

# مدل خطی المان محدود در انگیزش لغزش گسلی مجاور با سدها

پویا صادقی فرشلاف<sup>۱</sup>، محمد مهدی خطیب<sup>۲</sup> و حمید نظری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۱۷

## چکیده

هدف از این مطالعه بررسی لغزش ناشی از انگیزش گسل در نتیجه آشفستگی تنش توسط شکست هیدرولیکی است. ضرورت این بحث، مشاهده آثار مخرب ساخت سد در مکان‌های همسایه با گسل‌های سطحی است. برای این منظور، از برنامه‌نویسی Matlab و سامانه نگاشت SimDesigner بهره گرفته می‌شود. پس از تعریف گره‌ها برای سطوح شکستگی، تنش‌های نقطه‌ای اعمال می‌شوند. با تعیین گسل، تحلیل‌ها در مسیر تعدیل تنش برای رسیدن به یک حالت موازنه حرکت می‌کنند. با تعریف نیروهای واکنشی در شرایط مرزی امکان قیاس تغییر مکان گرهی فراهم می‌شود. تنش اولیه عمودی بر پایه قرارگیری لایه بالایی سنگی و تنش افقی با پیروی از معیار شکست کولمب به دست می‌آید. آشفستگی تنش توسط یک شکستگی کششی و بر پایه تئوری مدل تنش انتهایی درزی به دست آمد. با ترکیب تنش شکستگی و تنش منطقه، شرایط اولیه بررسی لغزش و بزرگای زمین لرزه مرتبط مشخص می‌شود. نتیجه این محاسبات مقدار برابر با ۲ متر برای لغزش تجمعی بیشینه در طول گسل مجاور با شکست هیدرولیکی است. این مقدار لغزش در طول گسل بر پایه محاسبات بزرگای زمین لرزه لحظه‌ای، معادل با یک زمین لرزه به بزرگای حدود ۳/۸ به دست می‌آید. این کار در آینده نیازمند افزایش دقت لغزش گرهی و بهینه‌سازی اجزای محدود برای بالا بردن نتایج پژوهش است.

**کلیدواژه‌ها:** انگیزش لغزش گسل، آشفستگی تنش، شکست هیدرولیکی.

**\*نویسنده مسئول:** پویا صادقی فرشلاف

E-mail: pouya.sadeghi@birjand.ac.ir

## ۱- پیش‌نویس

از سوی دیگر، احتمال فرار بیشتر آب‌های سفره‌های زیر زمینی در نتیجه ایجاد شکستگی‌ها و لغزش‌های تحمیلی قابل توجه است که این بحث اهمیت دیگر این مطالعات به شمار می‌رود. امروزه شکست هیدرولیکی به صورت فزاینده‌ای برای گسترش شکستگی‌های غیر معمول مخازن طبیعی و سدها در سراسر جهان مورد بررسی و استفاده قرار می‌گیرد. این افزایش استفاده سبب افزایش انتشارات مربوط به پتانسیل زمین لرزه‌های القایی شده است. بنابراین، هدف مطالعه کنونی، بررسی لغزش ضمنی گسل توسط آشفستگی ناشی از تنش شکست هیدرولیکی است.

## ۲- تئوری

بر پایه روابط Van der Pluijm & Marshak (2004) و Harris (1998)، ثبات گسل با استفاده از معیار شکست کولمب قابل تعریف است. این معیار از رابطه اصلی مور- کولمب قابل استنتاج است:

$$\sigma_s = C + \mu(\sigma_n - P_f) \quad (1)$$

که در آن  $\sigma_s$  تنش برشی،  $(\sigma_n - P_f)$  تنش مؤثر،  $\mu$  ضریب اصطکاک و  $\sigma_n$  تنش عادی روی گسل است. رابطه ۱ را می‌توان به صورت دیگر نوشت:

$$C = \sigma_s - \mu(\sigma_n - P_f) \quad (2)$$

و با در نظر گرفتن شرایط شکست در حالت:

