

# پیش بینی مکانی زمین لرزه های بزرگ در منطقه ایران با استفاده از معیار شکست کولمب

بهزاد وثوقی<sup>۱\*</sup>، رویا محسنی دیبا<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه مهندسی ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(عضو قطب علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی)

vosoghi@kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

roya\_mdiba@yahoo.com

(تاریخ دریافت فروردین ۱۳۹۲، تاریخ تصویب آذر ۱۳۹۲)

## چکیده

پاسخ به این سؤال ضروری است که چگونه وقوع یک زمین لرزه ممکن است زمین لرزه های بعدی را به دنبال داشته باشد؟ وقوع زمین لرزه با گسلش یا شکست در پوسته زمین همراه است. بدین منظور بایستی معیار شکست در محیط الاستیک پوسته زمین یا همان معیار شکست کولمب مورد بررسی قرار گیرد. آنالیز تغییرات تنش کولمب در بسیاری از مناطق لرزه خیز جهان بکار گرفته شده است. این مطالعات نشان می دهند که مکان و سرعت وقوع زمین لرزه های بعدی متأثر از تغییرات تنش استاتیک ناشی از زمین لرزه های تاریخی در آن منطقه است. در این تحقیق اندر کنش تغییرات تنش کولمب مابین سیستم های گسلی در منطقه ایران مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامترهای زمین لرزه های بالای ۵/۸ ریشتر رخ داده از سال ۱۹۰۰ تا سال ۲۰۰۱ در این منطقه به منظور محاسبه تنش کولمب از مراجع مختلف گردآوری شده اند. نتایج حاصله نشانگر وقوع بیش از ۸۰ درصد زمین لرزه های رخ داده از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳، در منطقه افزایش تنش کولمب ناشی از زمین لرزه های ۱۰۰ سال گذشته به میزان ۰،۰۱ تا ۵ بار است. همچنین محاسبه تغییرات تنش کولمب روی صفحات گسلی امتداد لغز، کششی و نرمال با هندسه بهینه نشان می دهند که گسل هایی که هم جهت یا هندسه بهینه اند، در اثر افزایش تنش کولمب ناشی از زمین لرزه ها مستعد گسیختگی و ایجاد زمین لرزه می باشند و به عنوان مناطق پرخطر برای زمین لرزه های بعدی به شمار می آیند.

**واژگان کلیدی:** گسل فعال، معیار شکست کولمب، زمین لرزه، پیش بینی مکانی زمین لرزه

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

بشر از دیر باز با پدیده های مخرب طبیعی از جمله پدیده زلزله روبرو بوده و همواره درصدد اعلام هشدار قبل از رخداد این پدیده و مشخص کردن مکان، زمان، میزان احتمال وقوع و شدت زلزله احتمالی به منظور کاهش خسارات جانی و مالی بوده است. این پدیده ویران کننده ترین پدیده طبیعی برای جان و مال انسان است، بطوریکه در فاصله سال های ۱۹۰۰ تا ۱۹۷۶ در حدود ۲,۷۰۰,۰۰۰ نفر در اثر زلزله جان باخته اند [۱]. به جرات می توان گفت که تمام فلات ایران لرزه خیز است. مطالعه زمین لرزه های گذشته و حال و ثبت زمین لرزه های قرن حاضر توسط دستگاه های لرزه نگاری همگی دلالت بر پتانسیل بالای لرزه خیزی سرزمین ایران است. بنابراین دستیابی به روشی برای پیش بینی مکانی زمین لرزه ها مفید خواهد بود. از بررسی تغییر تنش در پوسته زمین می توان در پیش بینی احتمال وقوع زلزله بهره برد. بنابراین می توان از کمیت تغییرات تنش کولمب<sup>۱</sup> کمک گرفت. تغییر تنش کولمب ناشی از یک یا چند زمین لرزه می تواند باعث بروز زمین لرزه های بعدی شود.

در طی دو دهه اخیر تحقیقات متعددی در ارتباط با نحوه انتقال تنش توسط زمین لرزه ها منتشر شده است [۴] [۵] [۶] [۷] [۸] [۹]. مطالعات انجام شده به دو دسته عمده تقسیم می شوند. دسته اول ارتباط مابین یک زمین لرزه بزرگ و پس لرزه های کوچکتر بعد از آن را بررسی کرده و به بازه های زمانی کوتاهی محدود می شود.

از جمله کارهای انجام شده در این زمینه، می توان به کار انجام گرفته توسط هاریس و سیمپسون<sup>۲</sup> اشاره کرد که به اندرکنش میان یک زمین لرزه بزرگ و پس لرزه های آن در جنوب کالیفرنیا پس از زمین لرزه لندرز<sup>۳</sup> پرداخته است [۴]. نلانت، بارکا و الپتکین<sup>۴</sup> که پس لرزه های بعد از

زمین لرزه ارزینجان<sup>۵</sup> ترکیه را با معیار تغییرات تنش کولمب مدل سازی کرده اند [۵]. کار انجام شده توسط ژانگ و همکاران<sup>۶</sup> در منطقه گسلی خیانشی<sup>۷</sup> در جنوب غربی چین که به آزادسازی و تأخیر زمین لرزه با اندر کنش گسل ها پرداخته و مکان پس لرزه ها را پیش بینی کرده است [۶]. دسته دوم به اندر کنش مابین زمین لرزه های بزرگ اختصاص دارد و دربرگیرنده بازه های زمانی بلندتری است. از کارهای انجام شده در این زمینه نیز می توان به کار انجام شده توسط چاکیر و همکاران<sup>۸</sup> در مورد زمین لرزه سال ۱۹۹۹ میلادی در منطقه مرمره ترکیه اشاره کرد که اندر کنش میان زمین لرزه های بزرگ در منطقه را بررسی کرده است [۷]. همچنین استین و همکارانش<sup>۹</sup> در سال ۱۹۹۴ محل وقوع زمین لرزه نورتریج<sup>۱۰</sup> در کالیفرنیا را در اثر افزایش تنش کولمب ناشی از زمین لرزه های بزرگ رخ داده در منطقه بررسی کرده اند [۸].

کینگ و همکارانش<sup>۱۱</sup> نیز به این سؤال پاسخ می دهند که چگونه وقوع یک زمین لرزه می تواند زمین لرزه های بعدی را به همراه داشته باشد. در این تحقیق، هم به اندر کنش میان یک زمین لرزه بزرگ و پس لرزه های بعد از آن، و هم به اندر کنش میان زمین لرزه های بزرگ اشاره شده است [۹].

تحقیق انجام شده در این مقاله به اندر کنش تغییرات تنش کولمب مابین زمین لرزه های بزرگ در بازه های زمانی بلند مدت در منطقه ایران اختصاص دارد.

