

## بررسی اثر پارامترهای خاص گسلش و موقعیت مکانی ساختگاه بر مشخصات پالس حوزه نزدیک گسل

محمد رضا قائم مقامیان<sup>۱\*</sup> و بهنام خلیلی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

<sup>۲</sup>دانش آموخته کارشناسی ارشد پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

(تاریخ دریافت ۸۵/۴/۲۶، تاریخ دریافت اصلاح شده ۸۶/۱/۱۷، تاریخ تصویب ۸۶/۱۲/۲۰)

### چکیده

در این مقاله جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل با در نظر گرفتن توزیع غیر یکنواخت لغزش بر روی صفحه گسل مورد بررسی قرار گرفته است. مناطقی بر روی گسل که جا به جایی بیشتری نسبت به جا به جایی میانگین دارند به عنوان اسپریتی مشخص شده‌اند. به این ترتیب حرکات زمین در حوزه نزدیک گسل با استفاده از مدل چشمه محدود و توابع تئوری گرین برای محیط نامحدود شبیه‌سازی شده و نحوه تأثیر هر یک از پارامترهای خاص گسلش، که معمولاً از آنالیز برگشتی امواج دور لرزه‌ای بدست می‌آیند، نظیر لغزش ناهمگن (اسپریتی)، میزان لغزش بر روی اسپریتی، زمان فرآیند و سرعت گسیختگی در روی گسل و هم چنین اثر موقعیت مکانی و فاصله ساختگاه نسبت به گسل بر مشخصات پالس حوزه نزدیک گسل به صورت عددی و پارامتریک مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

**واژه های کلیدی:** حوزه نزدیک گسل - اسپریتی - جهت پذیری - توزیع غیر یکنواخت لغزش - تابع تئوری گرین

### مقدمه

سنگ و خاک لحاظ می‌شود. این روابط ممکن است از دقت کافی در ارائه تخمین صحیحی از میزان شتاب زمین و یا شتاب طیفی به سبب محدودیت پارامترها برخوردار نباشند. این امر خصوصاً در زلزله‌های نزدیک گسل<sup>۱</sup> به لحاظ مشخصات خاص آن نظیر ظهور پالس حوزه نزدیک و پدیده جهت‌پذیری ممکن است به مقادیر همراه کننده‌ای منجر گردد. برای واقعی‌تر نمودن بررسی رفتار جنبش زمین می‌بایست پارامترهای مؤثر چشمه لرزه‌ای خصوصاً برای زلزله‌های حوزه نزدیک گسل در ارزیابی حرکات توانمند زمین لحاظ گردد.

پارامترهای گسل در حوزه نزدیک را می‌توان به دو قسمت پارامترهای عمومی<sup>۲</sup> و پارامترهای خاص<sup>۳</sup> تقسیم‌بندی نمود. پارامترهای عمومی عبارتند از پارامترهایی مانند ابعاد (طول و عرض) گسل، ممان لرزه‌ای، جهت لغزش روی گسل و زاویه شیب گسل<sup>۴</sup> که بر اساس تحقیقات زمین‌شناسی و زلزله‌شناسی بر روی زلزله‌های مهم و گسل مسبب آنها قابل تعیین می‌باشند. پارامترهای خاص گسل نیز شامل لغزش ناهمگن (اسپریتی)، میزان لغزش بر روی اسپریتی، موقعیت اسپریتی و ابعاد آن، زمان فرآیند<sup>۵</sup> و سرعت گسیختگی بوده که از آنالیز برگشتی فاز خاصی از امواج در زلزله‌ها به

توزیع خرابی زلزله‌های بزرگ اخیر همانند هیوگوکن - نانبو (Hyogo-Ken Nanbu، ۱۹۹۵ - ژاپن)، کوجائیلی (Kacaeli، ۱۹۹۹ - ترکیه)، چی چی (Chi-Chi، ۱۹۹۹ - تایوان) و زلزله بم (۲۰۰۳ - ایران) نشان دادند که مشخصات زلزله در حوزه نزدیک گسل شدیداً تحت تأثیر اثر چشمه و شرایط ساختگاه می‌باشد. برای مثال اثرات چشمه مانند لغزش و جا به جایی غیر یکنواخت بر روی سطح گسل و جهت‌پذیری پیش‌رونده، باعث ایجاد خرابی‌های زیادی در زلزله هیوگوکن - نانبو گردید. با این وجود بسیاری از برآوردهای جنبش نیرومند زمین در تحلیل خطر زلزله، هنوز به روش‌های تجربی وابسته می‌باشند. روش‌های متداول جهت بررسی جنبش نیرومند زمین نظیر روش تحلیل خطر احتمالاتی، اغلب به "روابط کاهندگی" منتهی می‌شوند. این روابط جهت برآورد پارامترهای مشخصه جنبش زمین همانند بیشینه شتاب زمین (PGA) یا شتاب طیفی ( $S_a$ )، به صورت توابعی از بزرگای زلزله و فاصله به کار می‌روند. در روابط کاهندگی موجود، پارامترهای جنبش زمین با استفاده از مدل‌هایی تعیین می‌گردد که در آنها اثر چشمه لرزه‌ای بوسیله بزرگای زلزله، تأثیر انتشار موج از چشمه تا ساختگاه توسط پارامتر فاصله و اثر ساختگاه بر حسب تفکیک بین