$$\sigma_s \geq C + \mu(\sigma_n - P_f) \quad (3)$$

و شرایط ثبات در حالت:

$$\sigma_s < C + \mu(\sigma_n - P_f) \quad (4)$$

می‌توان گفت که با توجه به رابطه ۲ مقادیر منفی C نشانگر شرایط ثبات و مقادیر مثبت بیانگر شرایط عدم ثبات هستند که نشان از رخداد لغزش دارد. بنابراین می‌توان در کدنویسی از مقدار C به عنوان یک معیار در زمینه رخداد لغزش استفاده کرد:

$$C > 0 \rightarrow \text{Failure} \quad C < 0 \rightarrow \text{Stable} \quad (5)$$

انگیزش گسل یکی از موارد اصلی در بروز رفتارهای غیرقابل کنترل گسل است که تبعات مخرب از جمله زمین لرزه‌های ناخواسته را به همراه دارد. گسترش سدسازی در محور رودخانه‌های اصلی، طی چند دهه گذشته افزون بر ایجاد مشکلات بسیار، از دید منابع آبی برای حوضه‌های آبریز، جنبه‌های بحرانی دیگری داشته که کمتر به آن پرداخته شده است. مطالعات غیر اصولی در مکان‌یابی ساخت سد از یک سو و نبود مراقبت‌های درست پس از ساخت سد از سوی دیگر سبب نشت آب به درون لایه‌های زمین می‌شود. این امر سبب بروز رفتارهای جنبشی زمین و رخداد زمین لرزه‌های گاه تهدید کننده می‌شود. شاید رویداد این رخدادها از دید مطالعات لرزه‌خیزی کمتر مد نظر قرار گیرد؛ ولی در زمینه همسایگی با سدها و مناطق حساس صنعتی و اتمی کاملاً دارای اهمیت است و مطالعات دقیقی را می‌طلبد. موضوع انگیزش زمین لرزه‌ها توسط تزریق مایعات از سال ۱۹۶۲ به بعد مطرح شد که ارتش آمریکا مقادیر هنگفتی از مایعات را به ژرفای حدود ۳۹۷۱ متری چاه‌های ژرف در بستر کوه‌های سنگی زرادخانه کلرادو تزریق کرد (Hsieh & Bredehoeft, 1981). در نتیجه این پروژه زمین لرزه‌هایی با بزرگای بیش بر ۵/۳ در مقیاس ریشتر ایجاد شد و از آن زمان، پژوهشگران به روش‌های سنتی و نوین مطالعاتی را در این زمینه انجام داده‌اند (Hollister & Weimer, 1968; Ohtake, 1974; Fletcher & Sykes, 1977; Pearson, 1981; Talwani & Acree, 1985; Simpson et al., 1988; Zoback & Gorelick, 2012). تزریق مایعات می‌تواند میداین تنش را آشفته و شکستگی‌های جدید و همچنین روی گسل‌های از پیش موجود لغزش ایجاد کند. تجربه نشان داده است که بیشتر داده‌های چنین زمین لرزه‌هایی دارای بزرگای کوچک و حدود ۱ هستند (Suckale, 2010). نمونه‌های دیگر شامل میدان اوولا در اوکلاهاما با زمین لرزه‌ای به بزرگای حدود ۲/۸ ریشتر (Holland, 2011) و هورن‌رویر در کانادا با زمین لرزه‌ای به بزرگای حدود ۳/۸ ریشتر است (BC Oil and Gas Commission., 2012). شاید احتمال آسیب ناشی از این زمین لرزه‌ها کم باشد اما غیر محتمل هم نیست.