## ۲- تغییرات تنش کولمب

وقوع زمین لرزه با گسلش یا شکست در پوسته الاستیک زمین همراه است. پس باید معیار شکست در محیط الاستیک پوسته زمین (معیار شکست کولمب) مورد بررسی قرار گیرد. مطابق این معیار تمایل سنگ به شکست تابع

<sup>۵</sup> Erzincan Earthquake

<sup>۶</sup> Zhang Q. W. et al., 2003

<sup>۷</sup> Xianshuihe

<sup>۸</sup> Cakir Z. et al., 2003

<sup>۹</sup> Stein, R.S. et al., 1994

<sup>۱۰</sup> Northridge

<sup>۱۱</sup> King et al., 1994

<sup>۱</sup> Coulomb stress change

<sup>۲</sup> Harris, R.A. and Simpson, R.W. 1992

<sup>۳</sup> Landers earthquake

<sup>۴</sup> Nalbant, S.S., Barka, A.A. and Alptekin, Ö., 1996

## ۲-۱- تغییر تنش کولمب روی گسل های با هندسه مشخص<sup>۱</sup>

برای بدست آوردن تغییرات تنش کولمب بر روی گسل هایی با توجیه مشخص، فقط تنش حاصل از گسیختگی در گسل مرجع مدنظر قرار می گیرد. در این سیستم محورهای  $x$  و  $y$  و جابجایی های گسل افقی و صفحه گسل قائم و به موازات محور  $z$  است، بنابراین تنش روی یک صفحه با زاویه  $\psi$  نسبت به محور  $x$  (طبق شکل ۱) را می توان به صورت زیر نوشت [۹]:

$$\sigma_{11} = \sigma_{xx} \cos^2 \psi + 2\sigma_{xy} \sin \psi \cos \psi + \sigma_{yy} \sin^2 \psi \quad (6)$$

$$\sigma_{33} = \sigma_{xx} \sin^2 \psi - 2\sigma_{xy} \sin \psi \cos \psi + \sigma_{yy} \cos^2 \psi \quad (7)$$

$$\tau_{13} = \frac{1}{2}(\sigma_{yy} - \sigma_{xx}) \sin 2\psi + \tau_{xy} \cos 2\psi \quad (8)$$

حال می توان تغییر تنش کولمب برای حرکت راست گرد  $\sigma_f^R$  و چپ گرد  $\sigma_f^L$  روی صفحاتی که با زاویه  $\psi$  نسبت به محور  $x$  قرار گرفته اند را به صورت زیر نوشت:

$$\sigma_f^R = \tau_{13}^R + \mu' \sigma_{33} \quad (9)$$

$$\sigma_f^R = \tau_{13}^R + \mu' \sigma_{33} \quad (10)$$

$$\sigma_f^L = \tau_{13}^L + \mu' \sigma_{33} \quad (11)$$

علامت  $\tau_{13}$  در معادله (۹) برای لغزش راست گرد  $\tau_{13}^R$  در معادله (۱۰) تغییری نکرده ولی برای لغزش چپ گرد  $\tau_{13}^L$  در معادله (۱۱) علامت آن عوض می شود.

تنش های نرمال و برشی وارد بر صفحه شکست فرضی است و اگر میزان تنش کولمب از حد بحرانی رد شود، شکست الاستیک یا زمین لرزه اتفاق خواهد افتاد [۹]. تنش کولمب با رابطه (۱) تعریف می شود:

$$\sigma_f = \tau_\beta - \mu(\sigma_\beta - p) \quad (1)$$

در این رابطه  $\tau_\beta$  تنش برشی روی صفحه شکست،  $\sigma_\beta$  تنش نرمال،  $p$  فشار مایع منفذی و  $\mu$  ضریب اصطکاک است. اگر زاویه بین صفحه شکست و محور  $\sigma_1$  برابر  $\beta$  باشد، می توان مولفه های تنش اعمال شده بر صفحه شکست را بر حسب تنش های اصلی بیان کرد:

$$\sigma_\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \quad (2)$$

$$\tau_\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \quad (3)$$

در این رابطه  $\sigma_1$  تنش اصلی ماکزیمم و  $\sigma_3$  تنش اصلی مینیمم است. بدین ترتیب رابطه (۱) بصورت زیر در خواهد آمد:

$$\sigma_f = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)(\sin 2\beta - \mu \cos 2\beta) - \frac{1}{2}\mu(\sigma_1 + \sigma_3) + \mu p \quad (4)$$

با مشتق گیری از رابطه (۴) به عنوان تابعی از  $\beta$ ، ماکزیمم مقدار تنش کولمب  $\sigma_f$  زمانی است که داشته باشیم:

$$\cot 2\beta = -\frac{1}{\mu} \quad (5)$$

با فرض این که تنش میانی  $\sigma_2$  نقشی در شکست نداشته باشد، معیار شکست اساساً دو بعدی خواهد بود. بنابراین کلیه فرایندها را می توان در دو بعد بیان کرد. جهت تعمیم ریاضی به سه بعد کافیهست که وضعیت صفحه بزرگترین و کوچکترین تنش اصلی در سیستم مختصات مناسب تعیین شده و معیار شکست در آن صفحه اعمال شود.

<sup>۱</sup> Faults of specified orientation

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2\sigma_{xy}^t}{\sigma_{xx}^t - \sigma_{yy}^t} \right) \tau_{ij}^r + \sigma_{ij}^q \quad (13)$$

مطابق شکل ۱، زاویه یکی از تنش های اصلی با محور  $x$  و زاویه تنش اصلی دیگر با این محور برابر  $\theta \pm 90^\circ$  است. از این دو زاویه، زاویه مربوط به بزرگ ترین تنش بایستی انتخاب شود ( $\theta_1$ ). بنابراین زاویه شکست بهینه  $\psi_0$  برابر خواهد بود با  $\theta_1 \pm \beta$ . که زاویه ای است که تنش کولمب در آن بیشترین مقدار را دارد و از رابطه (۵) به دست می آید. در حالی که صفحات بهینه با استفاده از  $\sigma_{ij}^t$  تعیین می شوند، تغییرات تنش برشی و نرمال روی این صفحات فقط با استفاده از تغییر تنش زمین لرزه  $\sigma_{ij}^q$  تعیین می شود. چون هدف بدست آوردن تغییر تنش کولمب ناشی از زمین لرزه است. بنابراین تغییر تنش در صفحات بهینه عبارتند از:

$$\sigma_{33} = \sigma_{xx}^q \sin^2 \psi_0 - 2\sigma_{xy}^q \sin \psi_0 \cos \psi_0 + \sigma_{yy}^q \cos^2 \psi_0 \quad (14)$$

$$\tau_{13} = \frac{1}{2} (\sigma_{yy}^q - \sigma_{xx}^q) \sin 2\psi_0 + \tau_{xy}^q \cos 2\psi_0 \quad (15)$$