گسل، عرض گسل، لغزش نهایی، زمان فرآیند و سرعت گسیختگی را که از مهم ترین پارامترهای مدل های سینماتیکی هستند، برای نشان دادن تأثیر گسلش در حوزه نزدیک معرفی می کند [۱]. این روش بیشتر برای مشخص کردن ویژگیهای زلزله های بزرگ به کار می رود. Aki [۲] اولین اقدام را در جهت شبیه سازی جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل با استفاده از مدل هسکل و در نظر گرفتن لغزش یکنواخت و سرعت گسیختگی ثابت بر روی صفحه گسل در یک نیم فضا به انجام رساند. نگاشت های حاصل از شبیه سازی به روش هسکل تطابق خوبی با نگاشت های ثبت شده در هنگام زلزله ۱۹۶۶ پارکفیلد را نشان داد. البته این مدل غالباً برای شبیه سازی حرکات توانمند زمین در فرکانس های پایین به کار برده می شود ولی از آن جایی که حرکات توانمند زمین در زلزله های حوزه نزدیک گسل به صورت یک پالس با فرکانس پایین نمایان می گردد، لذا این روش در شبیه سازی جنبش نیرومند زمین در فاصله نزدیک گسل کاربرد فراوان دارد.

مدل دینامیکی چشمه علاوه بر ملاحظات سینماتیکی شکست، شرایط تنش را هم به صورت دینامیکی بر روی صفحه گسل در نظر می گیرد. در این مدل ابتدا برای آنکه شرایط فیزیکی داخل و خارج چشمه به صورت رضایت بخشی شبیه سازی گردد، گسیختگی به صورت انباشته شده در نظر گرفته می شود و سپس بر روی صفحه گسل گسترش می یابد. Kostrov از اولین دانشمندانی بود که از مدل دینامیکی چشمه برای شبیه سازی استفاده نمود [۳]. او ترک برشی دو بعدی خارج از صفحه که با سرعت گسیختگی معینی منتشر می شود را تحلیل نموده و رفتار سرعت لغزش و تمرکز تنش را در نوک ترکها نشان داده است. Madariaga جنبش لرزه ای حوزه دور و طیف ترک خوردگی دایروی با سرعت ثابت و شعاع مشخص را با استفاده از روش تفاضل محدود مورد مطالعه قرار داد [۴].

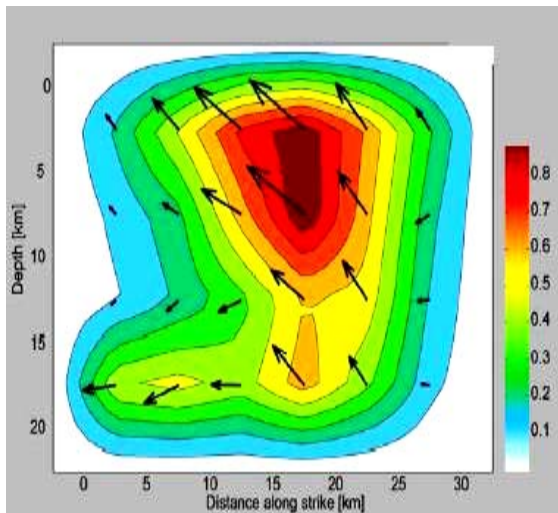
اخیراً روش های ترکیبی دوتایی با استفاده از ترکیب مدل های سینماتیکی و تصادفی برای شبیه سازی نگاشت ها در فرکانس های باند پهن معرفی گردیده است که در آنها برای شبیه سازی نگاشت های فرکانس بالا با توجه به ناشناخته بودن منشأ فیزیکی آن در چشمه از فرآیندهای تصادفی استفاده می گردد. Sato گسلش

دست می آیند. توزیع لغزش و سرعت آن بر روی صفحه گسل در محدوده چشمه خصوصاً برای زلزله های با بزرگای بیش از شش ریشتر یکنواخت و همگن نمی باشد. بنابراین برای برآورد حرکت نیرومند زمین بایستی توزیع جا به جایی، میزان آن و نحوه گسیختگی علاوه بر جا به جایی متوسط مشخص گردد. محدوده ای بر روی سطح گسل که میزان جا به جایی بیشتری نسبت به جا به جایی متوسط دارد به عنوان اسپریتی شناخته می شود. مشخصات اسپریتی تأثیر بسزایی در برآورد جنبش نیرومند زمین خصوصاً در محدوده نزدیک گسل دارد. از طرفی از آن جایی که اطلاعات لازم و کافی از موقعیت، مساحت و میزان لغزش اسپریتی ها در سطح گسل ها، زمان فرآیند و سرعت گسیختگی در دسترس نمی باشد، لازم است تا مطالعه این عوامل در تعیین مشخصات حرکات توانمند زمین به صورت پارامتریک صورت پذیرد تا امکان بررسی حالت های بحرانی در تعیین مقادیر شتاب یا سرعت در حین زلزله های آتی ممکن گردد. از آن جایی که این پارامترها غالباً در تعیین حرکات توانمند زمین در حوزه نزدیک گسل اهمیت دارند، لذا در این مقاله ضمن تشریح مدل سینماتیکی در شبیه سازی امواج حوزه نزدیک گسل به تأثیر هر یک از عوامل فوق و تعیین اثر موقعیت مکانی و فاصله ساختگاه از گسل بر مشخصات پالس حوزه نزدیک گسل به صورت پارامتریک پرداخته می شود.

