and geodetic computations", 2013. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0711-9>.
- Zhan Z, Jin B, Wei S, Graves RW, "Coulomb stress change sensitivity due to variability in mainshock source models and receiving fault parameters: a case study of the 2010-2011 Christchurch, New Zealand, earthquakes", *Seismological Research Letters*, 2011, 82 (6), 800-814. <https://doi.org/10.1785/gssrl.82.6.800>.
- Zhang QW, Zhang PZ, Wang YP, Ellis MA, "Earthquake triggering and delaying caused by fault interaction on Xianshuihe fault belt, southwestern China", *Acta Seismologica Sinica*, 2003, 16 (2), 156-165. <https://doi.org/10.1007/s11589-003-0018-5>.
- Zhou Z, Kusky TM, Tang CC, "Coulomb stress change pattern and aftershock distributions associated with a blind low-angle megathrust fault, Nepalese Himalaya", *Tectonophysics*, 2019, 767, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228161>.
- Seismicity Rate due to the 1990 Mw 7.3 Rudbar Earthquake", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 104, 6, 1-10. <https://doi.org/10.1785/0120130314>.
- Segall P, "Earthquake and volcano deformation", Princeton University press, Stanford University Press, ISBN: 9780691133027, 458, 2010.
- Serpelloni E, Anderlini L, Belardinelli ME, "Fault geometry, coseismic-slip distribution and Coulomb stress change associated with the 2009 April 6, Mw 6.3, L'Aquila earthquake from inversion of GPS displacements", *Geophysical Journal International*, 2012, 188, 473-489. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05279.x>.
- Shan B, Xiong Xiong X, Zheng Y, Wei S, Wen Y, Jin B, Ge C, "The co-seismic Coulomb stress change and expected seismicity rate caused by 14 April 2010 Ms=7.1 Yushu, China, earthquake", *Tectonophysics*, 2011, 510, 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.08.003>.
- Smith B, Sandwell D, "Coulomb stress accumulation along the San Andreas Fault system", *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108, B6, 2296. <https://doi.org/10.1029/2002JB002136>.
- Smith BR, Sandwell DT, "A model of the earthquake cycle along the San Andreas Fault System for the past 1000 years", *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, B01405. <https://doi.org/10.1029/2005JB003703>.
- Stein RS, Barka AA, Dieterich JH, "Progressive failure on the north Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering", *Geophysical Journal International*, 1997, 128, 594-604. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb05321.x>.
- Sudhaus H, Jonsson S, "Source model for the 1997 Zirkuh earthquake (MW = 7.2) in Iran derived from JERS and ERS InSAR observations", *Geophysical Journal International*, 2011, 185, 676-692. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04973.x>.
- Toda SRS, Stein K, Richards-Dringer S, Bozkurt, "Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer", *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, B05S16. <https://doi.org/10.1029/2004JB003415>.
- Vavrycuk V, "Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms", *Geophysical Journal International*, 2014, 199, 69-77. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu224>.
- Verdecchia A, Carena S, "Coulomb stress evolution in a diffuse plate boundary: 1400 years of earthquakes in eastern California and western Nevada, USA", *Tectonics*, 2016, 35, 8, 1793-1811. <https://doi.org/10.1002/2015TC004091>.
- Wang J, Xu C, Freymueller JT, Li Z, Shen W, "Sensitivity of Coulomb stress change to the parameters of the Coulomb failure model: A case study using the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake", *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 119. <https://doi.org/10.1002/2012JB009860>.
- Wells DL, Coppersmith KJ, "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84, 974-1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>.
- Xu Q, Chen Q, Zhao J, Liu X, Yang Y, Zhang Y, Liu G, "Sequential modeling of the 2016 Central Italy earthquake cluster using multi-source satellite observations and quantitative assessment of Coulomb

جدول ۱- پارامترهای گسیختگی زمین لرزه‌هایی که برای مدل‌سازی تغییرات تنش کولمب در منطقه شرق ایران مورد استفاده قرار گرفته‌اند. موقعیت جغرافیایی زمین لرزه‌های تاریخی تا سال ۱۸۹۶ برگرفته از Ambraseys و Melville (۱۹۸۲) می‌باشد. طول و عرض گسل و همچنین لغزش همالرزهای آن با استفاده از قوانین تجربی Wells و Coppersmith (۱۹۹۴) محاسبه شده است. زوایای راستا، شیب و ریک به‌جز مواردی که رفرنس داده شده، به ترتیب براساس شواهد زمین‌شناسی منطقه، سازوکار گسل‌های منطقه برمبنای تئوری گسلش اندرسون و با توجه به نوع گسل‌های منطقه براساس زوایای پیشنهادی (Jackson و همکاران، ۱۹۹۵)) انتخاب شده است. موارد رفرنس داده شده عبارتند از: (۱) مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC)، (۲) پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIIES)، (۳) فهرست‌نامه CMT هاروارد، (۴) Jackson و همکاران، (۱۹۹۵)، (۵) Mirzaei و همکاران (۱۹۹۷)، (۶) Ambraseys و Melville (۱۹۸۲)، (۷) Berberian و همکاران (۱۹۹۹)، (۸) Walker و همکاران، (۲۰۰۴)