و تغییر تنش کولمب عبارت است از:

$$\sigma_f^{opt} = \tau_{13} - \mu' \sigma_{33} \quad (16)$$

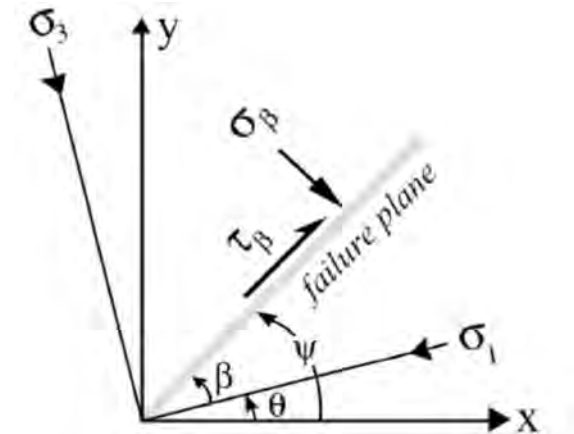
### ۳-۲- پارامترهای گسیختگی

جهت محاسبه طول و عرض گسیختگی و همچنین مقدار جداشدگی در اثر زمین لرزه از روابط تجربی ولز مابین شدت زمین لرزه و پارامترهای گسیختگی به صورت زیر استفاده می شود [۱۰].

$$\log(RLD) = -2.44 + 0.59 \times M_w \quad (17)$$

$$\log(RW) = -1.01 + 0.32 \times M_w \quad (18)$$

$$\log(AD) = -4.80 + 0.69 \times M_w \quad (19)$$



شکل ۱- سیستم مختصات مورد استفاده برای محاسبه تنش های کولمب روی صفحات شکست بهینه [۹]

### ۲-۲- تغییر تنش کولمب روی گسل های با هندسه بهینه<sup>۱</sup>

برای محاسبه تغییرات تنش کولمب بر روی گسل های گیرنده، اگر هندسه گسل گیرنده (زوایای امتداد، شیب و ریک) برای ما معلوم باشد، از روش ذکر شده در بخش ۱-۲ استفاده خواهد شد. اما اگر هندسه گسل گیرنده مشخص نباشد، ابتدا باید جهت صفحاتی را که مستعد شکست هستند با استفاده از تنش های منطقه ای موجود و تنش های ناشی از زمین لرزه، بدست آید، سپس تغییرات تنش کولمب روی این صفحات محاسبه شود. به این صفحات، صفحات با هندسه بهینه گفته می شود. همان طور که ذکر شد، بعد از یک زمین لرزه، جهات بهینه نه تنها با تغییر تنش ناشی از زمین لرزه  $\sigma_{ij}^q$ ، بلکه با تنش های منطقه ای موجود از قبل تعیین می شوند، چون هر دو می توانند جهت صفحه مستعد برای شکست را تغییر دهند. بدین ترتیب تنش کل از رابطه زیر تعیین می شود [۹]:

$$\sigma_{ij}^t = \tau_{ij}^r + \sigma_{ij}^q \quad (12)$$

جهت محورهای اصلی منتج از تنش کل با رابطه زیر تعیین می شود:

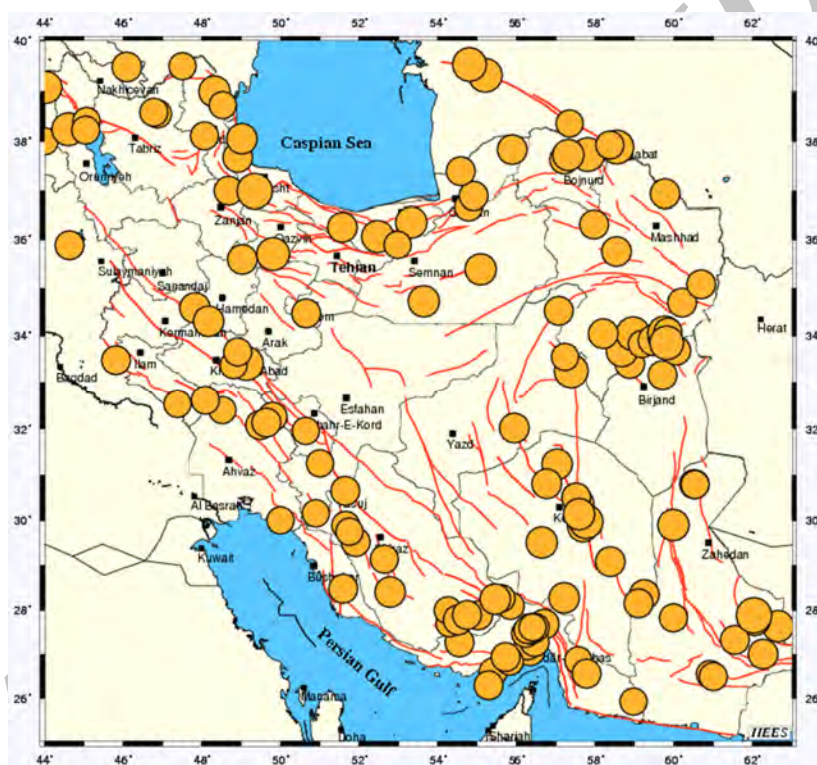
<sup>۱</sup> Optimally oriented faults

می‌دهد که ۱۶۴ رویداد لرزه ای بین سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۱ با بزرگای بیش از ۵٫۸ ریشتر در منطقه اتفاق افتاده است که نشان دهنده لرزه خیزی بالای آن است. شکل ۲ برگرفته از سایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، نشانگر این زمین لرزه هاست. در جدول شماره ۱ نیز مشخصات ۱۵ زمین لرزه اتفاق افتاده از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳ از مراجع مختلف گردآوری شده است. تنش کولمب ناشی از ۱۶۴ زمین لرزه ذکر شده در محل وقوع هرکدام از ۱۲ زمین لرزه بعدی بدست خواهد آمد.

در روابط فوق Mw بزرگی گشتاوری زمین لرزه ، RLD طول گسیختگی زیر سطحی بر حسب کیلومتر ، RW عرض گسیختگی در راستای شیب گسل بر حسب کیلومتر و AD متوسط جداشدگی بر حسب متر است.

### ۳- منطقه مورد مطالعه

این تحقیق به اندر کنش تغییرات تنش کولمب مابین زمین لرزه های بزرگ در بازه های زمانی بلند مدت در منطقه ایران اختصاص دارد. بررسی لرزه خیزی منطقه نشان



شکل ۲- زمین لرزه های بالای ۶ ریشتر از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۱ [۱۱]

