

## چکیده

هدف از این مقاله، بررسی تأثیر تغییرات تنش کولمب ناشی از زمین‌لرزه 20 اردیبهشت 1376 قائن - بیرجند، بر نتایج به‌دست‌آمده از مدل آماری وابسته به زمان (زمان - وابسته) در رخداد زمین‌لرزه‌های آینده در قسمتی از شرق ایران است. در این مطالعه، با به‌کارگیری مدل فیزیکی وابسته به زمان<sup>1</sup> (BPT)، با در نظر گرفتن هردو اثرات دائمی و گذرای تغییرات تنش کولمب، احتمال شرطی بازگشت زلزله برای 10، 30 و 50 سال آینده در هر گسل محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات تنش کولمب ناشی از زمین‌لرزه 20 اردیبهشت 1376 قائن - بیرجند، باعث تغییر در احتمال رخداد زمین‌لرزه‌های آینده در برخی گسل‌های منطقه می‌شود. به‌طوری‌که در نظر گرفتن تغییرات تنش کولمب باعث تغییر در احتمال وقوع زلزله روی گسل دشت بیاض شرقی و غربی شده است، درحالی‌که تأثیری در احتمال وقوع حوادث در گسل طبس و فردوس نداشته است.

**کلمات کلیدی:** تغییرات تنش کولمب، BPT، مدل زمان وابسته، احتمال شرطی، شرق ایران

## بررسی تأثیر تغییرات تنش کولمب بر مدل‌های زمان وابسته در شرق ایران

### سمیرا سرخوندی

دانشجوی ارشد زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

### حمید زعفرانی (نویسنده مسؤول)

دانشیار پژوهشکده زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

E-mail: [h.zafarani@iiees.ac.ir](mailto:h.zafarani@iiees.ac.ir)

### عباس قلندرزاده

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

## 1- مقدمه

ژاپن را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند در نظر گرفتن تغییرات تنش ناشی از زلزله کوبه باعث افزایش در احتمال زلزله‌های آینده در منطقه شده است. پارسونز و همکاران [2] احتمال وقوع زلزله‌های آینده با در نظر گرفتن تغییرات تنش کولمب ناشی از زلزله 17 اوت 1999 از میت  $M_w = 7/4$  برای دریای مرمره و شهر استانبول را محاسبه کردند و به این نتیجه رسیدند که در نظر گرفتن تغییرات تنش ناشی از زلزله 1999 از میت احتمال وقوع زلزله را در مناطق مورد بررسی افزایش داده است. کنسول و همکاران [3] احتمال وقوع زلزله را در ایتالیا، بر اساس مدل آماری وابسته به زمان و مدل فیزیکی (به‌منظور محاسبه تغییرات تنش کولمب) مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در نظر گرفتن تأثیر تغییرات تنش کولمب و به‌کارگیری یک مدل وابسته به زمان، به‌طور قابل توجهی بر روی احتمال وقوع تأثیر می‌گذارد، به‌طوری‌که برای بسیاری از منابع (چشمه‌های لرزه‌زا) احتمال وقوع زلزله افزایش می‌یابد و در مقابل در منابع دیگری، اندکی کاهش پیدا می‌کند. در ایران، تاکنون مطالعه خاصی بر روی نحوه استفاده از نتایج تغییر تنش کولمب بر

بشر از دیرباز با پدیده‌های مخرب طبیعی از جمله پدیده زلزله روبه‌رو بوده و همواره درصدد اعلام هشدار قبل از رخداد این پدیده و مشخص کردن مکان، زمان، میزان احتمال وقوع و شدت زلزله احتمالی، بوده است. از طرفی عامل تنش در پوسته‌ی زمین به‌عنوان یکی از عوامل اصلی است که در پیش‌بینی احتمال وقوع زمین‌لرزه‌ها تأثیر می‌گذارد. در سال‌های اخیر، اثر متقابل گسل‌ها به‌وسیله تغییر تنش استاتیک کولمب محاسبه می‌شود و اثر تغییر تنش، بر روی زمان رویداد زمین‌لرزه‌های آینده به‌صورت تغییر در احتمال آن‌ها مطرح می‌شود. بنابراین برای تعیین مناسب احتمال رخدادهای آینده، بایستی اثر تغییرات تنش ایجاد شده ناشی از زلزله‌های پیشین، به‌نحو مناسبی بر احتمال وقوع حوادث آینده لحاظ گردد. از این رو، بررسی تأثیر تغییرات تنش کولمب بر احتمالات تعیین شده حائز اهمیت است. مطالعات بسیاری در جهان این موضوع را مورد بررسی قرار داده‌اند، از جمله: تودا و همکاران [1] در قسمتی از مطالعات خود تأثیر تغییرات تنش ناشی از زلزله کوبه با  $M_w = 6/9$  در سال 1995 را بر احتمال زلزله‌های آینده در

منابع لرزه‌ای منطقه استفاده شده است. تابع توزیع BPT بر اساس دو پارامتر میانگین زمان بازگشت مورد انتظار ( $T_r$ )، ضریب تغییرات ( $\alpha$ ) زمان بین رویدادها (نسبت انحراف معیار زمان بین رویدادها به میانگین آن‌ها) بیان می‌شود [7]. این تابع توزیع به صورت رابطه زیر بیان شده است:

$$f(t, T_r, \alpha) = (T_r / 2\pi\alpha^2 t^3)^{1/2} \times \exp\left\{-\frac{(t - T_r)^2}{2T_r\alpha^2 t}\right\} \quad (1)$$

برای یک چرخه‌ی زلزله‌ی کاملاً تناوبی<sup>4</sup> مقدار ضریب تغییرات برابر با صفر است. در یک لرزه‌خیزی کاملاً تصادفی (بدون هیچ الگو) این ضریب برابر با یک خواهد شد؛ که در این صورت فرآیند از الگوی پواسونی پیروی می‌کند. وقوع زلزله در قالب خوشه‌ای<sup>5</sup> نیز، باعث ایجاد ضریب تغییرات بزرگ‌تر از یک خواهد شد. در واقع، این پارامتر شرح می‌دهد چگونه یک زلزله مشخصه می‌تواند به طور تصادفی یا تناوبی بر روی یک گسل رخ دهد. در این مطالعه، محاسبات بر اساس ضریب تغییرات 0/5 و 0/75 انجام گرفته است [8].

بر اساس نظر کار گروه احتمالات زلزله کالیفرنیا می‌توان احتمال وقوع یک رویداد مشخصه در فاصله زمانی  $t$  و  $t + Dt$  را طبق رابطه زیر محاسبه کرد [9]:

$$P(t \leq T < t + Dt | T > t) = \int_t^{t+Dt} f(T) dT / (1 - F(t)) \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $F(t)$  تابع احتمال تجمعی است.