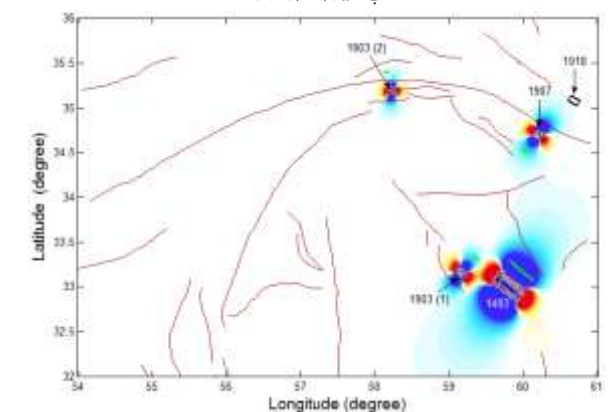
ردیف	تاریخ رویداد	زمان (UTC)	طول (°)	عرض (°)	M	M_w	M_s	m_b	امتداد (°)	شیب (°)	ریک (°)	عمق (km)	طول گسل (km)	عرض گسل (km)	لغزش (m)
۱	۱۴۹۳/۰۱/۱۰		۵۹/۸ [°]	۳۳/۰ [°]	۷/۰ [°]				۱۳۰	۳۰	۹۰	۱۵	۴۸/۳۷	۲۲/۳۲	۰/۶۶
۲	۱۹۰۳/۰۳/۲۲	۱۴:۳۵:۰۰	۵۹/۱۷ [°]	۳۳/۱۶ [°]			۶/۲ [°]		۱۳۵	۳۰	۹۰	۱۵	۱۴/۰۵	۸/۶۸	۰/۵۹
۳	۱۹۰۳/۰۹/۲۵	۱:۲۰:۰۰	۵۸/۲۳ [°]	۳۵/۱۸ [°]			۵/۹ [°]		۷۶	۳۰	۹۰	۱۵	۸/۸۴	۶/۰۹	۰/۳۰
۴	۱۹۰۷/۰۳/۲۹	۲۰:۵۷:۰۰	۶۰/۲۰ [°]	۳۴/۷۰ [°]			۶/۲ [°]		۳۱۰	۳۰	۹۰	۱۵	۱۴/۰۵	۸/۶۸	۰/۵۹
۵	۱۹۱۸/۰۳/۲۴	۲۳:۱۴:۰۰	۶۰/۶۹ [°]	۳۵/۰۸ [°]			۶/۳ [°]		۱۲۰	۳۰	۹۰	۱۵	۱۶/۴۰	۹/۷۷	۰/۵۴
۶	۱۹۲۳/۰۵/۲۵	۲۲:۲۱:۰۰	۵۹/۱۱ [°]	۳۵/۱۹ [°]			۵/۸ [°]		۱۰۳	۳۰	۹۰	۱۵	۷/۵۷	۵/۴۱	۰/۳۱
۷	۱۹۳۴/۱۰/۰۵	۱۳:۲۹:۰۰	۵۷/۰۷ [°]	۳۴/۵۲ [°]			۶/۰ [°]		۲۱۰	۷۵	۱۵۰	۱۵	۱۰/۳۱	۶/۸۵	۰/۳۰
۸	۱۹۳۶/۰۶/۳۰	۱۹:۲۶:۰۰	۵۹/۹۳ [°]	۳۳/۶۷ [°]			۶/۰ [°]		۱۶۵	۸۹ [°]	-۱۶۶ [°]	۱۵	۱۳/۲۱	۷/۰۷	۰/۳۱
۹	۱۹۴۰/۰۵/۰۴	۲۱:۰۱:۰۰	۵۸/۵۳ [°]	۳۵/۷۶ [°]			۶/۴ [°]		۱۴۰ [°]	۴۵ [°]	۹۰ [°]	۱۵	۱۹/۱۴	۱۰/۹۹	۰/۵۱
۱۰	۱۹۴۱/۰۲/۱۶	۱۶:۳۹:۰۰	۵۸/۸۷ [°]	۳۳/۴۱ [°]			۶/۱ [°]		۵ [°]	۸۵	۱۷۵	۱۵	۱۵/۴۱	۷/۷۳	۰/۳۱
۱۱	۱۹۴۷/۰۹/۲۳	۱۲:۲۸:۰۰	۵۸/۶۷ [°]	۳۳/۶۷ [°]			۶/۸ [°]		۱۷۵ [°]	۸۵	۱۷۵	۱۵	۴۵/۴۷	۱۴/۴۰	۰/۶۴
۱۲	۱۹۵۰/۰۹/۲۴	۲۲:۵۶:۳۸	۶۰/۷ [°]	۳۴/۵ [°]			۵/۹۲		۳۳۰	۳۰	۹۰	۱۵	۸/۸۴	۶/۰۹	۰/۴۱