### روشهای شبیه سازی حرکات توانمند زمین

در صورتی که توزیع لغزش و جا به جایی بر روی سطح گسل (اثر چشمه) و تابع گرین که اثر پاسخ محیط انتشار است (اثر مسیر انتشار) مشخص باشند، حرکت زمین در اثر زلزله را می توان شبیه سازی نمود. دو روش استفاده از مدل های سینماتیکی (مدل هسکل) و مدل های دینامیکی برای شبیه سازی حرکت توانمند زمین در هنگام زلزله در حوزه نزدیک گسل وجود دارد. مدل های سینماتیکی اثر توابع جا به جایی در سطح گسل را بدون در نظر گرفتن ملاحظات فیزیکی تنش، فراهم می نماید. علی رغم حذف شرایط دینامیکی گسلش، مدل های سینماتیکی نتایج مهمی در تفسیر حرکت توانمند زمین ناشی از زلزله های حوزه نزدیک گسل و برآورد توزیع لغزش و گسترش گسیختگی بر روی صفحه گسل را به همراه داشته است. Haskell پنج پارامتر طول

فراوان پس از گسلش برای زلزله‌های با بزرگی بالاتر از ۶ ریشتر و با استفاده از روش آنالیز برگشتی، مشخصات اسپریتی‌ها بر روی سطح گسل و تأثیر آن بر حرکات توانمند زمین قابل تعیین می‌باشد. برای مثال شکل (۱) توزیع غیریکنواخت لغزش بر روی سطح گسل در زلزله بم که توسط Yamanaka (۲۰۰۳) از روی موج‌های دور لرزه‌ای تهیه شده است را نشان می‌دهد [۸]. مطالعات اخیر توسط Irikura, Smith, Abrahamson, Somerville و قائم‌مقامیان تأثیر اسپریتی و مشخصات آن بر حرکات توانمند زمین در حوزه نزدیک گسل خصوصاً بر پالس‌های حاصل از جهت‌پذیری پیش‌رونده را تأکید می‌نماید [۷، ۹، ۱۰]. به این ترتیب با استفاده از این مدل می‌توان شرایط واقعی‌تری جهت شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل فراهم ساخت [۱۱].



شکل ۱: توزیع لغزش بر روی گسل طی زلزله بم با استفاده از آنالیز برگشتی امواج دور لرزه‌ای. دو اسپریتی بر روی صفحه گسل قابل مشاهده می‌باشد [۸].

### شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک برای مدل گسل محدود

با استفاده از تئوری بازنمایی<sup>۱</sup> [۱۲] می‌توان نشان داد که در محیط نامحدود، همسان و همگن، جا به جایی  $\vec{u}_i(\vec{x}, t)$  موج‌های S و P در نقطه  $(\vec{x}, t)$  ناشی از تغییر مکان ناپیوسته  $\vec{u}(\vec{\xi}, \tau)$  در نقطه  $(\vec{\xi}, \tau)$  بر روی سطح داخلی  $\Sigma$  (شکل (۲)) به وسیله رابطه (۱) ارائه می‌گردد [۱۰]:

نامنظمی را برای برآورد جنبش نیرومند فرکانس بالای زمین پیشنهاد نمود [۵]. صفحه گسل برای زلزله‌های بزرگ به المان‌های کوچکتری به نام زیر گسل تقسیم می‌گردد. هر کدام از این المان‌ها به عنوان یک چشمه نقطه‌ای لرزه‌زا در نظر گرفته می‌شوند. جنبش نیرومند حاصل از جا به جایی گسل طبق اصل برهم نهی، حاصل جمع موج‌های لرزه‌ای ایجاد شده از هر یک از چشمه‌های نقطه‌ای می‌باشد. تابع زمانی چشمه به صورت تابع شیب‌دار پله‌ای<sup>۲</sup> با شیب‌های جزئی که بر اساس تجارب آزمایشگاهی Ohnaka بر روی شکست لغزشی چسبنده تعیین می‌گردد به صورت تصادفی مشخص می‌شوند [۶].