در افزونه SimDesigner که یک حلگر تحلیلی اجزای محدود به صورت دینامیک چندمجموعه‌ای (multi-body) است وارد می‌شوند. یکی از مهم‌ترین دلایل انتخاب این سامانه، پشتیبانی از اجسام غیرصلب برای محاسبه تغییر مکان‌ها و تنش‌ها به عنوان یکی از نتایج شبیه‌سازی است. در بحث آماده‌سازی، یک مقطع از لایه رسوبی با ژرفای ۵۰۰ متر و بستر سنگی به ژرفای ۱ کیلومتر عمود بر امتداد اصلی یک قطعه گسلی (Fault segment) عادی و راست گرد با زاویه شیب ۴۵ درجه در پوسته بالایی در نظر گرفته می‌شود. برای اعمال بارهای افقی و عمودی منطقه، شرایط مرزی متناسب با ویژگی‌های مکانیکی زمین تعیین می‌شود. بنابراین یک گسترده‌گی جانبی برابر ۲ کیلومتر و گسترده‌گی ژرفایی برابر ۱/۵ کیلومتر برای مدل اولیه در نظر گرفته می‌شود. با این حال، تحلیل‌ها در بلوک بخش‌بندی شده انجام می‌پذیرند. برای بهینگی تحلیل در گسل‌های جهت‌دار، ضریب اصطکاک روی گسل برابر با ۰/۶ در نظر گرفته می‌شود (Wu & Hasegawa, 1996). شکست هیدرولیکی در ژرفای ۱/۲ کیلومتری با ۵۰ متر طول و در شرایط موازی با صفحه اصلی گسل مکان‌یابی می‌شود. بخش‌بندی بلوک اولیه و ضرایب رئولوژی اعمال شده شامل مدول یانگ، نسبت پواسون و چگالی هر لایه در شکل ۱ نشان داده شده است.

برای بررسی لغزش گسل ناشی از آشفته‌گی تنش‌ی ایجاد شده توسط عوامل مضاعف، از یک فرایند دومرحله‌ای استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در بیشتر نرم‌افزارهای تحلیلی امکان محاسبه لغزش گسلی در شرایط اولیه وجود ندارد، با تعریف رابطه ۱۲ و تعیین تغییرات تنش از سوی شکستگی‌های کششی، ابتدا یک همبستگی میان گسل و مدل ایجاد می‌شود؛ به گونه‌ای که امکان لغزش گسل را سلب کند و اجازه تطبیق تنش داده شود. سپس با استفاده از نیروهای واکنشی تمام گره‌ها در مدل ثابت می‌شوند تا مراحل تطبیق تنش کامل شود. در این شرایط می‌توان نیروهای واکنشی را در هر گره ایجاد کرد تا تعادل حاکم شود. برای این منظور از یک نسخه متنی شماره‌دار برای گره‌ها استفاده شد. هر چند با ایجاد همبستگی میان گسل و مدل، شرایط تنش اولیه تغییر می‌یابد و نیز تغییر شکل‌هایی در مدل اعمال می‌شود، اما شرط‌گذاری گره‌ها برای انطباق زوج گره‌ها مانع از انحراف تحلیل خواهد شد. در این مرحله، تنش عمودی و افقی منطقه به دست می‌آید. در ادامه ماتریس آشفته‌گی تنش میانگین ناشی از شکستگی به هر المان افزوده می‌شود.

در این مدل‌سازی، از اجزای چهارگوش کرنش مسطح با چهار گره استفاده می‌شود. سپس میان گسل و مدل به گونه‌ای که گره‌ها در دو سوی گسل جابه‌جایی نسبی نداشته باشند یک همبستگی ایجاد می‌شود. سپس همه گره‌ها ثابت و تنش اولیه اعمال می‌شود. در این لحظه همه نیروهای واکنشی ایجاد می‌شوند. در مرحله بعد، تنش‌های پیشین و همچنین نیروهای واکنشی که در مرحله پیش ایجاد شده بودند تعریف می‌شوند. بنابراین نیروهای واکنشی روی هر گره بارگذاری می‌شوند. پس از فرایند بارگذاری، گسل برای محاسبات لغزش آزاد می‌شود. فرایند این محاسبات بر پایه مقیاس مدل و فواصل جفت گره‌های درگیر است.

همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، زمانی که مدل شامل یک آشفته‌گی تنش اضافی ناشی از شکست هیدرولیکی باشد، بیشینه خطوط هم‌لغزش تجمعی روی گسل حدود ۲ متر خواهد بود. یادآور می‌شود که این میزان لغزش به صورت تجمعی در مفهوم المان محدود گزارش شده است و بنابراین با مقدار لغزش کلی برابر نیست. یعنی برای ۵ گره در طول گسل، مقدار میانگین لغزش کلی برابر با ۴۰ سانتی‌متر خواهد بود. با توجه به این شکل، این بیشینه مقدار لغزش در بخش‌های میانی گسل دیده می‌شود. اما با بررسی سرعت لغزش و همچنین بازشدگی صفحات در طول تحلیل (به ترتیب شکل‌های ۳ و ۴)، به نظر می‌رسد فرایند لغزش تا اواسط زمان رخداد

تنش عمودی بیشینه را می‌توان برای منطقه ( $S_{vmax}$ ) در مورد فشار لایه سنگی بالایی در یک ژرفای معین بر پایه رابطه (2007) Twiss & Moores توصیف کرد:

$$S_{vmax} = \int \rho_{layer} g_{layer} dz - P_f \quad (6)$$

که در آن  $\rho_{layer}$  چگالی،  $g_{layer}$  شتاب گرانی و  $P_f$  تأثیر فضاهای فشار منفذی در سنگ است. با توجه به ژرفای مورد مطالعه از وجود حباب‌های هوا که معمولاً به همراه آب منفذی وجود دارند صرف‌نظر می‌شود و مقدار کم هوای احتمالی دارای رفتار نیوتنی همانند آب خواهد بود. تنش افقی بیشینه نیز مطابق روابط (2014) Steffen et al. به دست می‌آید:

$$S_{hmax} = \frac{S_v - [\mu - \mu \cos 2\theta + |\sin 2\theta| + 2C - 2\mu P_f]}{-[\mu \cos 2\theta + \mu - |\sin 2\theta|]} \quad (7)$$

که زاویه  $\theta$  وابسته به زاویه گسلی است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\theta = 90 - \alpha \quad (8)$$

که  $\alpha$  متمم زاویه گسلی  $\theta$  و برابر با زاویه میان خط شیب سطح گسلی با بردار تنش بیشینه است. در یک سامانه زمانی که محورهای کارترین دوعبده و جابه‌جایی گسلی در یک سطح منظور شوند و سطح گسل عمودی و شامل محور سوم باشد، میدادن تنش روی سطح گسل را می‌توان با زاویه برابر  $\psi$  از محور  $x$  به صورت زیر به دست آورد:

$$\sigma_{11} = \sigma_{xx} \cos^2 \psi + 2\sigma_{xy} \sin \psi \cos \psi + \sigma_{yy} \sin^2 \psi \quad (9)$$

$$\sigma_{33} = \sigma_{xx} \cos^2 \psi - 2\sigma_{xy} \sin \psi \cos \psi + \sigma_{yy} \cos^2 \psi \quad (10)$$

$$\tau_{12} = \frac{1}{2} (\sigma_{yy} - \sigma_{xx}) \sin 2\psi + \tau_{xy} \cos^2 \psi \quad (11)$$

اکنون می‌توان با فرض راست گرد بودن گسل انتخابی، تغییر تنش برای حرکات راست گرد  $\sigma_f^R$  را روی سطح جهت‌دار با زاویه  $\psi$  نسبت به محور  $x$  نوشت:

$$\sigma_f^R = \tau_{13}^R + \mu' \sigma_{33} \quad (12)$$

از سوی دیگر با تعمیم روابط تنش کششی بر پایه روابط (1964) Hoek می‌توان نوشت:

$$\sigma_c \xi_0 = 2\sigma_i \quad (13)$$

$$2\sigma_i = \frac{1}{2} [(\sigma_1 + \sigma_2) - (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\psi] \pm \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1^2 + \sigma_3^2) - (\sigma_1^2 - \sigma_3^2) \cos 2\psi]} \quad (14)$$