۱۳	۱۹۶۸/۰۸/۳۱	۱۰:۴۷:۳۹	۵۸/۹۵ [°]	۳۴/۰۵ [°]		۷/۱ [°]			۲۷۰	۸۴ [°]	۵ [°]	۱۵	۷۲/۲۹	۱۸/۸۰	۱/۰
۱۴	۱۹۶۸/۰۹/۰۱	۷:۲۷:۳۱	۵۸/۲۱ [°]	۳۴/۰۷ [°]		۶/۲ [°]			۱۱۵ [°]	۵۴ [°]	۸۵ [°]	۱۵	۱۴/۰۵	۸/۶۸	۰/۵۹
۱۵	۱۹۷۱/۰۵/۲۶	۲:۴۱:۴۶	۵۸/۱۴ [°]	۳۵/۵۳ [°]		۵/۶ [°]			۵۷ [°]	۴۲ [°]	۲۳ [°]	۱۵	۵/۵۶	۴/۲۷	۰/۱۹
۱۶	۱۹۷۶/۱۱/۰۷	۴:۰۰:۵۲	۵۹/۱۸ [°]	۳۳/۸۳ [°]		۶/۰ [°]			۸۴ [°]	۷۹ [°]	۱۲ [°]	۱۵	۱۳/۲۱	۷/۰۷	۰/۴۸
۱۷	۱۹۷۸/۰۹/۱۶	۱۵:۳۵:۵۴	۵۷/۳۸ [°]	۳۳/۲۴ [°]		۷/۳ [°]	۶/۵ [°]		۳۲۸ [°]	۳۳ [°]	۱۰۷ [°]	۱۵	۹۸/۴۷	۲۲/۴۶	۱/۰۳
۱۸	۱۹۷۹/۰۱/۱۶	۹:۵۰:۰۸	۵۹/۴۷ [°]	۳۳/۹۱ [°]		۶/۵ [°]			۱۶۳ [°]	۶۶ [°]	۱۱۵ [°]	۱۵	۲۲/۳۴	۱۲/۳۷	۰/۷۸
۱۹	۱۹۷۹/۱۱/۱۴	۲:۲۱:۳۰	۵۹/۷۹	۳۳/۹۰		۶/۶ [°]			۱۶۰ [°]	۸۹ [°]	-۱۷۷ [°]	۱۵	۳۳/۳۸	۱۲/۰۵	۰/۷۰
۲۰	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	۱۷:۱۰:۳۴	۵۹/۷۶ [°]	۳۴/۰۶ [°]		۷/۱ [°]			۲۶۱ [°]	۸۳ [°]	۸ [°]	۱۵	۷۲/۲۹	۱۸/۸۰	۱/۰۲
۲۱	۱۹۷۹/۱۲/۰۷	۹:۲۳:۵۹	۵۹/۷۹	۳۴/۰۲		۶/۱ [°]			۱۹۵ [°]	۸۹ [°]	-۱۶۶ [°]	۱۵	۱۵/۴۱	۷/۷۳	۰/۳۱
۲۲	۱۹۸۰/۰۱/۱۲	۱۵:۴۱:۴۰	۵۷/۲۳ [°]	۳۳/۵۵ [°]		۶/۰ [°]	۵/۹ [°]	۵/۴ [°]	۳۵۶ [°]	۲۳ [°]	۱۴۵ [°]	۱۵	۱۰/۳۱	۶/۸۵	۰/۳۸
۲۳	۱۹۹۷/۰۵/۱۰	۰۷:۵۷:۳۲	۵۹/۸۳	۳۳/۸۳		۷/۳ [°]	۶/۴ [°]		۱۵۵	۸۵	-۱۷۳ [°]	۱۵	۸۴/۳۷	۲۰/۵۵	۱/۱۷
۲۴	۲۰۱۰/۰۷/۳۰	۱۳:۵۰:۱۲	۵۹/۲۵ [°]	۳۵/۲۲ [°]		۵/۷ [°]			۲۹۳ [°]	۷۰ [°]	۳۶ [°]	۷،۱	۶/۴۹	۴/۸۱	۰/۳۳