در مدل‌های تکرار، فرض می‌شود وقوع یک زمین‌لرزه بر وقوع زمین‌لرزه‌های بعدی منطقه تأثیر نمی‌گذارد؛ اما در شرایط واقعی، منابع لرزه‌ای ممکن است روی یکدیگر اثر بگذارند؛ بنابراین باید اثر زمین‌لرزه‌های منطقه در محاسبه احتمال وقوع زمین‌لرزه‌های آینده در گسل‌های منطقه لحاظ شود. اثر متقابل گسل‌ها با محاسبه تغییرات تنش استاتیک کولمب یا تابع شکست کولمب در گسل مورد نظر، ناشی از زلزله‌های رخ داده در منطقه مطابق با رابطه زیر تعیین می‌شود [10]:

$$DCFF = D\tau - \mu' D\sigma \quad (3)$$

در این رابطه،  $D\tau$  تغییرات تنش برشی استاتیک بر روی

روی احتمال وقوع زلزله‌های آینده صورت نگرفته است. با توجه به اهمیت موضوع در این مطالعه، منطقه شرق ایران محدود به مختصات چهار گوشه 32 تا 35 درجه شمالی و 56 تا 61 درجه شرقی در نظر گرفته شده است. با استفاده از تابع توزیع وابسته به زمان براونی (BPT) احتمال وقوع زلزله در 10، 30 و 50 سال آینده با شروع از سال 2015 در گسل‌های فعال منطقه محاسبه شده و در محاسبات هر دو اثر گذرا و ماندگار تغییرات تنش کولمب ناشی از زمین‌لرزه 20 اردیبهشت 1376 قائن - بیرجند در نظر گرفته شده است و در آخر تأثیر تغییرات تنش بر احتمالات، مورد بررسی قرار گرفته است.

## 2- روش پژوهش

به منظور در نظر گرفتن زمان سپری شده از آخرین زلزله بزرگ یا مشخصه و زمان بین رویدادها و خارج شدن از حالت متداول مدل‌های احتمالاتی، مدل‌های وابسته به زمان ارائه شد. این مدل‌های احتمالاتی که مدل‌های تکرار<sup>2</sup> نیز خوانده می‌شوند، به منظور برآورد احتمالات وابسته به زمان بلندمدت زمین‌لرزه بعدی در گسل خاص و یا یک قطعه گسل که در آن زمین‌لرزه‌های بزرگی در فاصله‌های زمانی تقریباً منظم اتفاق افتاده است، استفاده می‌شود. در این مدل‌ها، فرض بر این است که زمان بین زمین‌لرزه‌های بزرگ یا مشخصه<sup>3</sup> متوالی (زمان بین رویدادها و یا فواصل زمان‌های بازگشت) از یک توزیع آماری خاص پیروی می‌کنند. تعدادی از توابع توزیع نظیر گوسی، وایل، لگاریتم نرمال و گاما برای محاسبه احتمالات شرطی استفاده شده است (به عنوان مثال [4-5]). این توابع توزیع تنها ریشه تجربی دارند. اخیراً مدل احتمالاتی براونی (BPT) بر اساس مدل فیزیکی ساده از چرخه زلزله‌ها، به عنوان جایگزین مدل‌های تجربی دیگر، ارائه شده است. برخلاف تمام مدل‌های احتمالاتی وابسته به زمان، این تابع توزیع به خاصیت فیزیکی رفتار گسل وابسته است [6]. به منظور محاسبه احتمالات، بایستی یک تابع چگالی احتمال برای نمایش توزیع زمان بین رویدادهای متوالی در هر گسل و برخی از پارامترهای پایه مدل، انتخاب شود. در این مطالعه، از مدل احتمالاتی وابسته به زمان BPT برای نشان دادن توزیع احتمالاتی زمین‌لرزه‌ها روی

پیدا می‌کند و دچار زوال نمی‌شود.

اثر گذرای تنش به‌عنوان تغییر در نرخ مورد انتظار رویدادهای قطعه گسل موردنظر بیان می‌شود که این موضوع برای نشان دادن وقوع زمین‌لرزه‌ها به‌عنوان یک فرآیند پواسونی با نرخ غیر ثابت مناسب است. با استفاده از این موضوع، می‌توان احتمال وقوع یک زمین‌لرزه در فاصله زمانی  $t$  و  $t + Dt$  مطابق با رابطه زیر محاسبه کرد:

$$P(t \leq T < t + Dt) = 1 - \exp\left(-\int_t^{t+Dt} R(t) dt\right) = 1 - \exp(-N) \quad (7)$$

در معادله فوق،  $R(t)$  نرخ لرزه‌خیزی برای یک گام تنش و  $N$  تعداد زلزله‌های مورد انتظار در فاصله زمانی  $t$  و  $t + Dt$  است [12]. با محاسبه انتگرال برای یک گام تنش، مقدار  $N$  محاسبه می‌شود.

### 3- داده‌ها و نتایج

در این مطالعه، منطقه شرق ایران محدود به مختصات چهار گوشه 32 تا 35 درجه شمالی و 56 تا 61 درجه شرقی مطابق با شکل (1) در نظر گرفته شد. همچنین، زمین‌لرزه‌های با بزرگای گشتاوری بزرگ‌تر و مساوی 6 این منطقه، از سال 1968 مطابق با جدول (1) در نظر گرفته شد. چهار منبع لرزه‌ای دشت بیاض شرقی، دشت بیاض غربی، طبس، فردوس مورد بررسی خاص قرار گرفت. با استفاده از اطلاعات جدول (1) و نرم‌افزار 3.3 Coulomb تغییرات تنش کولمب ناشی از زمین‌لرزه 20 اردیبهشت 1376 در طول گسل‌های دشت بیاض، طبس و فردوس مطابق با شکل‌های (2) تا (5) محاسبه شده است. حداکثر تغییرات تنش کولمب در طول هر گسل مطابق با جدول (3) ارائه شده است. در الگوریتم این محاسبات، زمین مانند یک نیم فضای الاستیک یکنواخت فرض می‌شود. در مدلسازی گسل‌های منطقه به دلیل اینکه جزئیاتی مانند شکل گسل و توزیع لغزش در دسترس نیست، همانند بسیاری از مطالعات [4، 19] گسل مستطیل شکل با توزیع تنش یکنواخت فرض شده است.

صفحات شکست (در جهت لغزش مثبت در نظر گرفته می‌شود)،  $\mu'$  ضریب اصطکاک مؤثر و  $DC$  تغییرات تنش نرمال استاتیک (در کشش مثبت در نظر گرفته می‌شود). همانند بسیاری از مطالعات در جهان، ضریب اصطکاک مؤثر برابر با 0/4 در نظر گرفته شده است (به‌عنوان مثال: [1، 2، 3، 10]).