که در آن  $\sigma_i$  تنش کششی،  $\sigma_c$  قدرت چسبندگی و  $\xi_0$  متغیر شکلی شکستگی است. مطابق با روابط (1975) Lawn نیز می‌توان میدان تنش توسط شکستگی کششی را به صورت زیر به دست آورد:

$$\sigma_{11} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \theta \quad (15)$$

$$\sigma_{33} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos(\theta/2) [1 + \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2)] \quad (16)$$

$$\sigma_{22} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33}) \quad (17)$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{32} = 0 \quad (18)$$

که  $\theta$  و  $r$  به ترتیب برابر با زاویه و فاصله شعاعی از انتهای درز هستند.  $K_1$  نیز ضریب شدت تنش است که در یک سطح نامحدود با تنش یکنواخت  $\sigma$  و طول درز برابر با  $2a$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (19)$$

### ۳- اجرای مدل

یک مدل دوعبده کارترین برای این منظور و در مطالعات اولیه در نظر گرفته می‌شود. حل معادلات در محیط Matlab انجام می‌شود و مقادیر عددی حاصل

#### ۴- نتیجه گیری

در این مطالعه مقدماتی، تأثیر آشفته‌گی تنش ناشی از شکست هیدرولیکی روی لغزش در طول یک گسل انتخابی بررسی شد. برای این منظور از دو مرحله در قالب یک فرایند استفاده شد. نخست یک همبستگی میان گسل و مدل ایجاد شد که امکان لغزش گسل را سلب کند و سپس با استفاده از نیروهای واکنشی همه گره‌ها در مدل ثابت شدند تا مراحل تطبیق تنش کامل شود؛ در این مرحله پس از برقراری توازن، گسل آزاد می‌شود و مسیر محاسبات تحلیل مدل برای رسیدن به حالت تعادل پیش می‌رود. بیشینه لغزش گسل در این مدل برابر ۲ متر است که معادل با یک زمین لرزه با بزرگای ۳/۸ ریشتر برآورد می‌شود. همچنین نشان داده شد که میزان سرعت لغزش در بخش‌های میانی گسل بیشتر است و پس از گذشتن نصف زمان کامل رخداد، روبه کاهش می‌گذارد و وارد مرحله بازشدگی می‌شود (نمودار شکل‌های ۳ و ۴). همچنین بر پایه نمودار شکل ۴، مجموع زمان‌های رخداد بازشدگی از مجموع زمان‌های رخداد خردشدگی و حرکات مماسی بیشتر است. کارهای آتی نیازمند تعریف ویژگی‌های بیشتر لغزش گسل و هندسه شکستگی است. همچنین حساسیت و گستردگی بیشتر متغیرها و اجزای محدود در این محاسبات ضروری به نظر می‌رسد. بزرگای زمین لرزه محاسبه شده احتمالاً به علت در نظر نگرفتن شرایط اصطکاکی دقیق، دارای خطا و تصحیح آن نیازمند تعریف دقیق ویژگی‌های مکانیکی سطح گسل است.

سرعت ثابتی دارد و از این زمان به بعد مستهلک می‌شود و تراکم بازشدگی روی صفحه افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل ۱ و مقایسه نمودار سرعت لغزش در شکل ۲، می‌توان پیشنهاد داد که بیشترین میزان سرعت لغزش نیز در بخش‌های میانی صفحه گسل رخ داده است.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان برای تعیین بزرگای گشتاور زمین لرزه می‌توان از معادله (1979) Hanks & Kanamori استفاده کرد:

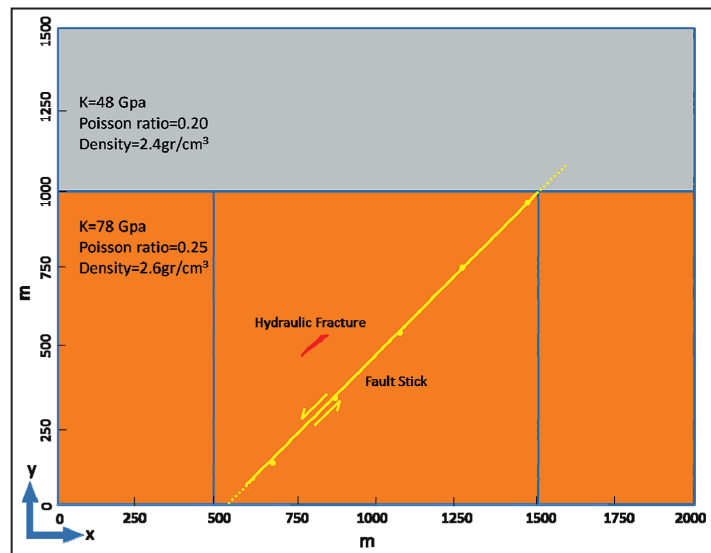
$$M = \frac{2}{3} [\log M_0 - 9.1] \quad (20)$$

که در آن  $M_0$  بزرگای لحظه‌ای است و بر پایه روابط (1995) Lay & Wallace به دست می‌آید:

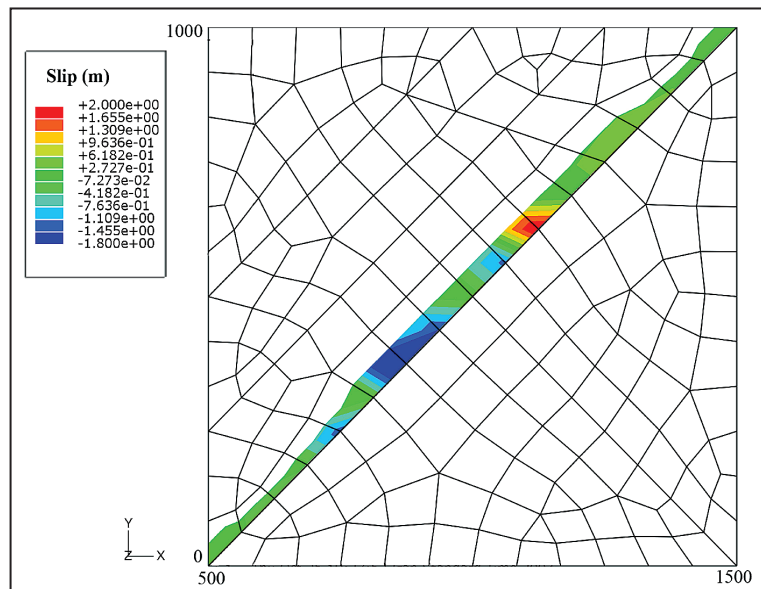
$$M_0 = \mu S u \quad (21)$$

که در آن  $\mu$  مقاومت برشی سنگ،  $S$  مساحت محدوده شکستگی و  $u$  مقدار لغزش روی گسل است. مساحت محدوده شکستگی با در نظر گرفتن عرضی برابر با ژرفای مطالعاتی در بک بلوک سه بعدی به دست می‌آید و مقدار مقاومت برشی در اینجا برابر با حدود ۷۵ گیگا پاسکال در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است که این مقدار با توجه به پیمایش صحرائی برای مناطق شکستگی قابل ارزیابی است. بنابراین، توسط روابط ۲۰ و ۲۱ مقدار لغزش به دست آمده در طول گسل معادل با زمین لرزه با بزرگای ۳/۸ ریشتر است.