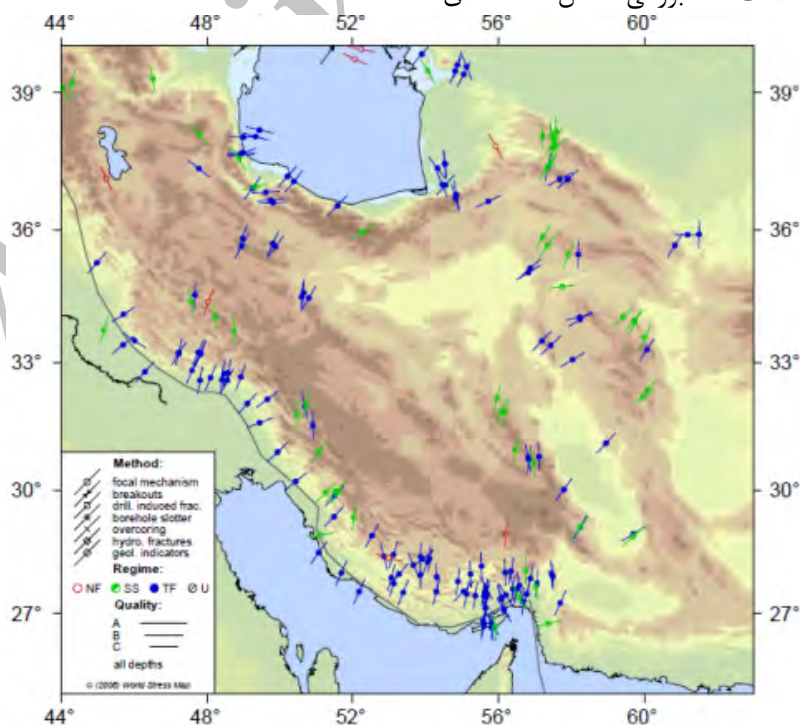
جدول ۱- اطلاعات زمین‌لرزه‌های بزرگتر از ۶ ریشتر، از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳

مرجع	Rake (درجه)	Dip (درجه)	Strike (درجه)	عمق (Km)	بزرگی گشتاوری (Mw)	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	تاریخ
[۱۲]	۷۱	۵۳	۲۶۷	۱۰	۶,۵	۳۵,۶۷	۴۸,۹۳	۲۰۰۲/۰۶/۲۲
[۱۳]	-۱۶۶	۸۸	۳۵۷	۱۰	۶,۶	۲۹,۰۶	۵۸,۳۰	۲۰۰۶/۱۲/۲۶
[۱۴]	۹۳	۶۲	۳۱۶	۱۲	۶,۳	۳۶,۳۷	۵۱,۵۷	۲۰۰۴/۰۵/۲۸
[۱۱]	۱۲۴	۴۶	۲۷۹	۱۲	۶,۴	۳۰,۸۰	۵۶,۷۶	۲۰۰۵/۰۲/۲۲
[۱۵]	-۸۹	۳۷	۲۵۳	۵۴,۸	۶	۲۶,۸۲	۶۲,۰۵	۲۰۰۵/۰۳/۱۳
[۱۶]	۱۱۸	۱۹	۳۲	۱۸	۶	۲۸,۱۸	۵۶,۷۶	۲۰۰۶/۰۲/۲۸
[۱۶]	-۱۶۴	۶۱	۳۱۵	۱۴,۱	۶,۱	۳۳,۶۵	۴۸,۹۱	۲۰۰۶/۰۳/۳۱
[۲]	۷۶	۳۳	۲۳۵	۷	۶,۱	۲۶,۹۴	۵۵,۷۲	۲۰۰۸/۰۹/۱۰
[۱۸]	۱۷۳	۸۵	۲۱۳	۵	۶,۵	۲۸,۳۲	۵۹,۱۹	۲۰۱۰/۱۲/۲۰
[۱۸]	۱۷۶	۸۷	۲۴۱	۹	۶,۲	۲۸,۱۷	۵۹,۰۴	۲۰۱۱/۰۱/۲۷
[۱۹]	۱۶۴	۸۹	۸۲	۱۵	۶,۵	۳۸,۵۵	۴۶,۸۷	۲۰۱۲/۰۸/۱۱
[۱۹]	۱۳۵	۶۷	۲۵۶	۱۶	۶,۳	۳۸,۵۸	۴۶,۷۸	۲۰۱۲/۰۸/۱۱

#### ۴-مدلسازی

تأثیری در نحوه توزیع تنش کولمب ندارد و تنها جهت تنش منطقه ای است که توجیه صفحات مستعد برای شکست را تغییر می‌دهد [۹]. بنابراین در مدل سازی تنها نیاز به جهت تنش‌های منطقه ای در منطقه ایران داریم. برای تعیین جهت تنش‌های منطقه ایران از نقشه جهانی تنش [۲۰] در منطقه ایران طبق شکل ۳ استفاده شده است.

در بخش ۲-۲ ذکر شد که برای به دست آوردن صفحات گسلی با جهت بهینه برای شکست، علاوه بر تنش ناشی از گسیختگی در گسل مرجع، باید تنش‌های منطقه ای نیز در نظر گرفته شود. طبق تحقیق انجام شده توسط کینگ و همکارانش بیان شده است که بزرگی تنش منطقه ای



شکل ۳- جهت تنش‌های منطقه ای در منطقه مورد مطالعه [۲۰]

## ۵- اندرکنش تغییرات تنش کولمب در منطقه ایران

تغییرات تنش کولمب ناشی از ۱۶۴ زمین لرزه اتفاق افتاده بین سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۱ در دو بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش اول تحت عنوان پیش بینی مکانی زمین لرزه ها، تنش کولمب در محل هرکدام از ۱۲ زمین لرزه سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳ را مورد بررسی قرار می‌دهد و در بخش دوم با عنوان آنالیز خطر برای منطقه ایران، مناطق پرخطر برای زمین لرزه های بعدی مشخص می‌شوند.

### ۵-۱- پیش بینی مکانی زمین لرزه ها

تغییرات تنش کولمب ناشی از ۱۶۴ زمین لرزه اتفاق افتاده بین سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۱ در محل هرکدام از ۱۲ زمین لرزه اتفاق افتاده از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳ محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۲ آمده است.

نتایج نشان می‌دهند به جز دو زمین لرزه ردیف‌های ۳ و ۹ بقیه زمین لرزه ها، در محل افزایش تنش کولمب ناشی از زمین لرزه های قبلی اتفاق افتاده‌اند و مناطق با کاهش تنش کولمب به عنوان مناطق پایدار به شمار می‌آیند. به عبارت دیگر زمین لرزه ها در مناطق با افزایش تنش کولمب فراوان و در مناطق با کاهش تنش کولمب اندک اند. از دلایل عدم وقوع دو زمین لرزه فوق در منطقه افزایش تنش کولمب می‌توان به دلایل زیر اشاره کرد:

۱. مختصات جغرافیایی که برای محل وقوع زمین لرزه ها در کاتالوگ‌های مختلف آمده است، متفاوت از یکدیگر می‌باشند. برای به دست آوردن محل دقیق وقوع زمین لرزه ها ایجاد شبکه لرزه نگاری با تراکم بالا در منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود.

۲. در این مقاله تغییرات تنش کولمب ناشی از زمین لرزه های بزرگ محاسبه شده است در حالی که زمین لرزه های کوچک‌تر نیز در میزان تغییرات تنش کولمب نقش دارند و باعث متحرک شدن مکان افزایش یا کاهش تنش کولمب می‌گردند که در تعیین محل وقوع زمین لرزه های بعدی موثر خواهد بود.