در نظر گرفتن اثر دائمی تغییرات تنش کولمب در احتمالات لرزه‌ای به دو روش زیر لحاظ می‌شود:

1- اصلاح زمان سپری شده از آخرین زمین‌لرزه مشخصه که مطابق با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$t' = t + DCFF / \sigma \quad (4)$$

2- اصلاح متوسط زمان بازگشت مورد انتظار که به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$T'_r = T_r - DCFF / \sigma \quad (5)$$

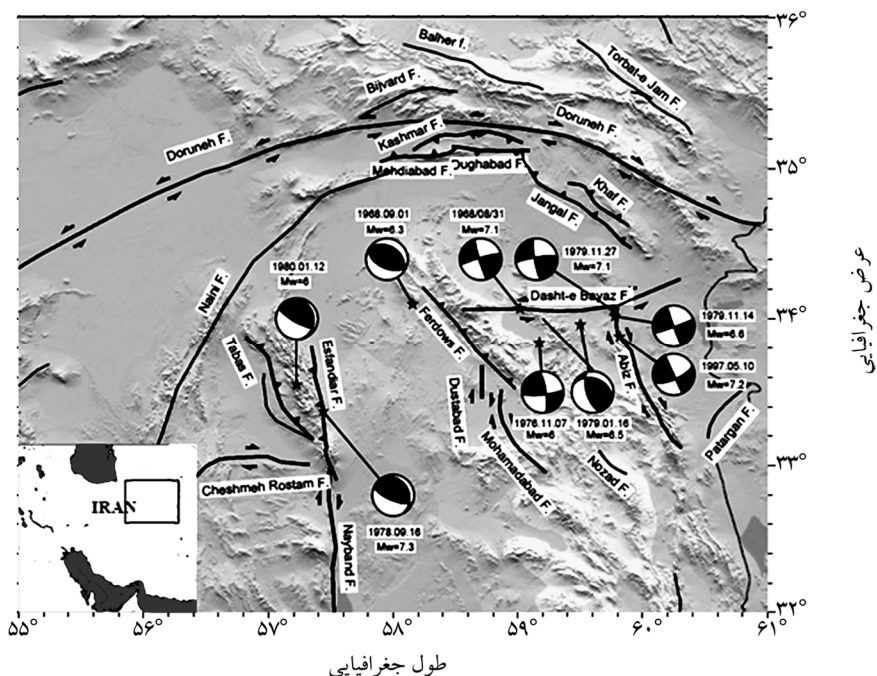
هر دو روش نتایج مشابهی را ارائه می‌دهند، اما روش دوم برای یک گام تنش تغییرات بیشتری را در احتمالات نتیجه می‌دهد [11]. در این مطالعه محاسبات بر اساس اصلاح زمان سپری شده از آخرین زمین‌لرزه انجام شده است.

اثر گذرا ناشی از خواص رئولوژیکی لغزش گسل‌ها باید در احتمالات لرزه‌ای در نظر گرفته شود. استفاده از قانون اصطکاک ساختاری دیتریچ [12] برای یک گروه نامحدود از گسل‌ها، منجر به بیان نرخ لرزه‌خیزی به‌عنوان تابعی از زمان پس از تغییر ناگهانی یک گام تنش می‌شود. نرخ لرزه‌خیزی به‌صورت تابعی از زمان، مطابق با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$R(t) = R_0 / \{[\exp(-DCFF / A\sigma) - 1] \exp(t/t_a) + 1\} \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $R_0$  میزان لرزه‌خیزی قبل از تغییر تنش،  $A$  پارامتر بدون بعد ساختار گسل،  $\sigma$  تنش نرمال فعال در گسل و  $t_a$  مدت زمان مؤثر پس‌لرزه‌ها (مدت زمانی که طول می‌کشد که نرخ لرزه‌خیزی به نرخ لرزه‌خیزی اولیه برسد) است [12].

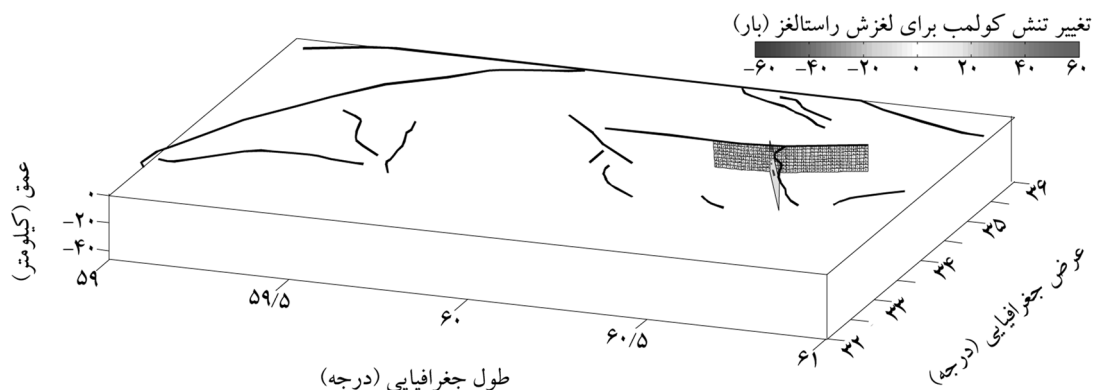
بعد از هر گام تنش، اثر گذرا نسبت به اثر دائمی بیشتر افزایش می‌یابد و با سرعت کاهش پیدا می‌کند. این در حالی است که اثر دائمی تنش به‌صورت خطی نسبت به زمان افزایش



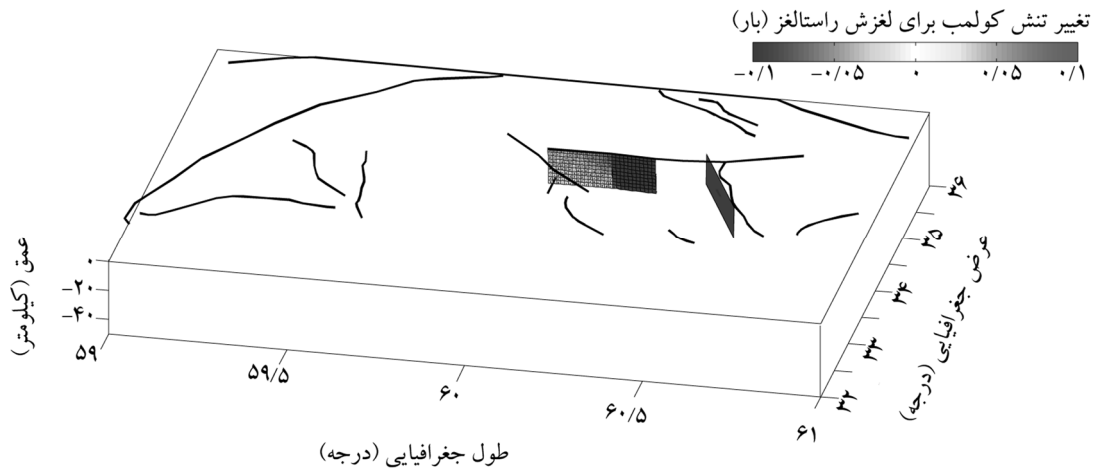
شکل (1): منطقه مورد مطالعه. منطقه شرق ایران محدود به مختصات چهارگوشه 32 تا 35 درجه شمالی و 56 تا 61 درجه شرقی.