### اثر توزیع غیر یکنواخت لغزش بر روی سطح گسل (اسپریتی)

فرآیند گسیختگی به توزیع تنش اولیه روی گسل و تغییرات خواص فیزیکی محیط گسلش نظیر مقاومت برشی سنگ‌ها و نحوه پراکندگی نیروهای استاتیکی و دینامیکی بر روی سطح گسل بستگی دارد. تغییرات در هر یک از این پارامترها روی سطح گسیختگی موجب تغییر در سرعت گسیختگی، میزان لغزش و توزیع افت تنش روی گسل می‌گردد. این ناهمگن بودن را می‌توان در پیچیدگی شکل نوسان‌های منتشره در حوزه‌های نزدیک گسلی نیز مشاهده نمود. بررسی لرزه‌های چندگانه منجر به معرفی الگوهای برای مقاومت و افت تنش ناهمگن روی صفحه گسل شده‌است. مدل چشمه اسپریتی یکی از مدل‌های چشمه‌های ناهمگن زلزله می‌باشد که در آن لغزش روی صفحه گسل نامنظم است. در مدل چشمه اسپریتی مناطق با تنش بالا (که اسپریتی نامیده می‌شوند) می‌شکنند و غالباً عامل انتشار انرژی لرزه‌ای فرکانس پایین می‌باشند. به این ترتیب اسپریتی‌ها به مناطقی بر روی سطح گسل اطلاق می‌شود که جا به جایی بیشتری نسبت به جا به جایی میانگین بر روی سطح گسل خواهند داشت. Somerville اسپریتی را به عنوان مناطقی بر روی سطح گسل که جا به جایی آنها از دو برابر جا به جایی میانگین در روی سطح گسل بیشتر می‌باشد معرفی نمود [۷]. باید توجه داشت که اصولاً توزیع یکنواخت لغزش بر روی سطح گسل وجود نداشته و یکنواخت در نظر گرفتن جا به جایی در سطح گسل به دلیل کمبود داده و اطلاعات موجود در خصوص زلزله‌ها می‌باشد. اخیراً با توجه به حجم داده‌های

برای جا به جایی المان  $k$  ام است. تابع زمان جا به جایی<sup>۱۱</sup> چشمه به صورت تابع شیبدار<sup>۱۱</sup> و تابع سرعت جا به جایی<sup>۱۲</sup> به صورت پله‌ای<sup>۱۳</sup> فرض می‌شود. برای یک محیط همگن، همسان و نامحدود تابع پاسخ ضربه به صورت زیر توسط آکی و ریچاردز ارائه گردیده است [۱۲]:

$$f_k^X(\bar{x}, t) = 1/4\pi\rho(\gamma_k\gamma_p - \delta_{pk})r^{-3} \int_{r/\beta}^{r/\alpha} t' \delta(t - \tau - t') dt' + 1/4\pi\rho V_p^2 \gamma_k \gamma_p r^{-1} \delta(t - \tau - r/\alpha) + 1/4\pi\rho V_s^2 (\gamma_k \gamma_p - \delta_{kp}) r^{-1} \delta(t - \tau - r/\beta) \quad (۶)$$

که در آن  $r$  فاصله تا کانون،  $V_p$  سرعت موج  $P$ ،  $V_s$  سرعت موج  $S$ ،  $\rho$  چگالی،  $\tau$  زمان فرآیند،  $\gamma_k$  و  $\gamma_p$  بردارهای هادی که جهت ساختگاه تا گسل را حین انتشار نشان می‌دهند. با جایگزین نمودن رابطه (۶) در روابط (۴) و (۵)، می‌توان جا به جایی ناشی از جنبش نیرومند زمین را نیز به شکل زیر نوشت:

$$u(x, t) = \frac{M_0}{4\pi\sigma} [R_{\theta\phi}^N \frac{1}{r^4} \int_{\alpha}^r \beta \tau f^s(t - \tau) d\tau + \frac{1}{V_p^2} R_{\theta\phi}^p \frac{1}{r^2} f^s(t - \frac{r}{V_p}) + \frac{1}{V_s^2} R_{\theta\phi}^s \frac{1}{r^2} f^s(t - \frac{r}{V_s})] + \frac{1}{V_p^3} R_{\theta\phi}^{FP} \frac{1}{r} f^s(t - \frac{r}{V_p}) + \frac{1}{V_s^3} R_{\theta\phi}^{FS} \frac{1}{r} f^s(t - \frac{r}{V_s}) \quad (۷)$$

که در آن  $M_0$  ممان لرزه‌ای و برابر  $M_0 = \mu AD$  بوده،  $f^s(t)$  و  $f^{\square}(t)$  تابع زمان جا به جایی و تابع زمان سرعت جا به جایی چشمه و  $R_{\theta\phi}^N$  ضرایب الگوی انتشار<sup>۱۴</sup> می‌باشند که عبارتند از:

$$R_{\theta\phi}^N = 9\sin 2\theta \cos \phi - 6(\cos 2\theta \cos \phi - \cos \theta \sin \phi) \quad (۸)$$

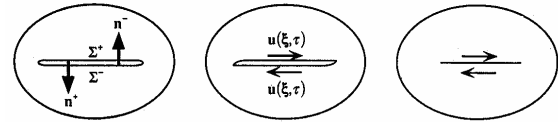
$$R_{\theta\phi}^p = 4\sin 2\theta \cos \phi - 2(\cos 2\theta \cos \phi - \cos \theta \sin \phi) \quad (۹)$$

$$R_{\theta\phi}^s = -3\sin 2\theta \cos \phi + 3(\cos 2\theta \cos \phi - \cos \theta \sin \phi) \quad (۱۰)$$

$$R_{\theta\phi}^{FP} = \sin 2\theta \cos \phi \quad (۱۱)$$

$$R_{\theta\phi}^{FS} = \cos 2\theta \cos \phi - \cos \theta \sin \phi \quad (۱۲)$$