جهت انجام محاسبات، بایستی انواع مختلف پارامترها، به ویژه پارامترهای توصیف کننده گسل مرجع و گیرنده به مدل معرفی گردد. گسل مرجع با پارامترهای گسیختگی (لغزش، عمق، طول و زاویه ریک) و هندسه گسل (زوایای امتداد و شیب) مشخص می‌شود. در این مقاله گسل‌های مسبب برای زمین لرزه های اتفاق افتاده بین سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۱، به عنوان گسل مرجع انتخاب شدند و پارامترهای هندسی آن‌ها از مراجع مختلف انتخاب شد [۱۱] و [۱۶]. این پارامترها را به عنوان ورودی برای مدل اکادا<sup>۱</sup> وارد می‌کنیم. خروجی مدل، جابجایی‌ها و کرنش‌ها خواهند بود. با تبدیل کرنش به تنش طبق رابطه هوک، تنش ایجاد شده در اثر گسیختگی گسل مرجع به دست می‌آید. صفحه گسل گیرنده نیز که تغییر تنش کولمب روی آن محاسبه می‌شود با هندسه و مکانیزم گسلش (زوایای امتداد<sup>۲</sup>، شیب<sup>۳</sup> و ریک<sup>۴</sup>) توصیف می‌شود. مشخصات گسل‌های گیرنده از مراجع مختلف انتخاب شده و در جدول شماره ۱ آمده است. با تجزیه تنش روی صفحه گسل گیرنده و جایگذاری آن در رابطه (۱)، تغییر تنش کولمب روی گسل گیرنده محاسبه می‌شود. برای انجام محاسبات از نرم افزار کولمب [۲۱] استفاده شده است.

علاوه بر این بایستی پارامترهای الاستیک نیم فضای الاستیک نیز مشخص باشند. برای این از مقادیر متوسط جهانی استفاده می‌شود. برای نسبت پواسن<sup>۵</sup> مقدار ۰/۲۵ و برای مدول یانگ<sup>۶</sup> مقدار  $10^5 \times 8$  بار انتخاب شده است [۳]. همچنین امکان انتخاب ضریب اصطکاک بین صفر تا یک وجود دارد. برای این کار مقدار متوسط ۰/۴ که در اغلب مقالات ذکر شده در بخش مقدمه استفاده شده، انتخاب شده است.

۱ Yoshimitsu Okada

۲ Strike angle

۳ Dip angle

۴ Rake or Pitch angle

۵ Poisson's ratio

۶ Young's modulus

۳. همان طور که گفته شد، در انجام محاسبات، برای به دست آوردن طول و عرض گسیختگی و همچنین مقدار متوسط جابجایی، از روابط تجربی ولز استفاده شده که از طریق رگرسیون بدست آمده است. اگر برای این محاسبات از روابط به دست آمده برای زمین لرزه های رخ داده در منطقه ایران استفاده شود [۲۲]، نتایج دقیق تری را به دست می دهد.

۴. بین سال های ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۱ زمین لرزه ای در محل ۱۲ زمین لرزه استفاده شده در مدل سازی رخ نداده تا تنش کولمب در محل وقوع آن ها را تغییر دهد.  
۵. لزوماً نباید همه زمین لرزه ها در منطقه افزایش تنش کولمب واقع شوند. برای مثال زمین لرزه های القایی، زمین لرزه هایی هستند که بشر در به وجود آمدن آن ها نقش دارد.

جدول ۲- تغییر تنش کولمب محاسبه شده در محل هرکدام از زمین لرزه ها

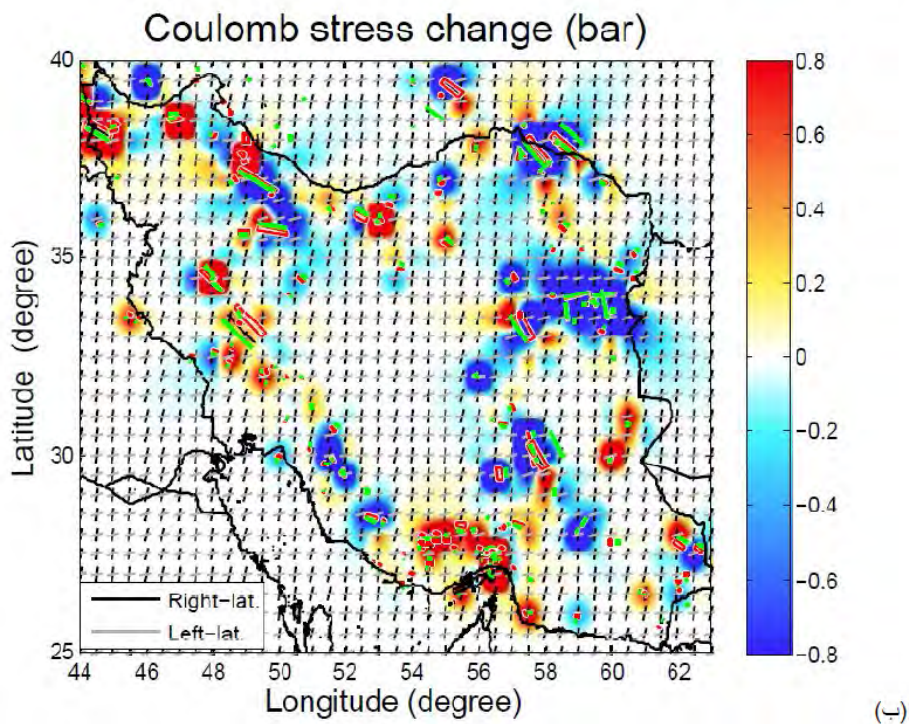
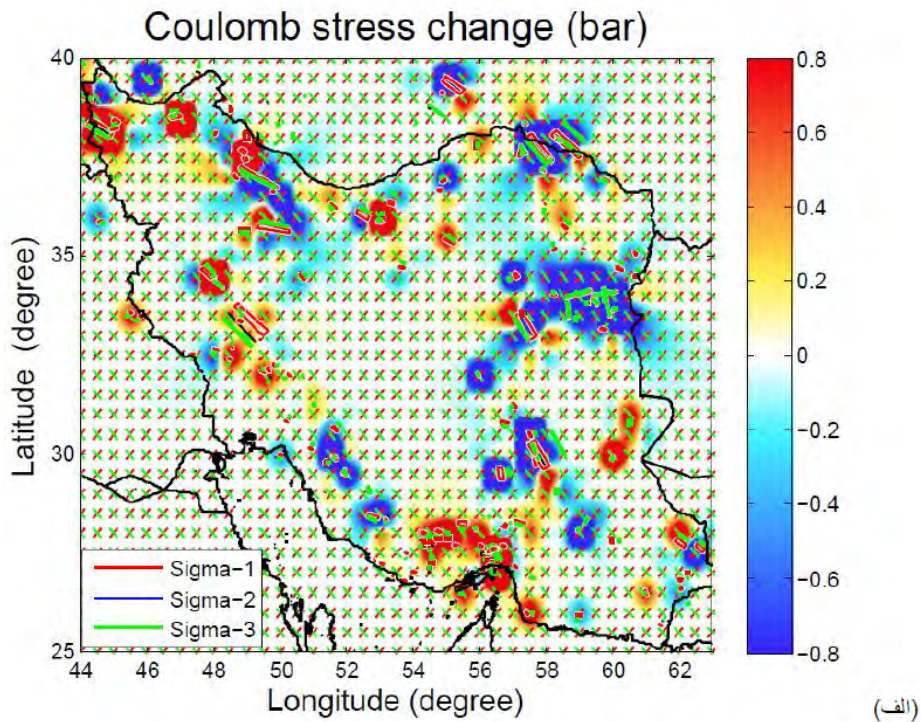
ردیف	تاریخ	مکان وقوع	تغییر تنش کولمب (بار)
۱	۲۰۰۲،۰۶،۲۲	همدان	۰،۰۵۵
۲	۲۰۰۳،۱۲،۲۶	کرمان	۰،۱۱۴
۳	۲۰۰۴،۰۵،۲۸	مازندران	-۰،۰۱۰
۴	۲۰۰۵،۰۲،۲۲	کرمان	۰،۰۳۸
۵	۲۰۰۵،۰۳،۱۳	سیستان و بلوچستان	۰،۰۲۱
۶	۲۰۰۶،۰۲،۲۸	هرمزگان	۰،۳۶۵
۷	۲۰۰۶،۰۳،۳۱	لرستان	۰،۲۹۵
۸	۲۰۰۸،۰۹،۱۰	خلیج فارس	۰،۰۰۸
۹	۲۰۱۰،۱۲،۲۰	سیستان و بلوچستان	-۰،۰۲۶
۱۰	۲۰۱۱،۰۱،۲۷	کرمان	۱،۳۹
۱۱	۲۰۱۲،۰۸،۱۱	آذربایجان شرقی	۰،۰۰۹
۱۲	۲۰۱۲،۰۸،۱۱	آذربایجان شرقی	۴،۷۵۱