جدول (1): پارامترهای زلزله‌های دستگاهی در منطقه شرق ایران در این مطالعه. مختصات رومرکز از مطالعه واکر و همکاران گرفته شده است [13].

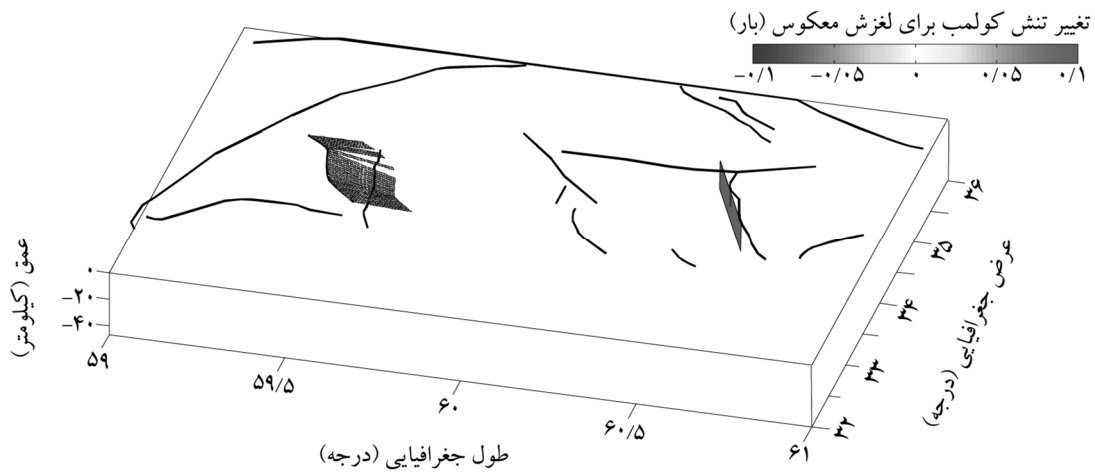
مرجع	منبع لوزه‌ای	سازوکار	ریک	شیب	امتداد	بزرگا (Mw)	عمق (km)	مختصات رومرکز		تاریخ
								عرض	طول	
[14]	دشت بیاض غربی	امتدادلغز	5	84	254	7/1	17	34/068	59/018	1968/08/31
[14]	فردوس	معکوس	85	54	115	6/3	9	34/099	58/155	1968/09/01
[15]	طیس	معکوس	125	25	330	7/3	10	33/370	57/440	1978/09/16
[16]	قائن	معکوس	46	34	293	6/5	11	33/961	59/501	1979/01/16
[16]	آبیز	امتدادلغز	-177	89	160	6/6	10	34/017	59/780	1979/11/14
[14]	دشت بیاض شرقی	امتدادلغز	8	82	261	7/1	8	34/056	59/769	1979/11/27
[17]	طیس	معکوس	137	20	348	6	14	33/550	57/230	1980/01/12
[18]	آبیز	امتدادلغز	-160	89	156	7/2	13	33/880	59/815	1997/05/10



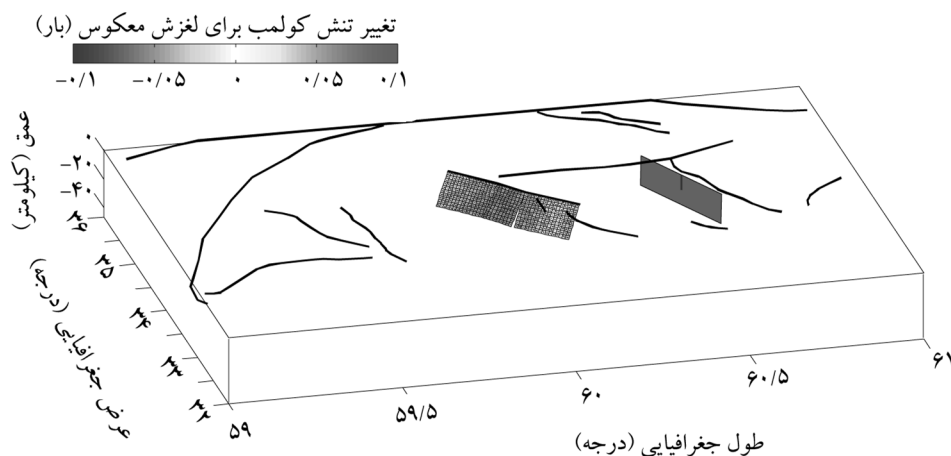
شکل (2): تغییرات تنش کولمب ناشی از زلزله 20 اردیبهشت 1376 قائن - بیرجند. صفحه گسل دشت بیاض شرقی با فرض سازوکار امتدادلغز به عنوان گسل گیرنده در نظر گرفته شده است. حداکثر تنش در طول صفحه این گسل برابر با 50/76 بار حساب شده است.



شکل (3): تغییرات تنش کولمب ناشی از زلزله 20 اردیبهشت 1376 قائن - بیرجند. صفحه گسل دشت بیاض غربی با فرض سازوکار امتداد لغز به‌عنوان گسل گیرنده در نظر گرفته شده است. حداکثر تنش بر روی صفحه این گسل برابر با 0/0140 - بار حساب شده است.



شکل (4): تغییرات تنش کولمب ناشی از زلزله 20 اردیبهشت 1376 قائن - بیرجند. صفحه گسل طبس با فرض سازوکار معکوس به‌عنوان گسل گیرنده در نظر گرفته شده است. حداکثر تنش بر روی صفحه این گسل برابر با 0/0149 بار محاسبه شده است.



شکل (5): تغییرات تنش کولمب ناشی از زلزله 20 اردیبهشت 1376 قائن - بیرجند. صفحه گسل فردوس با فرض سازوکار معکوس به‌عنوان گسل گیرنده در نظر گرفته شده است. حداکثر تنش بر روی صفحه این گسل برابر با 0/0513 بار محاسبه شده است.

زمان بازگشت زمین لرزه برابر با عکس نرخ سالانه تعیین می شود. در نهایت متوسط زمان بازگشت زمین لرزه در هر منبع لرزه ای مطابق با جدول (2) تعیین شده است.