$N$ ،  $I$  و  $F$  به ترتیب بر حوزه نزدیک<sup>۱۵</sup>، حوزه متوسط<sup>۱۶</sup> و حوزه دور<sup>۱۷</sup> دلالت کرده،  $P$  و  $S$  نیز بیانگر نوع موج و  $(\theta, \phi)$  جهت امتداد و شیب گسل را نشان می‌دهند. به این ترتیب با توجه به رابطه (۷) می‌توان مشاهده نمود که جنبش نیرومند زمین از پنج جمله تشکیل شده است که جمله اول مربوط به حوزه نزدیک، جمله دوم و سوم مربوط به حوزه متوسط و جمله چهارم و پنجم بیانگر حوزه دور می‌باشند. بنابراین جنبش‌های نیرومند زمین از ترکیب سه عبارت بیان شده تشکیل شده‌اند و هر یک از این عبارات بسته به موقعیت و شرایط گسلش و ساختگاه نقش



شکل ۲: تصویر شماتیکی از تغییر مکان ناپیوسته  $\bar{u}(\bar{\xi}, \tau)$  در نقطه  $(\bar{\xi}, \tau)$  بر روی سطح داخلی  $\Sigma$ .

$$\bar{u}_i(\bar{x}, t) = \frac{R_c(\phi, \delta)}{4\pi\rho c^3 r} \cdot \mu \iint_{\Sigma} \Delta U_j(\bar{\xi}, t - \frac{r}{c}) d\Sigma \quad (۱)$$

که در آن  $\mu$  معرف صلبیت،  $r$  فاصله مابین صفحه گسل و نقطه ثبت،  $R_c$  (اندیس  $c$  بیانگر نوع موج از جمله  $P$ ،  $SV$  یا  $SH$  می‌باشد) ضربب انتشار<sup>۱۸</sup>،  $\phi$  امتداد گسل،  $\delta$  شیب گسل، تابع  $\Delta u$  به عنوان "تابع چشمه" و یا "تابع لغزش" در سطح گسل می‌باشد. برای گسلی با طول  $L$  و پهنای  $W$ ، تغییر مکان موج را می‌توان به صورت رابطه ساده زیر بیان نمود:

$$\bar{u}_i(\bar{x}, t) = \int_0^L \int_0^W \Delta u(\xi, \eta) * \bar{G}(\bar{x}, \xi, \eta, t) d\xi d\eta \quad (۲)$$

که در آن  $G$  تابع گرین و  $*$  معرف کانولوشن می‌باشد. برای شبیه‌سازی جنبش زمین، صفحه گسل به زیرگسلهای کوچکتری تقسیم‌بندی می‌گردد. اگر صفحه گسل به  $I$  المان در جهت امتداد گسل و  $m$  المان در جهت شیب گسل تقسیم‌بندی گردد، در این صورت معادله بالا را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\bar{u}_i(\bar{x}, t) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^m \int_{L_i}^{L_i+AL_i} \int_{W_j}^{W_j+AW_j} \Delta u(\xi_i, \eta_j, t - \tau_{ij}) * \bar{G}(\bar{x}, \xi_i, \eta_j, t) d\xi d\eta \quad (۳)$$

که در آن زمانی است که صرف انتشار گسیختگی از کانون تا المان  $i$  و  $j$  زام گسل می‌شود. به این ترتیب می‌توان رابطه قبل را به فرم ساده زیر برای هر زیر گسل ( $k$ ) تبدیل و از طریق آن جنبش زمین  $u^X(x, t)$  را در نقطه  $X$  بدست آورد:

$$\bar{u}^X(x, t) = \sum_k^N m_k \bar{G}_k^X(x, t) \quad (۴)$$

$$\bar{G}_k^X(x, t) = \delta(t - \frac{r_k}{V_R}) * f^s(t) * \bar{f}_k^X(x, t) \quad (۵)$$

که در آن  $N$  تعداد المانهای گسل،  $\bar{G}_k^X(x, t)$  تابع گرین و  $m_k$  لغزش و جا به جایی المان  $k$  ام بوده و  $r_k$  فاصله مابین نقطه شروع گسیختگی و مرکز المان  $k$  ام بوده و  $V_R$  سرعت گسیختگی می‌باشد.  $\bar{f}_k^X$  معرف دلتای دیراک،  $f^s(t)$  تابع زمان چشمه و  $\bar{f}_k^X(x, t)$  تابع پاسخ ضربه

نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل در نظر گرفته شده که پارامترهای لرزه‌ای آن در جدول (۱) ارائه شده است. برای توزیع غیر یکنواخت لغزش و جا به جایی همان طور که در شکل (۳) دیده می‌شود، محدوده‌ای بر روی صفحه گسل که هاشور خورده است با داشتن جا به جایی بیشتری نسبت به بقیه نقاط به عنوان اسپریتی انتخاب شده است. با توجه به جهت گسلش، ضرایب انتشار و موقعیت ساختگاه عموماً پالس حوزه نزدیک و اثر جهت‌پذیری پیش‌رونده در مؤلفه عمود بر امتداد گسل ظاهر می‌شود، لذا در بررسی‌های انجام شده مؤلفه سرعت در جهت عمود بر امتداد گسل مد نظر قرار گرفته است.

جدول ۱: پارامترهای مدل گسل مفروض در شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک.