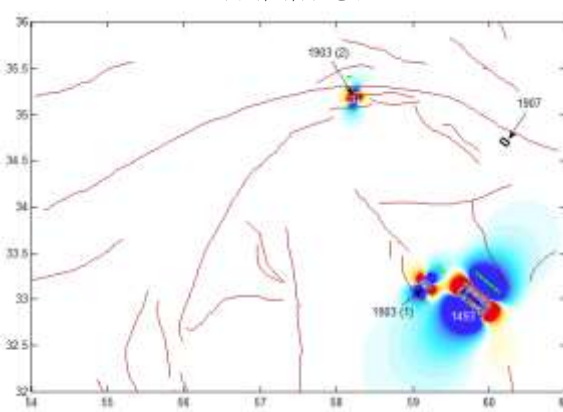
ب- ۱۹۰۳/۰۹/۲۵



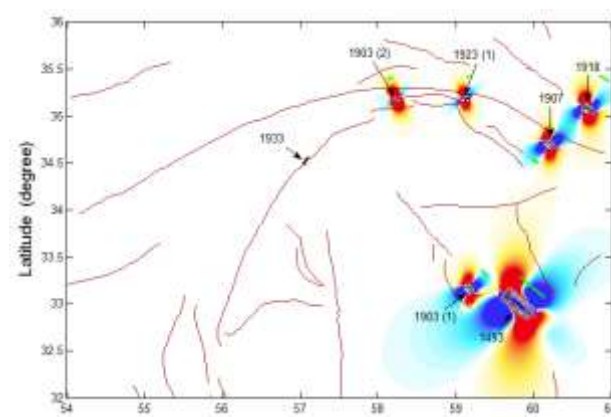
الف- ۱۹۰۳/۰۳/۲۲



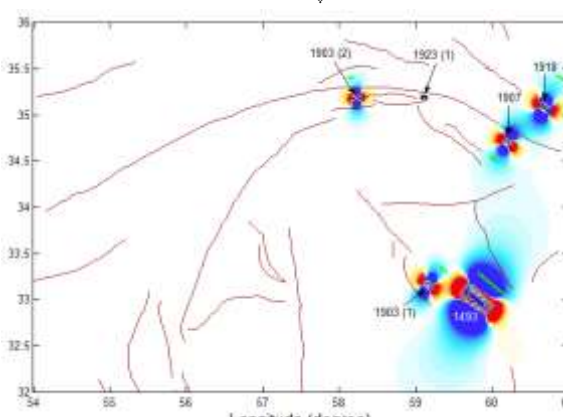
ت- ۱۹۱۸



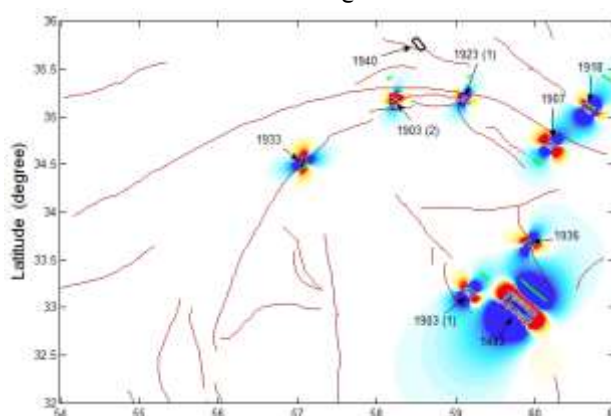
پ- ۱۹۰۷



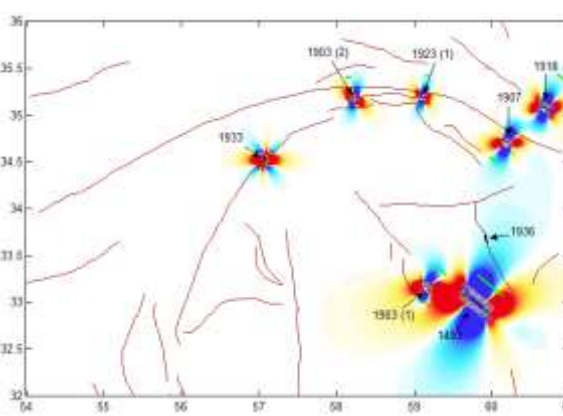
ج- ۱۹۳۳



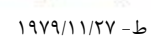
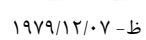
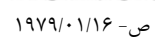
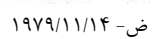
ث- ۱۹۲۳/۰۵/۲۵