## ۵-۲- آنالیز خطر برای منطقه ایران

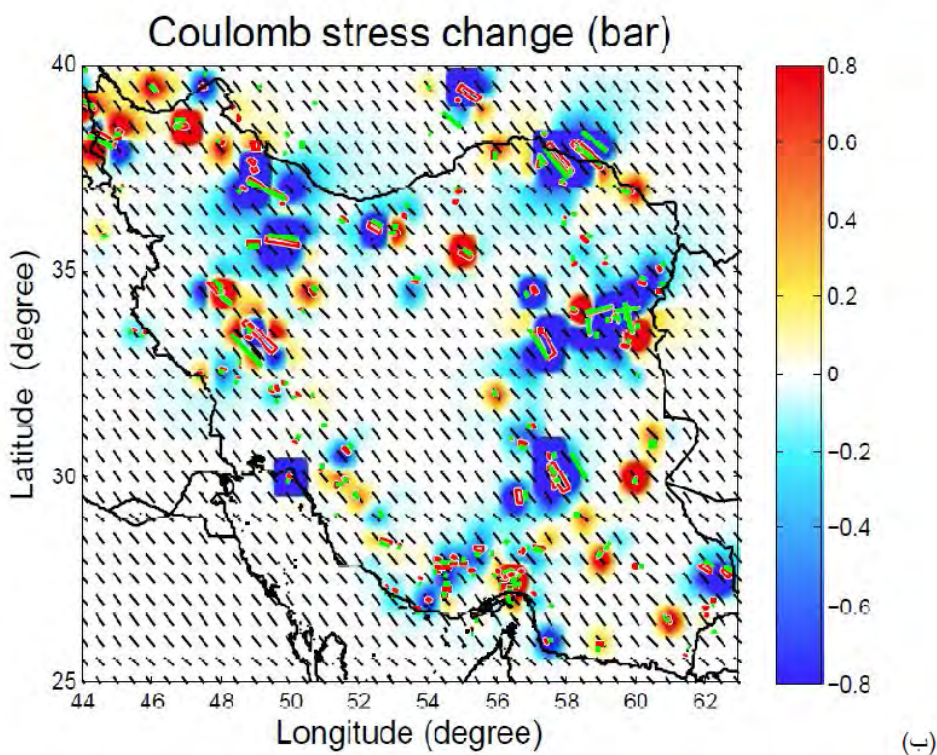
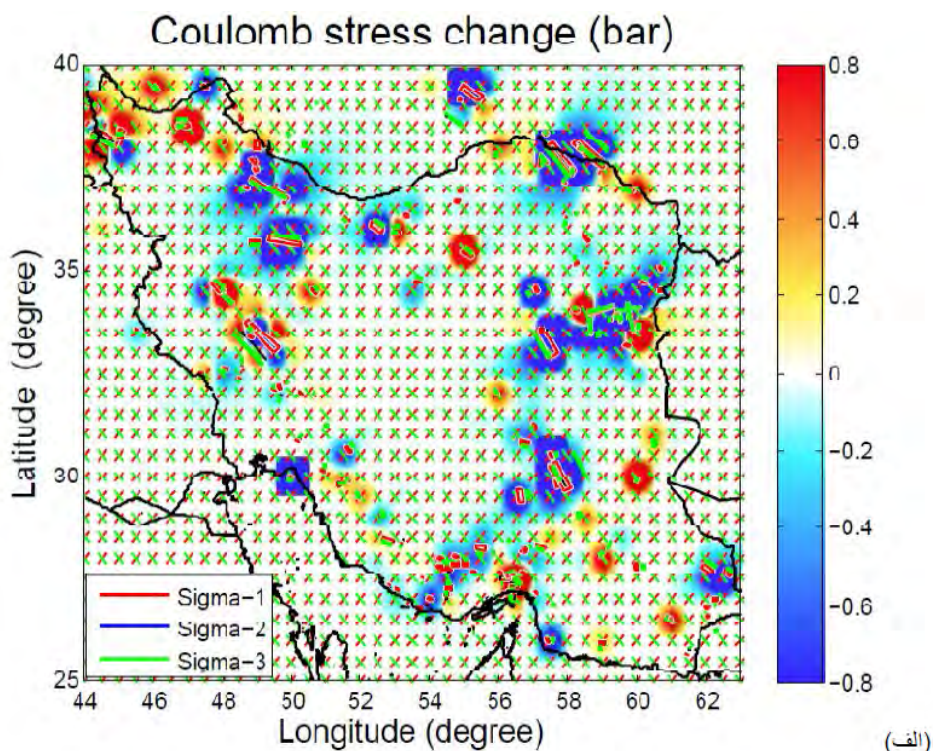
بهینه اند، در اثر افزایش تنش کولمب ناشی از زمین لرزه ها مستعد گسیختگی و ایجاد زمین لرزه می باشند و به عنوان مناطق پرخطر برای زمین لرزه های بعدی به شمار می آیند.