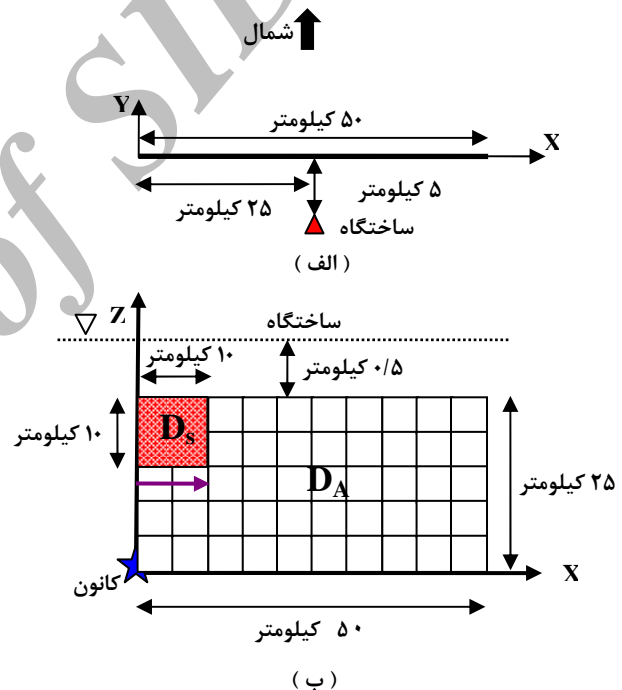
بزرگای گشتاوری	۶/۷
ممان لرزه‌ای	$10^{26} * 1/5$ دین.سانتی متر
طول گسل	۵۰ کیلومتر
پهنای گسل	۲۵ کیلومتر
سرعت موج P	۵/۵ کیلومتر بر ثانیه
سرعت موج S	۳ کیلومتر بر ثانیه
سرعت گسیختگی	۲/۵ کیلومتر بر ثانیه
زمان فرآینش	۱ ثانیه
(D <sub>S</sub> ) میزان لغزش اسپریتی	۴۰۰ سانتی متر

### تأثیر گسلش ناهمگن (اسپریتی)

قائم‌مقیان نحوه تأثیر موقعیت و مساحت اسپریتی‌ها را در جنبش نیرومند زمین مورد بررسی قرار داد و مشخص نمود زمانی که اسپریتی در کمترین فاصله از سطح زمین قرار می‌گیرد (اسپریتی کم عمق)، پالس بدست آمده در ساختگاه بیشترین دامنه را خواهد داشت [۹، ۱۰]. بنابراین همان طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، در این بررسی اسپریتی به صورت اسپریتی کم عمق انتخاب شده و سپس سایر پارامترهای مؤثر بر پالس جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

به جهت بررسی اثر توزیع غیر یکنواخت لغزش و یا همان وجود اسپریتی‌ها بر روی سطح گسل سه حالت در نظر گرفته شده است: در حالت اول میزان لغزش برای تمامی نقاط روی سطح گسل، یکسان و برابر ۲۰۰ سانتی متر فرض شده و در دو حالت دیگر تعدادی از نقاط موجود بر روی سطح گسل که در شکل (۳) با هاشور مشخص

متفاوتی را در ایجاد نگاشت لرزه‌ای ایفا می‌نماید. هم چنین هر یک از عبارات مربوط به حوزه متوسط و حوزه دور خود از دو بخش تشکیل شده است که یکی از آنها مربوط به موج P و دیگری مربوط به موج S می‌باشد. با توجه به رابطه (۷) مشاهده می‌شود که هر یک از عبارات حوزه نزدیک، حوزه متوسط و حوزه دور به ترتیب با  $r^{-4}$ ،  $r^{-2}$  و  $r^{-1}$  متناسب بوده و این بدان معنا است که با افزایش فاصله از گسل عبارت حوزه نزدیک به مراتب بیشتر از حوزه دور و حوزه متوسط کاهش پیدا خواهد کرد و یا به عبارت دیگر اثر عبارت حوزه نزدیک در فواصل نزدیک به گسل و اثر عبارت حوزه دور در فواصل زیاد از گسل، شاخص خواهد بود.

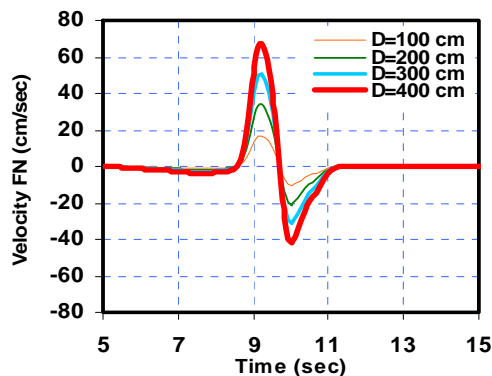


شکل ۳: الف- موقعیت ساختگاه نسبت به گسل از نمای بالا ب- مقطع عرضی گسل و جهت انتشار گسیختگی بر روی آن.