جدول (2): متوسط زمان بازگشت زلزله در گسل های منطقه

منبع لرزه ای	متوسط زمان بازگشت (سال)
دشت بیاض غربی	472
دشت بیاض شرقی	472
طیس	2132
فردوس	3067

احتمالات رخداد حوادث آینده با در نظر گرفتن اثر دائمی تغییرات تنش کولمب بر اساس روابط (2) و (4) انجام شده است. انجام این محاسبات، نیازمند اطلاعاتی نظیر زمان سپری شده از آخرین زلزله در هر منبع لرزه ای و نرخ تنش تکتونیک است. خداوردیان و همکاران [22] در بخشی از مطالعات خود مقادیر نرخ کرنش را برای کل فلات ایران محاسبه کردند. با مشخص بودن نرخ کرنش برشی، نرخ تنش تکتونیک از حاصل ضرب نرخ کرنش در مدول برشی (برابر با 32000 مگا پاسکال در نظر گرفته شده است) محاسبه شده است. احتمال رخداد حوادث آینده با در نظر گرفتن اثر گذرا و دائمی تغییرات تنش کولمب مطابق با رابطه (7) محاسبه شد. برای این منظور، باید مقادیر مدت زمان مؤثر پس لرزه ها و  $A\sigma$  مشخص باشد. برای محاسبه مدت زمان مؤثر پس لرزه ها از روش به کار گرفته شده توسط پارسونز [2] برای منطقه مرمره ترکیه استفاده شده است. برای این هدف، زلزله های با  $M_w \geq 6$  در بازه زمانی 1900-1997 در نظر گرفته شد که در این بازه زمانی، از تلاقی منحنی لرزه خیزی و نرخ لرزه خیزی اولیه، مدت زمان مؤثر پس لرزه ها مطابق با شکل (6)،  $11/32$  سال تخمین زده شده است؛ به عبارتی  $11/32$  سال طول می کشد که نرخ لرزه خیزی در منطقه به نرخ لرزه خیزی اولیه قبل از زمین لرزه قائن - بیرجند برسد. مقدار  $A\sigma$  برای هر منبع لرزه ای با مشخص بودن مدت زمان مؤثر پس لرزه ها و نرخ تنش تکتونیک مطابق با رابطه زیر تعیین شده است [12].

با توجه به اینکه محل و سازوکار زمین لرزه انتخابی بر نتایج تغییرات تنش کولمب تأثیر می گذارد؛ بنابراین بایستی خطای مربوط به این پارامترها در نتایج لحاظ شود. در این مطالعه اطلاعات مربوط به مختصات رومرکز و سازوکار زمین لرزه قائن - بیرجند همان طور که در جدول (1) ذکر شده است به ترتیب از مطالعه واکر و همکاران [13] و بربریان و همکاران [18] گرفته شده است. واکر و همکاران [13] مختصات رومرکز زمین لرزه قائن - بیرجند را با خطای بسیار اندکی از صفحه گسیختگی تعیین کردند؛ بنابراین مختصات رومرکز و اطلاعات زمین لرزه دارای خطای اندکی هستند که نیازی به بررسی تأثیر خطای این پارامترها در مقادیر تغییرات تنش کولمب نیست.

محاسبه احتمالات شرطی به مقادیر متوسط زمان بازگشت زلزله های مشخصه بر اساس داده های تاریخی و دیرینه لرزه شناسی نیاز دارد. داده های تاریخی در منابع لرزه ای موردنظر، در یک بازه زمانی بزرگ تر از میانگین زمان بازگشت و همچنین داده های دیرینه لرزه شناسی در این منابع لرزه ای، در دسترس نیست؛ بنابراین برای هر زمین لرزه بر اساس روش ارائه شده توسط فیلد و همکاران [20] نرخ سالانه ( $RateCH$ ) به صورت رابطه زیر محاسبه شد:

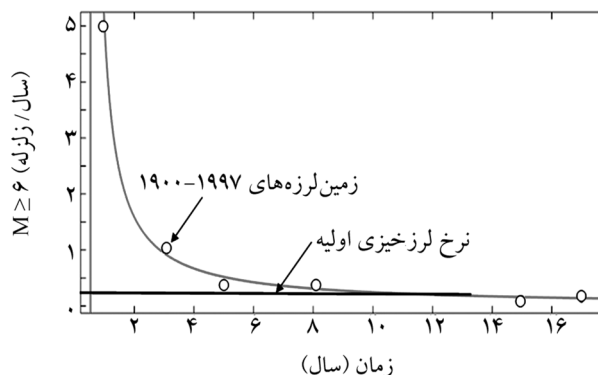
$$RateCH = \mu Av / 10^{1.5M_w + 16.05} \quad (8)$$

در رابطه فوق،  $\mu$  مدول برشی (برابر با  $3/2 \times 10^4$  مگا پاسکال در نظر گرفته شده است)،  $A$  مساحت گسل،  $v$  نرخ لغزش و  $M_w$  بزرگای مشخصه در هر منبع لرزه ای است [20]. مساحت گسل که به صورت حاصل ضرب طول گسیختگی در عرض گسیختگی تعریف می شود؛ به دلیل عدم دسترسی به مقادیر صریح برای طول و عرض گسیختگی، از روابط تجربی ولز و کاپراسمیت [21] استفاده شد. خداوردیان و همکاران [22] در قسمتی از مطالعات خود، مقادیر نرخ لغزش بلندمدت را در گسل های شناخته شده در فلات ایران ارائه کردند. در شرق ایران سهم خزش کمتر از 30 درصد است لذا محافظه کارانه کل لغزش، لرزه ای فرض شده است. در این مطالعه زمین لرزه با بزرگای گشتاوری بزرگ تر یا مساوی 6 به عنوان زمین لرزه مشخصه در نظر گرفته شده است.

$$t_a = A\sigma / \xi \quad (9)$$

کلیه پارامترهای استفاده شده در محاسبه احتمال رخداد زمین‌لرزه‌های آینده مطابق با جدول (3) در نظر گرفته شد. زمین‌لرزه 20 اردیبهشت 1376 آخرین زمین‌لرزه‌ای است که در گسل آبیز اتفاق افتاده است؛ بنابراین گسل آبیز در محاسبات در نظر گرفته نشد. زلزله 16 ژانویه 1979 را نمی‌توان به هیچ گسلی نسبت داد؛ بنابراین در محاسبات لحاظ نشده است.

نتایج نهایی احتمالات در 10، 30 و 50 سال آینده برای ضریب تغییرات 0/5 و 0/75 در جداول (4) تا (6) نشان داده شده است. احتمال رخداد زمین‌لرزه‌های آینده (P) در گسل‌های منطقه بدون در نظر گرفتن تغییرات تنش، احتمال رخداد (P\_mod) با در نظر گرفتن



شکل (6): محاسبه مدت‌زمان مؤثر پس‌لرزه‌ها. زمین‌لرزه‌ها از سال 1900 تا 1997 در منطقه با  $M \geq 6$  برحسب زمان، به صورت دایره‌هایی رسم شده است و بهترین منحنی برازش شده بر این داده‌ها، به صورت منحنی قرمز رنگ نمایش داده شده و نرخ لرزه‌خیزی اولیه در این بازه زمانی به صورت خط افقی رسم شده است. از تلاقی خط افقی و منحنی، مدت‌زمان مؤثر برابر با 11/3 سال به دست آمده است.