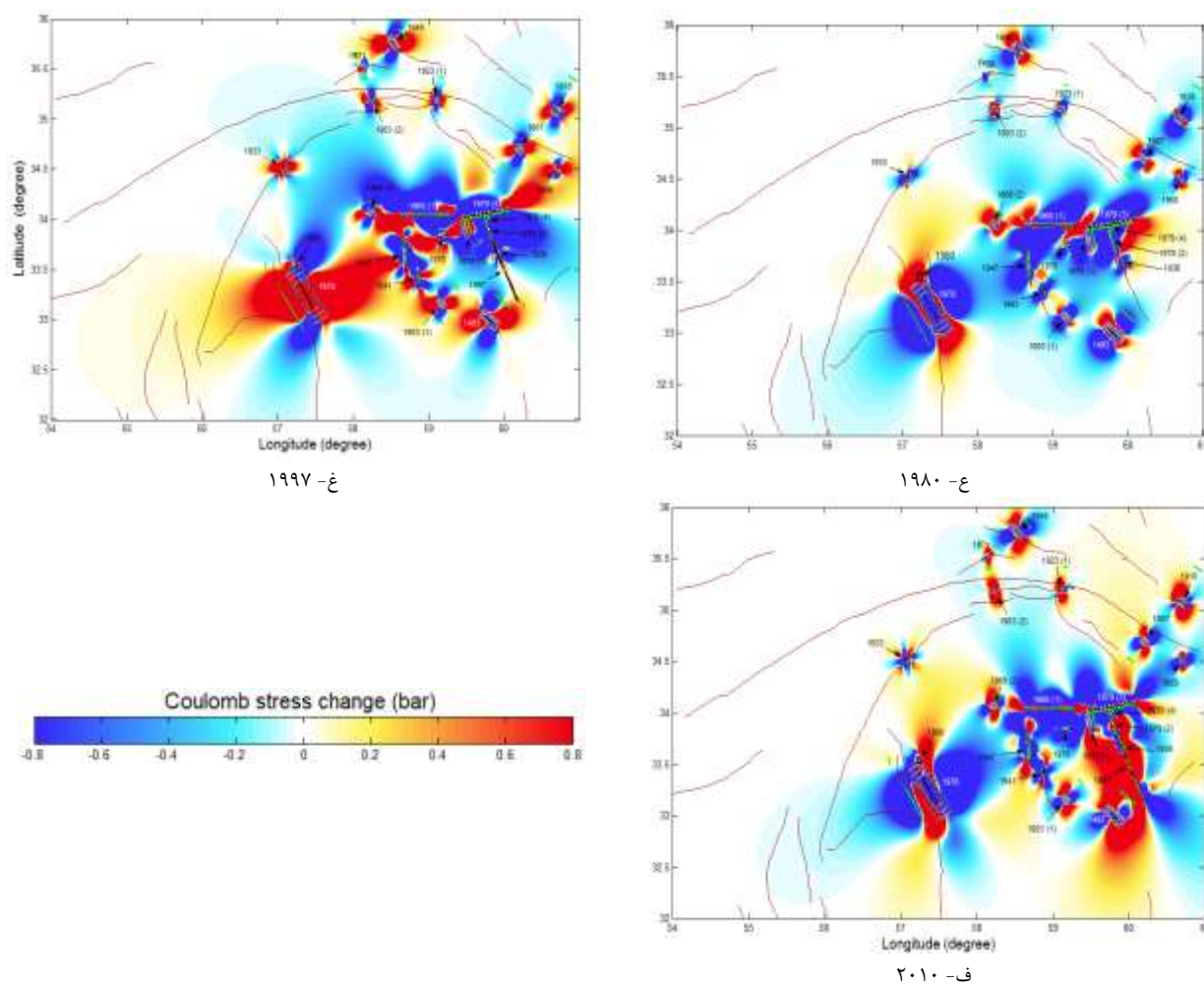


ح- ۱۹۴۰



ز- ۱۹۳۶





شکل ۳- تغییرات تنش کولمب ناشی از لغزش همالرزه زمین‌لرزه‌های پیشین در منطقه شرق ایران، محاسبه شده بر روی صفحه گسیختگی زمین‌لرزه بعدی که با رنگ سیاه ضخیم نشان داده شده است. رنگ زمینه نیز نشان‌دهنده تغییرات تنش کولمب برحسب بار می‌باشد که به صورت تجمعی محاسبه شده است. در هر شکل اثر سطحی ناشی از هر زمین‌لرزه با رنگ سبز نشان داده شده