### بررسی پارامتریک عوامل گسلش

بر اساس روابط فوق، برنامه رایانه ای که می‌تواند حرکات توانمند زمین را در حوزه نزدیک گسل شبیه‌سازی نماید، در محیط فرترن تهیه شده است (یاماموتو و همکاران ۲۰۰۱). به منظور مطالعه پارامتریک عوامل گسلش بر پالس حوزه نزدیک گسل لازم است تا مدلی برای گسل در نظر گرفته شود. بدین منظور مدلی از گسل امتداد لغزش مطابق شکل (۳) و ساختگاهی در فاصله ۵ کیلومتری از گسل مفروض جهت شبیه‌سازی جنبش

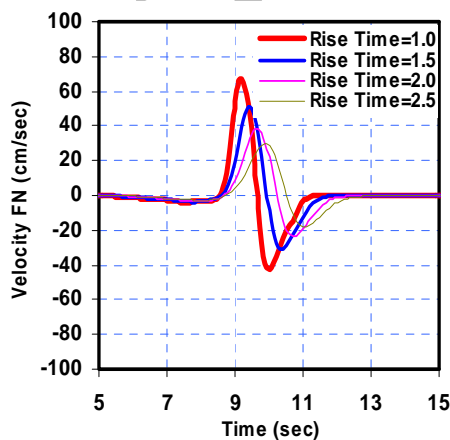
(۵) رسم شده است. با توجه به شکل (۵) واضح است که افزایش میزان لغزش در روی اسپریتی‌ها باعث افزایش دامنه پالس دریافتی گردیده و این در حالی است که تغییر میزان لغزش هیچ گونه تغییری در پریود پالس ایجاد نمی‌نماید. به بیان دیگر میزان لغزش اسپریتی صرفاً بر روی دامنه پالس شبیه‌سازی شده جنبش زمین در حوزه نزدیک گسل تأثیرگذار خواهد بود.



شکل ۵: پالس‌های شبیه‌سازی شده جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل برای لغزش‌های متفاوت اسپریتی.

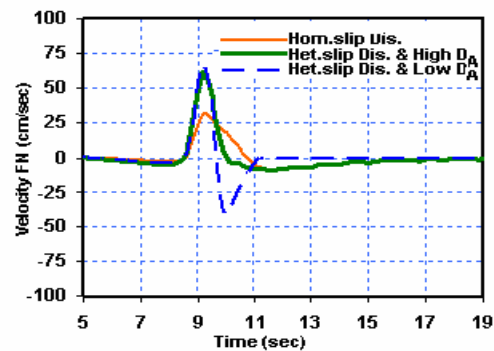
### تأثیر زمان فرآیند

زمان فرآیند مدت زمانی است که طول می‌کشد تا یک ذره منفرد به جا به جایی نهایی خود بر روی گسل برسد. جهت بررسی اثر تغییرات آن بر پالس حوزه نزدیک گسل برای مدل مفروض به ترتیب زمان فرآیند‌های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ ثانیه منظور و پالس‌های شبیه‌سازی شده آنها در شکل (۶) رسم شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش زمان فرآیند دامنه پالس کاهش یافته و در مقابل پریود افزایش می‌یابد.



شکل ۶: پالس‌های شبیه‌سازی شده جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل برای زمان فرآیند‌های متفاوت.

شده‌اند به عنوان اسپریتی انتخاب شده و بنابراین باید جابجایی بیشتری نسبت به سایر نقاط داشته باشند. به این ترتیب در حالت دوم و سوم جابجایی اسپریتی برابر ۴۰۰ سانتی متر و جابجایی سایر نقاط بر روی سطح گسل در حالت دوم برابر ۲۰۰ سانتی متر و در حالت سوم برابر مقدار ناچیزی نزدیک به صفر در نظر گرفته شده است. شکل (۴) پالس‌های شبیه‌سازی شده جنبش نیرومند زمین را برای این سه حالت نشان می‌دهد. مطابق شکل با مقایسه حالت اول با دو حالت دیگر مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن اسپریتی و یا به عبارت دیگر توزیع غیر یکنواخت لغزش بر روی گسل سبب می‌شود که پالس با دامنه بزرگتر در ساختگاه ایجاد گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بدون در نظر گرفتن اثر گسلش ناهمگن نمی‌توان برآورد صحیحی از حداکثر جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل بدست آورد. بررسی دو حالت دوم و سوم نشان می‌دهد آنچه که بر دامنه پالس جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل تأثیر گذار می‌باشد، میزان جابجایی اسپریتی بوده و جا به جایی سایر نقاط موجود در سطح گسل در شکل و مدت دوام پالس ایجاد شده مؤثر می‌باشند و تأثیری بر حداکثر سرعت پالس ایجاد شده نخواهند داشت.

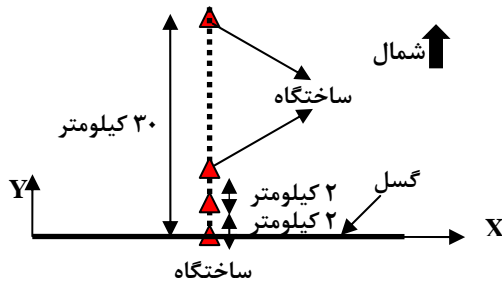


شکل ۴: پالس‌های شبیه‌سازی شده جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل به ازای توزیع یکنواخت لغزش و هم چنین توزیع غیر یکنواخت لغزش بر روی سطح گسل.