جدول (3): پارامترهای مورد استفاده در محاسبه احتمالات

منبع لرزه‌ای	آخرین زمین-لرزه	نرخ تنش تکتونیکی (مگا پاسکال/سال)	حداکثر تغییرات تنش کولمب (مگا پاسکال)	متوسط زمان بازگشت (سال)	$A\sigma$ (مگا پاسکال)
دشت بیاض شرقی	1979/11/27	0/0058	5/0760	472/5	0/0658
دشت بیاض غربی	1968/8/31	0/0055	-0/0014	472/5	0/0623
طبس	1978/9/16	0/0016	0/0015	2132/3	0/0176
فردوس	1968/9/01	0/0044	0/0051	3067/8	0/0186

جدول (4): نتایج احتمال رخداد زمین‌لرزه در 10 سال آینده شروع از سال 2015

منبع لرزه‌ای	$\Delta t$					
	P_trans(%)		P_mod(%)		P(%)	
	$\alpha = 0/75$	$\alpha = 0/5$	$\alpha = 0/75$	$\alpha = 0/5$	$\alpha = 0/75$	$\alpha = 0/5$
دشت بیاض شرقی	2/903	5/467	2/721	4/701	0/009	0
دشت بیاض غربی	0/049	0	0/050	0	0/054	0
طبس	0	0	0	0	0	0
فردوس	0	0	0	0	0	0

جدول (5): نتایج احتمال رخداد زمین‌لرزه در 30 سال آینده با شروع از سال 2015

منبع لرزه‌ای	$\Delta t$					
	P_trans(%)		P_mod(%)		P(%)	
	$\alpha = 0/75$	$\alpha = 0/5$	$\alpha = 0/75$	$\alpha = 0/5$	$\alpha = 0/75$	$\alpha = 0/5$
دشت بیاض شرقی	7/856	14/556	7/928	13/453	0/190	0
دشت بیاض غربی	0/465	0/0026	0/469	0/0027	0/486	0/0029
طبس	0	0	0	0	0	0
فردوس	0	0	0	0	0	0

جدول (6): نتایج احتمال رخداد زمین لرزه در 50 سال آینده با شروع از سال 2015

$\Delta t$						منبع لرزه‌ای
P_trans(%)		P_mod(%)		P(%)		
$\alpha = 0/75$	$\alpha = 0/5$	$\alpha = 0/75$	$\alpha = 0/5$	$\alpha = 0/75$	$\alpha = 0/5$	
12/377	22/503	12/839	21/403	0/914	0/011	دشت بیاض شرقی
1/589	0/035	1/600	0/036	1/637	0/038	دشت بیاض غربی
0	0	0	0	0	0	طبس
0	0	0	0	0	0	فردوس

#### 5- نتیجه‌گیری

زمین لرزه مهم‌ترین خطر طبیعی است و هر ساله شمار کثیری از جمعیت جهان گرفتار اثرات نامطلوب آن می‌شوند. با رشد روزافزون مراکز شهری، آسیب‌پذیری ناشی از پیامدهای زلزله به خصوص در مناطق لرزه‌خیز رو به گسترش است. در مناطق لرزه‌خیز هرگونه تصمیم‌گیری در مورد سازه‌های جدید و یا سازه‌های موجود با در نظر گرفتن اثرات زلزله‌های احتمالی آینده انجام می‌گیرد که اطلاعات لازم برای این منظور از تحلیل خطر لرزه‌ای به دست می‌آید. شرق ایران از لحاظ لرزه‌زمین ساخت در ناحیه‌ی لرزه‌زمین ساخت ایران مرکزی و شرق ایران قرار دارد و تحت تأثیر نیروهای تکتونیکی، نسبتاً فعال می‌باشد بنابراین سطح بالایی از فعالیت‌های لرزه‌ای را نشان می‌دهد؛ بنابراین جهت کاهش تلفات جانی و اقتصادی و نیز تبعات اجتماعی برآورد قابل اعتمادی از خطر زمین لرزه در این منطقه بر اساس دانش کنونی و آخرین دستاوردها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نظر گرفتن تأثیر تغییرات تنش ناشی از زلزله‌های گذشته بر احتمال وقوع زلزله‌های آینده دارای اهمیت است. ما در این مطالعه، اثرات گذرا و دائمی تغییرات تنش کولمب ناشی از زمین لرزه 20 اردیبهشت 1376 قائن - بیرجند را در مدل احتمالاتی وابسته به زمان مورد بررسی قرار دادیم. برای این منظور ابتدا برای هر یک از گسل‌های منطقه، حداکثر تغییرات تنش کولمب ناشی از زمین لرزه‌ی 20 اردیبهشت 1376 قائن - بیرجند با استفاده از نرم‌افزار 3.3 Coulomb محاسبه شد، سپس احتمال رخداد زمین لرزه‌ی آینده در 10، 30 و 50 سال آینده با شروع از سال

تأثیر دائمی تغییرات تنش، احتمال رخداد (P\_trans) با در نظر گرفتن تأثیر دائمی و گذرای تغییرات تنش انجام شده است.

#### 4- بحث

مقادیر مثبت و منفی برای تغییرات تنش کولمب به ترتیب نشان‌دهنده‌ی بارگذاری و باربرداری در سطح گسل می‌باشد و در نتیجه آن گسل به ترتیب به شکست نزدیک‌تر و دورتر می‌شود. با توجه به مقادیر حداکثر تغییرات تنش کولمب در جدول (3)، این مقادیر در گسل‌های دشت بیاض شرقی، طبس و فردوس مثبت است و در گسل دشت بیاض غربی، این پارامتر دارای مقداری منفی است. در گسل فردوس و گسل طبس به دلیل دور بودن از محل زمین لرزه قائن - بیرجند، تغییرات تنش ایجاد شده در آن‌ها کمتر بوده و به دلیل اینکه مدت زمان سپری شده در مقایسه با متوسط زمان بازگشت زمین لرزه بر روی این گسل‌ها کوچک‌تر است، مقادیر به دست آمده از مدل احتمالاتی بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است. در مقابل در گسل دشت بیاض شرقی به دلیل اینکه زمین لرزه قائن - بیرجند در نزدیکی این گسل رخ داده، باعث ایجاد تغییر تنش بالایی در آن شده است. مقدار منفی تغییرات تنش کولمب ایجاد شده در گسل دشت بیاض غربی باعث تأخیر در شکست آن و در نتیجه باعث کاهش نتایج احتمالات با در نظر گرفتن اثر دائمی و مجموع اثر دائمی و گذرا کمتر از نتایج احتمالات بدون در نظر گرفتن تغییرات تنش کولمب شده است و در گسل دشت بیاض شرقی و غربی، با نزدیک شدن زمان سپری شده به متوسط زمان بازگشت زمین لرزه بر روی این گسل‌ها، مدل احتمالاتی مقادیر بالایی را نشان می‌دهد.



- earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**(6), 2233-2250.
8. Yakovlev, G., Turcotte, D.L., Rundle, J.B., and Rundle, P.B. (2006) Simulation-based earthquake recurrence times on the San Andreas fault system. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96**(6), 1995-2007.
  9. U.S. Geological Survey (1988) *Working Group on California Earthquake Probabilities: Probabilities of Large Earthquake Occurring in California on the San Andreas Fault*. U.S. Geol. Open File Rep, 88-398, 62 pp.
  10. King, G.C.P., Stein, R.S., and Lin, J. (1994) Static stress changes and the triggering earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **84**(3), 935- 953.
  11. Stein, R., Barka, A., and Dieterich, J. (1997) Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys. J. Int.*, **128**(3), 594-604.
  12. Dieterich, J. (1994) A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *J. Geophys. Res.*, **99**(B2), 2601-2618.
  13. Walker, R., Bergman, E.A., Szeliga, W., and Fielding, E.J. (2011) Insights into the 1968–1997 Dasht-e-Bayaz and Zirkuh earthquake sequences, eastern Iran, from calibrated relocations, InSAR and high-resolution satellite imagery. *Geophys. J. Int.*, **187**(3), 1577-1603.
  14. Walker, R. Jackson J. and Baker, C. (2004) Active faulting and seismicity of the Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran. *Geophys. J. Int.*, **157**(1), 265–282.
  15. Hartzell, S. and Mendoza, C. (1991) Application of an iterative least-squares waveform inversion of strong-motion and teleseismic records to the 1978 Tabas, Iran, earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **81**(2), 305-331.
  16. Jackson, J. (2001) Living with earthquakes: know your faults. *J. Earthq. Eng.*, **5**(1), 5-123.
  17. Walker, R. Jackso, J., and Baker, C. (2003) Surface expression of thrust faulting in eastern Iran. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**(6), 2233-2250.
  18. Yakovlev, G., Turcotte, D.L., Rundle, J.B., and Rundle, P.B. (2006) Simulation-based earthquake recurrence times on the San Andreas fault system. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96**(6), 1995-2007.
  19. U.S. Geological Survey (1988) *Working Group on California Earthquake Probabilities: Probabilities of Large Earthquake Occurring in California on the San Andreas Fault*. U.S. Geol. Open File Rep, 88-398, 62 pp.
  20. King, G.C.P., Stein, R.S., and Lin, J. (1994) Static stress changes and the triggering earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **84**(3), 935- 953.
  21. Stein, R., Barka, A., and Dieterich, J. (1997) Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys. J. Int.*, **128**(3), 594-604.
  22. Dieterich, J. (1994) A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *J. Geophys. Res.*, **99**(B2), 2601-2618.
  23. Walker, R., Bergman, E.A., Szeliga, W., and Fielding, E.J. (2011) Insights into the 1968–1997 Dasht-e-Bayaz and Zirkuh earthquake sequences, eastern Iran, from calibrated relocations, InSAR and high-resolution satellite imagery. *Geophys. J. Int.*, **187**(3), 1577-1603.
  24. Walker, R. Jackson J. and Baker, C. (2004) Active faulting and seismicity of the Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran. *Geophys. J. Int.*, **157**(1), 265–282.
  25. Hartzell, S. and Mendoza, C. (1991) Application of an iterative least-squares waveform inversion of strong-motion and teleseismic records to the 1978 Tabas, Iran, earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **81**(2), 305-331.
  26. Jackson, J. (2001) Living with earthquakes: know your faults. *J. Earthq. Eng.*, **5**(1), 5-123.
  27. Walker, R. Jackso, J., and Baker, C. (2003) Surface expression of thrust faulting in eastern Iran. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**(6), 2233-2250.
- نتیجه‌ای که می‌توان از این مطالعه گرفت این است که به کارگیری یک مدل احتمالاتی وابسته به زمان و در نظر گرفتن تغییرات تنش ممکن است بر روی احتمال وقوع حوادث در منابع لرزه‌ای منطقه، تأثیر بگذارد؛ به طوری که با در نظر گرفتن تغییرات تنش کولمب:
- 1- احتمال وقوع حوادث آینده در گسل دشت بیاض شرقی افزایش یافته است.
  - 2- احتمال وقوع زمین‌لرزه‌های آینده در گسل دشت بیاض غربی کاهش پیدا کرده است.
  - 3- احتمال وقوع حوادث آینده در گسل طبس و فردوس تغییر نکرده است.

#### مراجع

1. Toda, S. (1998) Stress transferred by the 1995 Mw=6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *J. Geophys. Res.*, **103**(B10), 24543–24565.
2. Parsons, T. (2004) Recalculated probability of  $M \geq 7$  earthquakes beneath the Sea of Marmara, Turkey. *J. Geophys. Res.*, **109**(B5), 1-21.
3. Console, R., Murru, M., and Falcone, G. (2010) Perturbation of earthquake probability for interacting faults by static Coulomb stress changes. *J. Seismol.*, **14**(1), 67–77
4. Rikitake, T. (1974) Probability of earthquake occurrence as eastimated from crustal strain. *Tectonophysics*, **23**(3), 299-312.
5. Hagiwara, Y. (1974) Probability of earthquake occurrence as obtained from a Weibull distribution analysis of crustal strain. *Tectonophysics*, **23**(3), 313-318.
6. Zöller, G. and Hainzl, S. (2007) Recurrence time distributions of large earthquakes in a stochastic model for coupled fault systems: the role of fault interaction. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **97**(5), 1679-1687.
7. Matthews, M.V., Ellsworth, W.L., and Reasenber, P.A. (2002) A Brownian model for recurrent

- Iran: source parameters and surface deformation of the 1978 Tabas and 1968 Ferdows earthquake sequences. *Geophys. J. Int.*, **152**(3), 749-765.
18. Berberian, M. Jackson, J.A. Qorashi, M. Khatib, M.M. Priestley, K. Talebian, M. and Ghafuri-Ashtiani, M. (1999) The 1997 May 10 Zirkuh (Qa'emat) earthquake (Mw 7.2): faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran. *Geophys. J. Int.*, **136**(3), 671-694.
  19. Akinci, A. Murru, M. Consol, R. Falcone, G., and Pussi, S. (2014) Implications of earthquake recurrence models to the seismic hazard estimates in the marmara region, turkey. *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul Aug 25-29.
  20. Field, E.H. Johnson, D.D., and Dolan, J.F. (1999) A mutually consistent seismic-hazard source model for Southern California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **89**(3), 559-578.
  21. Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **84**(4), 974-1002.
  22. Khodaverdian, A. Zafarani, H., and Rahimian, M. (2015) Long term Fault slip rates, distributed deformation rates and forecast of seismicity in the Iranian Plateau. *Tectonics*, Accepted.