EXTENDED ABSTRACT

Mechanical Interaction among Large Earthquakes in Eastern part of Iran

Asghar Rastbood *

Assistant Professor, Civil Engineering Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 08 October 2021; **Review:** 28 December 2021; **Accepted:** 30 January 2022

Keywords:

Coulomb Stress Changes, Mechanical Interaction, Active Fault, Earthquake, East Iran.

1. Introduction

Human being has been faced with destructive phenomenon specially earthquake for a long time. Knowing about the time and area of major earthquake and aftershocks is so necessary to mitigate the damage of financial and life by warning the earthquake or aftershocks happen before it really happened. Maybe this day we can't predict the earthquake exactly but the study about the information of previous earthquakes can identify the potential land that have Earthquake Bloodbath and with this knowing in building construction we can mitigate the damage due to the earthquake.

The tendency of rocks to fail in a brittle manner is thought to be a function of both shear and confining stresses, commonly formulated as the Coulomb failure criterion. Here we explore how changes in Coulomb conditions associated with one or more earthquakes may trigger subsequent events.

Study of Stress changes in earth's crust is useful for the predicting earthquakes. Analysis of Coulomb stress changes has been used in many seismic areas. These researches showed that the area and the speed of next earthquake will affect by the static stress changes which are the result of historical earthquake in this area.

2. Coulomb Failure Criterion

Knowing the time and place of major earthquakes is essential to warn. Analysis of Coulomb Stress Changes at moderate seismic depth has been used to estimate the probability of an earthquake in many seismic regions of the world. These studies show that in most cases the location of subsequent earthquakes is affected by changes in the Coulomb Stress caused by previous earthquakes in that region. In this study, in order to investigate the possible location of large earthquakes, Coulomb Stress Changes of 24 historical and instrumental earthquake with magnitudes greater than 5.5 in East Iran calculated in historical order. The study of mechanical interaction among earthquakes shows the spatial relationship for about 50% of events. In order to know about the areas that have highest probability, we compute the cumulative Coulomb Stress Change caused by the coseismic deformation of earthquakes on strike-slip and dip-slip faults with optimal geometry. Results of these estimations showed that the high-risk areas for causing the next large earthquakes were areas that are in the region of Columbus Stress Change increase due to previous earthquakes and have active faults in the direction of optimal strike-slip and dip-slip fractures.

Various criteria have been used to characterize the conditions under which failure occurs in rocks. One of the more widely used is the Coulomb failure criterion, which requires that both the shear and normal stress on

* Corresponding Author

E-mail addresses: arastbood@tabrizu.ac.ir (Asghar Rastbood).

an incipient fault plane satisfy conditions analogous to those of friction on a preexisting surface. In Coulomb criterion, failure occurs on a plane when the Coulomb stress exceeds a specific value. Our modeling is most sensitive to the regional stress direction, modestly sensitive to the coefficient of effective friction, and insensitive to the regional stress amplitude.

3. Estimation of mechanical interaction among large earthquakes in the eastern part of Iran

In order to investigate the possible location of large earthquakes, Coulomb Stress Changes of 24 historical and instrumental earthquake with magnitudes greater than 5.5 in East Iran calculated in historical order.

In order to know the parameters describing the fault planes of historical earthquakes, the main possible faults were first attributed to historical events.

Then the azimuth of historical earthquakes were obtained by measuring the direction angle of the probable main fault from the map of active faults in Iran (Hessami et al., 2003).

The slope angle of historical earthquakes was inferred based on the type of main fault using Anderson theory of faulting, and the rake angle of historical events were determined based on the type of the main fault, using the angles proposed by Aki and Richards (2002).

Parameters of fault planes of instrumental earthquakes before 1976, from the basic parameters of Iranian earthquakes prepared by Mirzaei et al., (1997) and also from the parameters collected by Jackson et al., (1995) and from 1976 up to now extracted from CMT.

The Wells and Coppersmith (1994) empirical relationships between the magnitude of the earthquake and the geometric parameters of the rupture were used to calculate the length, width and amount of slip due to an earthquake.