محاسبه تغییرات تنش کولمب روی صفحات گسلی امتدادلغز، کششی و نرمال با هندسه بهینه، طبق اشکال ۳ تا ۵ نشان می دهند که گسل هایی که هم جهت با هندسه

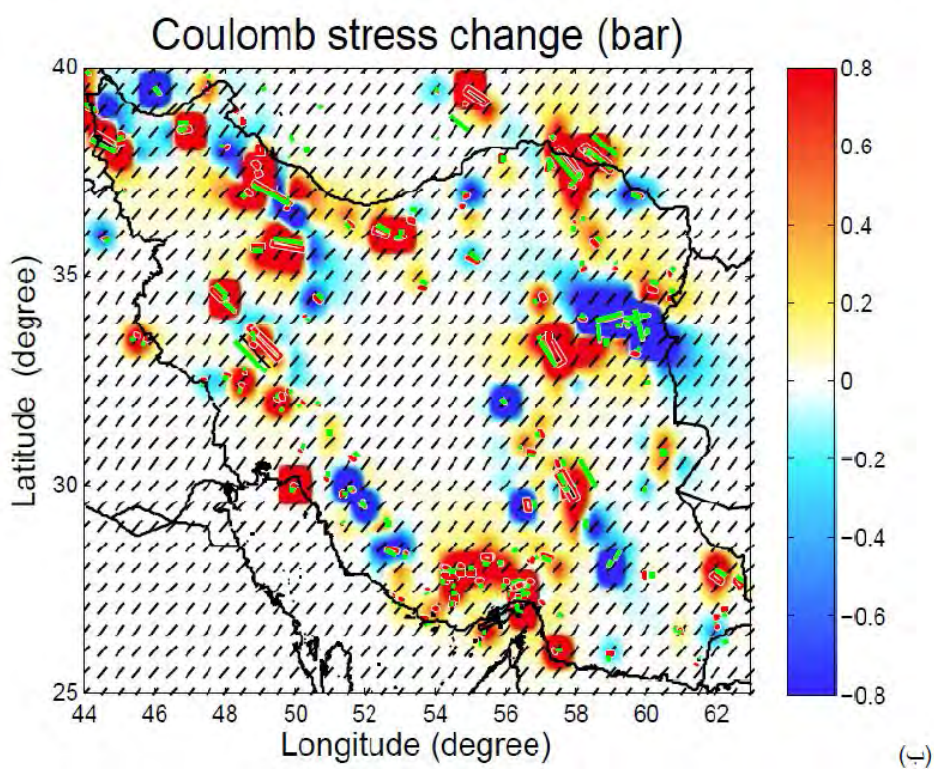
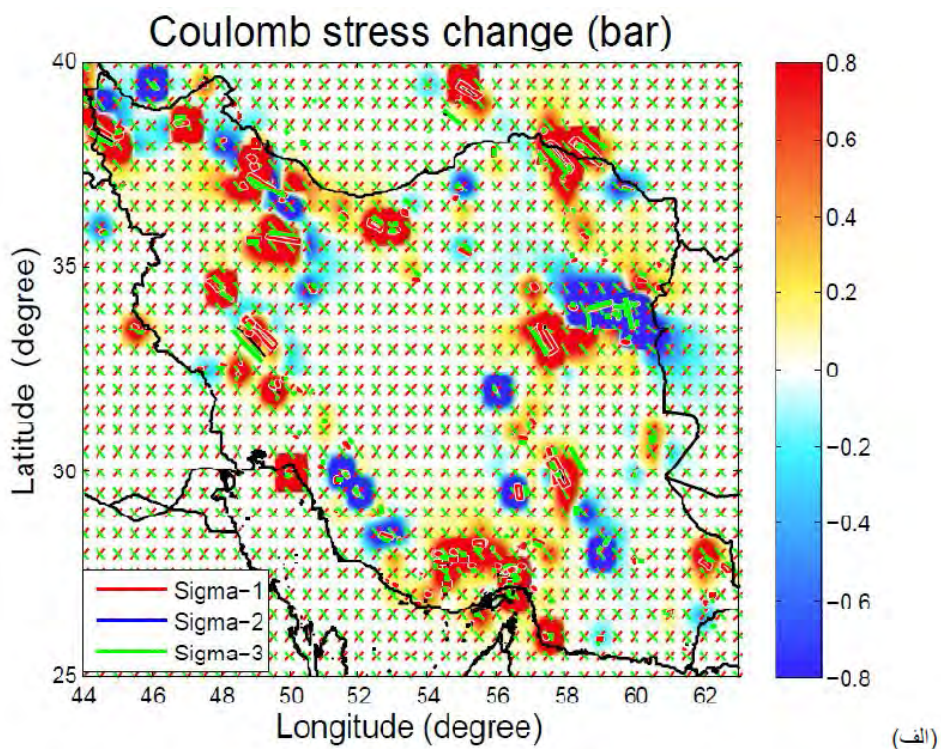




شکل ۴- تغییرات تنش کولمب روی گسل‌های امتداد لغز با هندسه بهینه. بردارها نشانگر الف) جهت تنش منطقه ای و ب) جهت صفحات امتداد لغز راست گرد و چپ گرد مستعد برای شکست. رنگ زمینه نشانگر تغییرات تنش کولمب بر حسب بار می‌باشد. خطوط سبز رنگ نشانگر اثر گسل بر روی سطح است و نواحی مستطیل شکل که محیط آن‌ها به رنگ قرمز نمایش داده شده بیانگر تصویر گسل در عمق زمین هستند. مناطق با افزایش تنش کولمب به عنوان مناطق پرخطر برای زمین لرزه های بعدی و مناطق با کاهش تنش کولمب به عنوان مناطق پایدار بعد از زمین لرزه به شمار می‌آیند.



شکل ۵- تغییرات تنش کولمب روی گسل های کششی با هندسه بهینه. بردارها نشانگر الف) جهت تنش منطقه ای و ب) جهت صفحات کششی مستعد برای شکست. رنگ زمینه نشانگر تغییرات تنش کولمب بر حسب بار می باشد. خطوط سبز رنگ نشانگر اثر گسل بر روی سطح است و نواحی مستطیل شکل که محیط آن ها به رنگ قرمز نمایش داده شده بیانگر تصویر گسل در عمق زمین هستند. مناطق با افزایش تنش کولمب به عنوان مناطق پرخطر برای زمین لرزه های بعدی و مناطق با کاهش تنش کولمب به عنوان مناطق پایدار بعد از زمین لرزه به شمار می آیند.



شکل ۶- تغییرات تنش کولمب روی گسل‌های نرمال با هندسه بهینه. بردارها نشانگر الف) جهت تنش منطقه ای و ب) جهت صفحات نرمال مستعد برای شکست. رنگ زمینه نشانگر تغییرات تنش کولمب بر حسب بار می‌باشد. خطوط سبز رنگ نشانگر اثر گسل بر روی سطح است و نواحی مستطیل شکل که محیط آن‌ها به رنگ قرمز نمایش داده شده بیانگر تصویر گسل در عمق زمین هستند. مناطق با افزایش تنش کولمب به عنوان مناطق پرخطر برای زمین لرزه های بعدی و مناطق با کاهش تنش کولمب به عنوان مناطق پایدار بعد از زمین لرزه به شمار می‌آیند.