### اصطلاحات فنی

- |                                |                                 |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Brownian Passage Time          | 1- مدل فیزیکی وابسته به زمان    |
| Renewal Model                  | 2- مدل‌های تکرار                |
| Characteristics Earthquakes    | 3- زمین‌لرزه‌های بزرگ یا مشخصه  |
| Perfectly Periodic Earthquakes | 4- چرخه‌ی زلزله‌ی کاملاً تناوبی |
| Clustered Occurrence           | 5- قالب خوشه‌ای                 |

## Effect of Coulomb Stress Changes on Time-Dependent Model in East of Iran

Samira Sorkhvandi<sup>1</sup>, Hamid Zafarani<sup>2</sup>, and Abbas Ghalandarzadeh<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, Corresponding Author, e-mail: h.zafarani@iiees.ac.ir
3. Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

In recent years, many models for earthquake recurrence were proposed. The methodology adopted in this study is based on the fusion of the statistical renewal model called Brownian passage time (BPT) with a physical model. The later taking into account the instantaneous change of the static Coulomb stress ( $\Delta CFF$ ) for the computation of both the permanent and the transient effects of earthquakes occurring on the surrounding sources. Renewal models are frequently used to estimate the long-term time-dependent probability of the next large earthquake on specific faults or fault segments where large shocks occur repeatedly at approximately regular intervals. In this approach, it is assumed that the times between consecutive large earthquakes (inter-event times or recurrence intervals) follow a certain statistical distribution.

East of Iran experienced more than ten destructive historical earthquakes and 14 instrumental earthquakes with magnitudes larger than 5.5 ( $M_w$ ). Two of these events by  $M_w > 7.1$  occurred in east and west of the Dasht e Bayaz fault. This fault by east-west trend in west segment is perpendicular to the Abiz fault that experienced one of the most destructive earthquakes ( $M_w = 6.2$ ) in this region. Both mentioned faults have strike-slip mechanism, but the largest event ( $M_w = 7.3$ ) occurred on the Tabas fault that showed a reverse mechanism. Because of the high potential of a large earthquake occurrence, we decided to use the BPT model in this area and calculate the probability of future events on the Tabas, and Ferdows faults, and east and west segments of the Dasht e Bayaz fault.

The analysis has been carried out on East (Dasht e Bayaz-Ferdows region) of Iran ( $32-35^\circ$  N;  $56-61^\circ$  E), containing four seismogenetic sources. In this study, we adopt the BPT distribution to represent the inter-event time probability distribution for earthquakes on individual sources. Unlike all the other renewal models, which are based only on an arbitrary choice of the probability density distribution, the BPT is associated to considerations on the fault physical properties [1]. For this model, in addition to the expected mean recurrence time, the coefficient of variation (also known as aperiodicity)  $\alpha$  of the inter-event times is required. If  $\alpha > 1$ , the time series will exhibit clustering properties. Values below the unit indicate the possible presence of periodicity, with increasing regularity for decreasing  $\alpha$ . In this study, we considered 0.5 and 0.75 for  $\alpha$ .

By using the probability density function and the time of the last event, we will be able to compute the probability of an event that occurs between time  $t$  and  $t + \Delta t$ . This renewal process assumes that the occurrence of a characteristic event is independent of any external perturbation, but in real circumstances, earthquake sources may interact. Therefore, we consider fault interaction by the computation of the Coulomb stress change ( $\Delta CFF$ ) caused by Birjand-Qaen earthquake (May 10, 1997) on the investigated fault. For this purpose, we used the Coulomb stress Change function that used by King et al [2]. For calculation of imposed stress, we used an amount of 0.4 as an effective coefficient of friction because for faults in the continental region, it is the best choice [3].

The permanent effect of Coulomb stress changes on the probability of an impending characteristic event can be approached from two points of view [4]: (1) Modification of the elapsed time since the previous earthquake, and (2) Modification of the expected mean recurrence time. Both of these approaches have the same effect, and in this

study, we used the first approach. We need to consider the transient effect, due to rheological properties of the slipping faults. The application of the Dieterich [4] constitutive friction law to an infinite population of faults leads to the expression of the seismicity rate as a function of time after a sudden stress change. The transient effect of the stress change is expressed as a change in expected rate of the segment events [4].

By considering East of Iran, as a study area that had been limited by the rectangle of coordinates 32–35° N and 56–61° E, and assuming an earth model such as a half space characterized by uniform elastic properties, we calculated the maximum amount of imposed Coulomb stress changes due to Birjand-Qaen on the East and west Dasht e Bayaz, Tabas and Ferdows faults and the obtained amounts are 5.076, - 0.0014, 0.0015 and 0.0051 Mpa, respectively.

The computation of the occurrence conditional probability of future earthquakes would require the knowledge of the mean recurrence time of characteristic earthquakes ( $T_r$ ), aperiodicity, the time elapsed since the previous earthquake, and tectonic stressing rate. By using the relation given by Field et al [5], we computed  $T_r$ . In this study,  $M_w \geq 6$  has been considered as the characteristic magnitude. Khodaverdian et al [6] calculated shear strain rate for the Iranian Plateau. The values of the average shear strain rate have been used for the computation of  $\dot{\tau}$  multiplying it by  $\mu$ . The computation of the probability connected to the transient effect, combined with the permanent effect would require the knowledge of the aftershock duration ( $t_a$ ) and  $A\sigma$ . The values of the aftershock duration has been obtained 11.32 year. By using the relation given by Dieterich [4] we computed  $A\sigma$ .

Positive coulomb stress changes indicate loading on receiver fault and brings it to fracture and negative Coulomb stress changes unloads the receiver fault, and there will be a delay time on the future event on that fault. Obtained results showed that East Dasht e Bayaz, Tabas and Ferdows faults received positive coulomb stress changes, and West Dasht e Bayaz fault received negative amount of imposed Coulomb stress changes. For the Ferdows and Tabas faults, the received Coulomb stress changes are less because of the large distance from the epicenter of the Birjand-Qaen earthquake, and thus the obtained amount from probability model is less and near to zero. On the other hand, we obtained high-imposed Coulomb stress changes for the East Dasht e Bayaz fault because the occurred Birjand-Qaen earthquake had a little distance from this fault. Imposed negative Coulomb stress changes on the West Dasht e Bayaz fault caused delay on the future event on this fault and reduced the probability on this fault a little.

**Keywords:** Coulomb Stress; Time-Dependent Model; Seismic Hazard; East of Iran.

## Reference

1. Zöller, G. and Hainzl, S. (2007) Recurrence time distributions of large earthquakes in a stochastic model for coupled fault systems: the role of fault interaction. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **97**(5), 1679-1687.
2. King, G.C.P., Stein, R.S., and Lin, J. (1994) Static stress changes and the triggering earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **84**(3), 935-953.
3. Stein, R., Barka, A., and Dieterich, J. (1997) Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys. J. Int.*, **128**(3), 594-604.
4. Dieterich, J. (1994) A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *J. Geophys. Res.*, **99**(B2), 2601-2618.
5. Field, E.H., Johnson, D.D., and Dolan, J.F. (1999) A mutually consistent seismic-hazard source model for Southern California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **89**(3), 559-578.
6. Khodaverdian, A. Zafarani, H., and Rahimian, M. (2015) Long term Fault slip rates, distributed deformation rates and forecast of seismicity in the Iranian Plateau. *Tectonics*, **34**(10), 2190-2220.