According to research, the magnitude of the regional stress has no effect on how the Columbus stress is distributed and only the direction of the regional stress changes the orientation of the planes ready for failure (King et al., 1994). Therefore, in modeling the Coulomb stress changes on faults with optimal geometry, it is only necessary to define the direction of regional stress in the study area. Therefore, the main components of the regional stress tensor were extracted from the research of Zarifi et al., (2013) throughout Iran.

The study of mechanical interaction among earthquakes shows the spatial relationship for about 50% of events. For example the Great Earthquake of 1947 increased stress at the end of the Dashte-Bayaz fault, causing a devastating earthquake in late August 1968 (Fig. 1-a). A few days later, in September 1968, another earthquake occurred west of the rupture plane of the first event, due to the excitation of this earthquake near the Ferdows fault (Fig. 1-b).

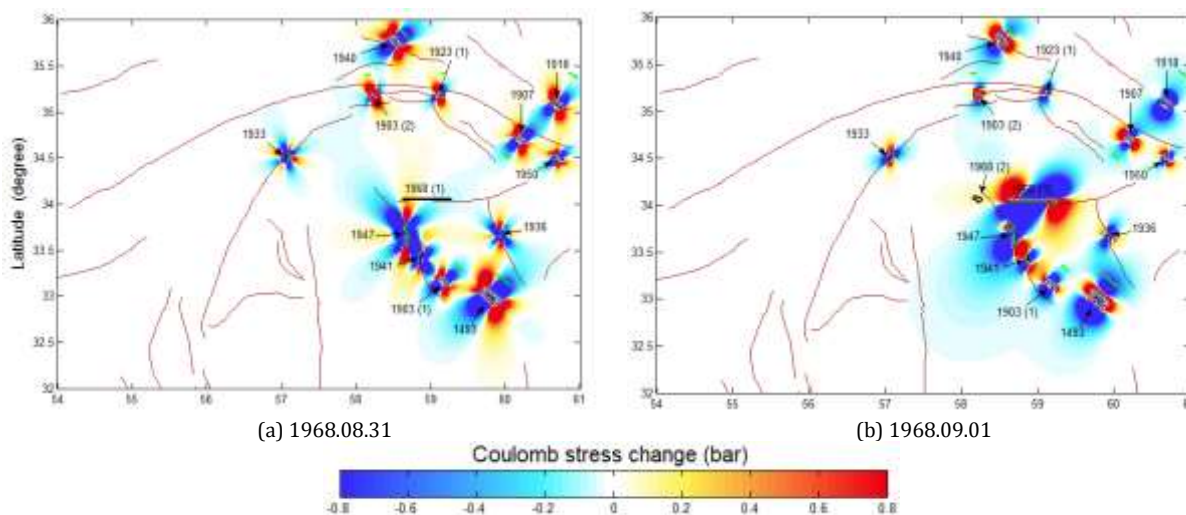


Fig. 1. An example Coulomb stress changes due to coseismic slip of previous earthquakes in the eastern region of Iran, calculated on the rupture plane of the next earthquake, which is shown in bold black. The background color indicates the change in Coulomb stress in bar, which is calculated cumulatively. In each figure, the surface effect of each earthquake is shown in green.

Fig. 2-a shows the Coulomb Stress Changes for reverse faults with optimal geometry. According to this figure, the high-risk and probable areas for large earthquakes are areas where the active fault is in the area of increasing Columbus Stress of previous earthquakes, in the direction of the optimal directions of the reverse faults. The faults in the area that are ready to rupture and are shown in pink are: 1- Part of Balher fault in the southwest of 1940 earthquake rupture plane, 2- The northern part of Ferdows reverse fault in the west of the rupture plane of the second earthquake of 1968 and the southern part of the Ferdows reverse fault in the west of the rupture plane of the 1947 earthquake, 3- Part of Mohammadabad reverse fault in the south of the 1941 earthquake rupture plane, 4- Parts of Tabas reverse fault plane in the east of the 1978 earthquake rupture plane.

Fig. 2-b shows the Coulomb Stress Changes for strike-slip faults with optimal geometry. According to this figure, high-risk and probable areas for large earthquakes are areas where in the region of Columbus Stress increase of previous earthquakes, active faults are present in the direction of the optimal directions of strike-slip faults. The faults in the area that are ready to rupture and are shown in pink are: 1- Part of the Doruneh strike slip fault in the north of the second earthquake plane of 1903, 2- The western part of the Dashte-Bayaz strike slip fault in the west of the third earthquake plane of the 1979 earthquake, 3- Dostoobad strike-slip fault in the South of the 1947 earthquake rupture plane, 4- The end part of the Abiz strike-slip fault in the south of the 1997 Neyband earthquake fault plane.