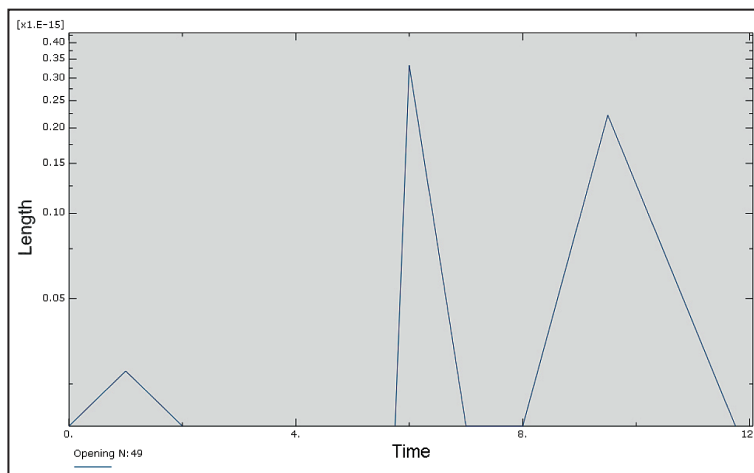
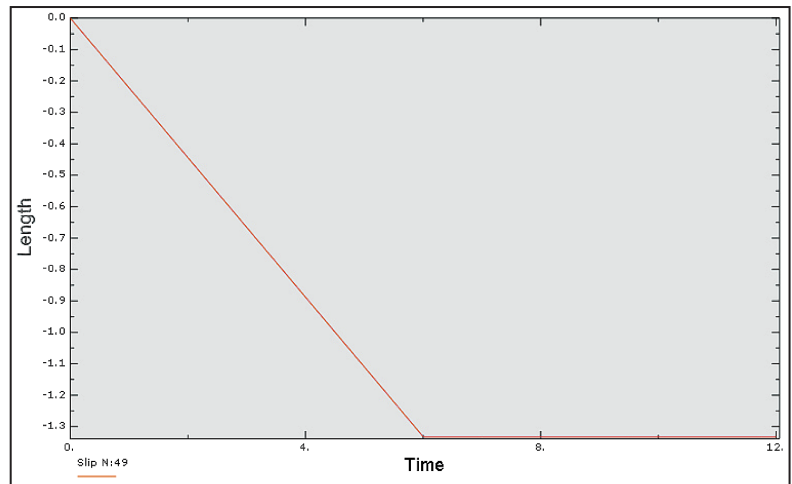
شکل ۱- بلوک بخش‌بندی شده بر پایه محدوده انتشار گسلی که نشانگر ۲ لایه با طول ۲ کیلومتر تا ژرفای پایانی ۱/۵ کیلومتری پوسته است. انتشار شبیهی گسل حدود ۱/۴ کیلومتر و شیب آن ۴۵ درجه است.



شکل ۲- مقدار لغزش تجمعی بیشینه گرهی برابر با ۲ متر روی گسل در نتیجه آشفته‌گی ناشی از شکست هیدرولیکی.



شکل ۳- نمودار سرعت لغزش تجمعی در طول اجرای تحلیل. سرعت لغزش تا نیمه زمانی تحلیل ثابت و مقدار لغزش تجمعی آن برابر با ۱/۳۵ متر روی صفحه گسل است.



شکل ۴- باز شدگی لگاریتمی صفحات گسل در طول اجرای تحلیل که در نیمه دوم تحلیل افزایش داشته است. همان گونه که مشخص است مجموع زمان‌هایی که بازشدگی رخ داده از مجموع زمان‌های خردشدگی و یا حرکات مماسی بیشتر است.