## ۶- نتیجه گیری

نتایج حاصل نشان دهنده وقوع اکثر زمین لرزه های رخ داده از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳ در منطقه افزایش تنش کولمب و وقوع تعداد کم زمین لرزه ها در مناطق کاهش تنش کولمب است. بنابراین با استفاده از محاسبات تغییر تنش کولمب می توان محل وقوع زمین لرزه های بعدی را تعیین نمود. وقوع هر زمین لرزه ای می تواند باعث تغییر توزیع تنش کولمب در منطقه شود و این موضوع باعث متحرک شدن تغییرات تنش کولمب خواهد شد، تنش متحرک هر چند کوچک، می تواند گسل های اطراف را حتی پس از مدت زمان زیاد به نقطه شکست برساند. توجه به بحث مطرح شده، نیاز اساسی به مدل سازی تنش کولمب را که مشخص کننده مخاطرات لرزه ای آینده در منطقه زلزله خیز ایران باشد، نشان می دهد.

مختصات جغرافیایی که برای محل وقوع زمین لرزه ها در کاتالوگ های مختلف آمده است، متفاوت از یکدیگر می باشند. برای به دست آوردن محل دقیق وقوع زمین لرزه ها ایجاد شبکه لرزه نگاری با تراکم بالا در منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می شود.

در این مقاله تغییرات تنش کولمب ناشی از زمین لرزه های بزرگ محاسبه شده است در حالی که پس لرزه های ناشی از زمین لرزه اصلی نیز توزیع تنش کولمب در منطقه را تغییر می دهند و باعث متحرک شدن مکان افزایش یا کاهش تنش کولمب می گردند که در تعیین محل وقوع زمین لرزه های بعدی موثر خواهد بود. برای پیش بینی دقیق تر پیشنهاد می شود پس لرزه های ناشی از زمین لرزه اصلی نیز در مدل سازی لحاظ شوند تا توزیع آنی و دقیق تری از تغییرات تنش کولمب را در منطقه داشته باشیم.

## مراجع

- [۱] یزدانی، م.، کلانتر، د.، ۱۳۸۶، میدان تنش در پوسته زمین به عنوان یکی از پیش نشانگرهای اصلی زلزله، مرکز مطالعات پیش نشانگرهای زلزله موسسه ژئوفیزیک، اولین همایش پیش نشانگرهای زلزله، ۱۵ اسفند ۱۳۸۶.
- [۲] عسکری، م.، حمزه لو، ح.، ۱۳۸۹، شبیه سازی جنبش نیرومند زمین و برآورد پارامترهای گسل برای زمین لرزه ۲۰ شهریور ۱۳۸۷ قشم با استفاده از تابع تجربی گرین، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، ۲۱-۲۳ اردیبهشت ۱۳۸۹، مقالات شفاهی زلزله شناسی صفحه ۱۱۲۰-۱۱۲۴.
- [۳] راست بود، الف.، وثوقی، ب.، ۱۳۸۹، بررسی تغییر شکل بین لرزه ای در ناحیه برخورد صفحه های زمین ساختی عربستان و اوراسیا در منطقه خاورمیانه با استفاده از یک مدل تحلیلی، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۴، شماره ۲، صفحه ۸۹-۱۰۲.
- [4] Harris, R. A., Simpson, R.W., & Reasenber, P. A. (1995). "Influence of Static Stress Changes on Earthquake Locations in Southern California." *Nature*, 375(6528): 221-224.
- [5] Nalbant, S.S., Barka, A.A., & Alptekin, Ö. (1996). "Failure Stress Change Caused by the 1992 Erzincan Earthquake (Ms=6.8)." *Geophys. Res. Lett.*, 23(13): 1561-1564.
- [6] Zhang, Q. W. et al. (2003). "Earthquake triggering and delaying caused by fault interaction on Xianshuihe fault belt, southwestern China." *Acta Seismologica Sinica*, Vol. 16 No. 2, 156 – 165.
- [7] Cakir, Z., et al. (2003). "Coulomb Stress Interactions and the 1999 Marmara earthquakes." *Turkish Journal of Earth Sciences*, Vol. 12, 2003, pp. 91-103.
- [8] Stein, R.S., King, G.C.P., & Lin, J. (1994). "Stress triggering of the 1994 M=6.7 Northridge, California, earthquake by its predecessors", *Science*, 265, pp. 1432-1435.
- [9] King, G. C. P., Stein, R. S., & Lin, J. (1994). "Static stress changes and the triggering of earthquakes." *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84, 935-953.

- [10] Wells, L. Donald & Coppersmith, J. Kevin. (1994). "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*." v. 84; no. 4; p. 974-1002.
- [11] International Institute of Earthquake Engineering and Seismology. [www.iiees.ac.ir](http://www.iiees.ac.ir)
- [12] Gheitanchi, M. R. (2004). "The June 22<sup>nd</sup> 2002 Changoureh-Avaj earthquake in Qazvin province, north central Iran." *Earth & Space Physics*. Vol. 30, No. 1 (2004) P. 23-30.
- [13] Nalbant, S.S., Steacy, S., McCloskey, J. (2006). "transfer relations among three earthquakes that occurred in Kerman province, southern Iran since 1981." *GeophysJ. Int.*, (2006) 167, 309–318.
- [14] Gheitanchi, M.R. (2004). "Source characteristics of the 28<sup>th</sup> May 2004 Baladeh destructive earthquake in central Alborz, revealed from far field waveform data." abstracts of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Continental Earthquakes (III ICCE), 12-14 July 2004, Beijing, China.
- [15] Mostafazadeh, M. (2006). "Analysis of the Marth 13, 2005 Earthquake in Southeastern Iran Based on Teleseismic and Regional Distances." *JSEE: Fall 2006*, vol. 8, No. 3.
- [16] Global Centroid Moment Tensor Project. [www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org)
- [17] Nicknam, A., Abbasnia, R., Eslamian, Y., Bozorgnasab, M. "Synthesize of the 31 March 2006 (Mw 6.1) Silakhor Earthquake (Iran), using Empirical Green's Functions Method."
- [18] Walker, R.T., et al. (1995). "The 2010–2011 South Rigan (Baluchestan) earthquake sequence and its implications for distributed deformation and earthquake hazard in southeast Iran." *Geophysical Journal International*, 193:349-374.
- [19] Karimzadeh, S. (2012). "Coulomb Failure Stress Changes and its Relation with Earthquakes Stress Triggers." *International Symposium on Earthquake Engineering, JAEE*, Vol.1, 2012.
- [20] Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D. and Müller, B., 2008. *The World StressMap*—Commission for the Geological Map of the World, Paris.
- [21] Coulomb 3.3 Graphic-Rich Deformation and Stress-Change Software for Earthquake, Tectonic, and Volcano Research and Teaching—User Guide by Shinji Toda, Ross S. Stein, Volkan Sevilgen, and Jian Lin.
- [22] Nowroozi, A. A. 1985. Empirical relations between magnitudes and fault parameters for earthquakes in Iran, *Bull. Seism. Soc. Am.* 75, 1327-1338