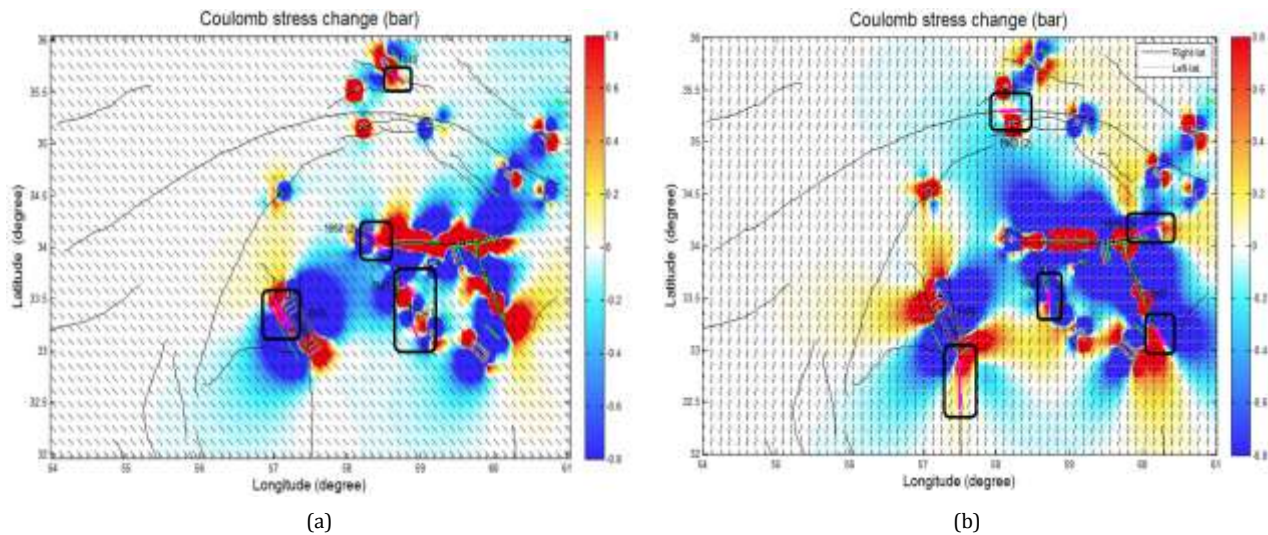


Fig. 2. Coulomb stress changes calculated on faults with optimal geometry: a) dip-slip, b) strike-slip. The background color indicates the Columbus stress changes in terms of bar. The faults that cause the Columbus stress changes are shown in green, the active faults in the region are shown in black, and the faults that are ready to rupture and create earthquakes are shown in pink inside the black rectangle.

4. Conclusions

In order to investigate the possible locations earthquakes, we compute cumulative co-seismic coulomb stress changes of 24 historical and instrumental earthquakes with magnitude ($M > 5.5$) in East Iran after each earthquake, using the component of stress associated with the fault orientation and slip direction of the next event. The results of the earthquake interactions, show falling before or after of the next happening.

Also in order to knowing about the area that has highest probability, we compute the cumulative coulomb stress change caused by the coseismic deformation of historical and instrumental earthquakes on strike-slip and reverse fault planes with optimum geometry. The results show that the hazard areas that have the potential for next earthquakes, be the areas in the realm of increase coseismic coulomb stress of previous earthquakes, an active fault was in direct with the optimum directions of strike-slip faults and reverse faults.

5. References

- Aki K, Richards PG, "Quantitative seismology", University Science Books, ISBN: 0935702962, 700 pp.
- Hessami K, Jamali F, Tabassi H, "Major active faults of Iran", IIEES, Tehran.
- Jackson JA, Haines AJ, Holt WE, "The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran", Journal of Geophysical Research, 1995, 100, 15205-15209. <https://doi.org/10.1029/95JB01294>.
- King GCP, Stein RS, Lin J, "Static stress changes and the triggering of *earthquakes*", Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84 (3), 935-953. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840030935>.
- Mirzaei N, Gao M, Chen YT, "Evaluation of uncertainty of earthquake parameters for the purpose of seismic zoning of Iran", Earthquake Research in China, 1997, 11, 197-212.
- Zarifi Z, Nilfouroushan F, Raeesi M, "Crustal Stress Map of Iran: Insight from Seismic and Geodetic Computations. Pure Appl. Geophys, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0711-9>.