## References

- BC Oil and Gas Commission., 2012- Investigation of observed seismicity in the horn river basin. <http://www.bcogc.ca/investigation-observed-seismicity-horn-river-basin>
- Fletcher, J. B. & L. R. Sykes, 1977- Earthquakes Related to Hydraulic Mining and Natural Seismic Activity in Western New York State. *Journal of Geophysical Research*, 82(26), 13767-3780.
- Hanks, T. C. & Kanamori, H., 1979- A moment-magnitude scale: *J. Geophys. Res*, 84, 2348–2350.
- Harris, R. A., 1998- Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard: *Journal of Geophysical Research*, 103.
- Hoek, E., 1964- Fracture of Anisotropic Rock. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 64, 501-518.
- Holland, A., 2011- Examination of possibly induced seismicity from hydraulic fracturing in the Eola field, Garvin County, Oklahoma: *Oklahoma Geological Survey*.
- Hollister, J. C. & Weimer, R. J., 1968- Geophysical and Geological Studies of the Relationship Between the Denver Earthquakes and the Rocky Mountain Arsenal Well. *Quarterly Colorado School of Mines* 63(1): 1-251.
- Hsieh, P. A. & Bredehoeft, J. D., 1981- A reservoir analysis of the Denver earthquakes: a case of induced seismicity. *Journal of Geophysical Research* 86 (B2): 903-920.
- Lawn, B., 1975- Fracture of brittle solids, 2 ed.: New York: Cambridge University Press 204 p.
- Lay, T. & Wallace, T. C., 1995- Modern Global Seismology, Academic Press, San Diego, XII vol., 521 pp.
- Ohtake, M., 1974- Seismic Activity Induced by Water Injection at Matsushiro, Japan. *Journal of Physics of the Earth* 22: 163-176.
- Pearson, C., 1981- The Relationship Between Microseismicity and High Pore Pressures During Hydraulic Stimulation Experiments in Low Permeability Granitic Rocks. *Journal of Geophysical Research* 86: 7855-7864.
- Simpson, D. W., Leith, W. S. & Scholz, C. H., 1988- Two Types of Reservoir Induced Seismicity *Bulletin of the Seismological Society of America* 78: 2025-2040.
- Steffen, R., Wu, P., Steffen, H. & Eaton, D. W., 2014- On the implementation of faults in finite element glacial isostatic adjustment models: *Computers and Geoscience* 62: 150-159.
- Suckale, J., 2010- Moderate-to-large seismicity induced by hydrocarbon production. *The Leading Edge* 29(3): 310-319.
- Talwani, P. & Acree, S., 1985- Pore Pressure Diffusion and the Mechanism of Reservoir-induced Seismicity, *Pageoph* 122: 947-965.
- Twiss, R. & Moores, E., 2007- Structural geology, 2 ed.: W.H. Freeman and Company 736 p.
- Van der Pluijm, B. & Marshak, S., 2004- Earth Structure: An Introduction to Earth Structure and Tectonics, 2nd edition: W.W. Norton & Co., New York: 520 p.
- Wu, P. & Hasegawa, H. S., 1996- Induced stresses and fault potential in eastern Canada due to a disc load: a preliminary analysis: *Geophysical Journal International* 125: 415–430.
- Zoback, M. D. & Gorelick, S. M., 2012- Earthquake Triggering and Large-scale Geologic Storage of Carbon Dioxide. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America (PNAS)* 109(26): 10164-10168.

# Linear finite element model of fault slip triggering adjacent to dams

P. Sadeghi-Farshbaf <sup>1\*</sup>, M. M. Khatib <sup>2</sup> & H. Nazari <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Geology, University of Birjand, Birjand, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Geology, University of Birjand, Birjand, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

Received: 2015 January 11

Accepted: 2015 December 08

## Abstract

The aim of this research is to investigate triggering of fault slip due to stress perturbation caused by hydraulic fracturing. The importance of this issue is to study the observed destructive effects of dam construction at locations adjacent to the superficial faults. Therefore, we use the Matlab programming and SimDesigner system as an analytical extension. Concentrated stresses are applied after defining the nodes for fracture surfaces. By having the fault surface, analyses start to reach an equilibrium state. By defining the reaction forces in boundary condition, comparison of nodal dislocations become possible. The basis for vertical stress calculation is the upper rock layer and for horizontal stress is Coulomb failure stress. We estimate the stress perturbation through theory of tip stress about tensile fractures. The resultant stress field obtained from combination of fractural and regional stresses gives primary condition to study triggered fault slip and related earthquake magnitude. The results show a maximum 2 meters of cumulative slip along the fault surface close to the hydraulic fracturing. Based on moment magnitude of earthquake calculations, this slip gives a magnitude of 3.8 upon the Richter scale. This process needs the increased precision for nodal dislocations and optimized finite elements in order to better improve the future works.

**Keywords:** Triggering fault slip, Stress perturbation, Hydraulic fracturing.

For Persian Version see pages 281 to 284

\*Corresponding author: P. Sadeghi-Farshbaf; E-mail: pouya.sadeghi@birjand.ac.ir