### تأثیر میزان لغزش اسپریتی

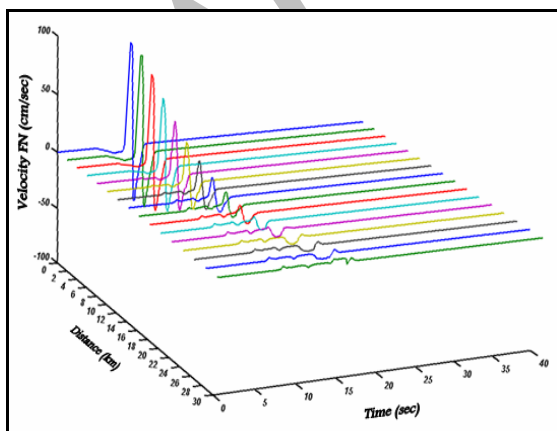
یکی دیگر از عواملی که در جنبش زمین در حوزه نزدیک گسل مؤثر می‌باشد، میزان لغزش در اسپریتی‌ها نسبت به میانگین لغزش بر روی صفحه گسل می‌باشد. جهت بررسی این مورد، در مدل مفروض به ترتیب لغزش‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ سانتی متر را برای اسپریتی منظور و پالس‌های شبیه‌سازی شده در شکل

حوزه نزدیک ناشی از گسلش مدل ارائه شده در شکل (۳) محاسبه شده است. شکل (۹) پالس‌های شبیه‌سازی شده را در موقعیت‌های مختلف ساختگاه نشان می‌دهد. همان طوری که مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از گسل، دامنه پالس کاهش می‌یابد.



شکل ۸: موقعیت‌های مختلف ساختگاه در جهت عمود بر امتداد گسل (نمای بالا).

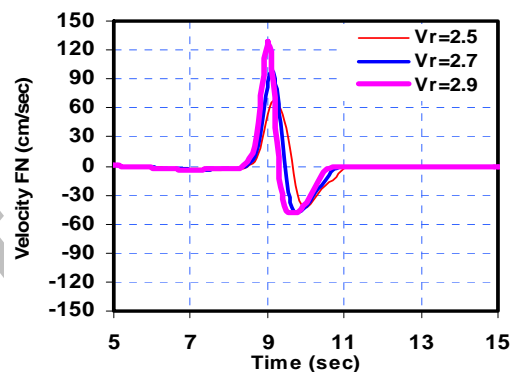
اگر مطابق شکل (۱۰) نمودار ماکزیمم مقادیر سرعت در پالس‌های شبیه‌سازی شده بر حسب فاصله از گسل رسم شود، به خوبی می‌توان روند کاهشی سرعت ماکزیمم را با افزایش فاصله ساختگاه از گسل تشخیص داد. اگر فواصل متناظر با ۵۰٪ و ۷۵٪ مقدار حداکثر سرعت در نمودار را به عنوان شاخص‌های تأثیر پالس حوزه نزدیک گسل نسبت به فاصله تا ساختگاه فرض نماییم، مطابق شکل مشاهده می‌شود برای مدل یاد شده که بیانگر گسلی با بزرگی ۶/۷ می‌باشد، تا فاصله ۵ کیلومتری و یا حداکثر ۸ کیلومتری از گسل، اثر پالس حوزه نزدیک چشمگیر بوده و بعد از این فاصله اثر آن سریعاً کاهش می‌یابد.



شکل ۹: پالس‌های شبیه‌سازی شده جنبش نیرومند زمین در موقعیت‌های مختلف ساختگاه در جهت عمود بر امتداد گسل.

## تأثیر سرعت گسیختگی

سرعت گسیختگی یا به عبارت دیگر سرعتی که گسیختگی با آن در طول گسل منتشر می‌شود نیز بر پالس حوزه نزدیک گسل تأثیرگذار خواهد بود. بنابراین برای در نظر گرفتن اثر تغییرات آن بر پالس ایجاد شده، سرعت‌های ۲/۵، ۲/۷ و ۲/۹ کیلومتر بر ثانیه برای سرعت گسیختگی فرض شده و پالس‌های حوزه نزدیک گسل محاسبه و در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت گسیختگی دامنه پالس افزایش یافته و از طرفی پریود پالس کاهش می‌یابد.



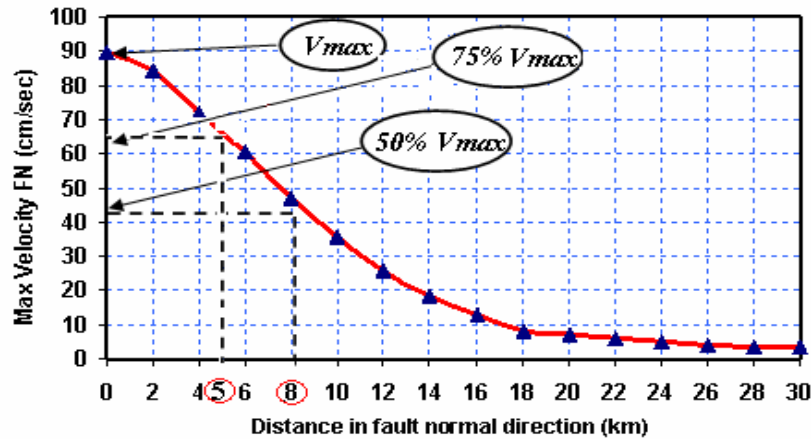
شکل ۷: پالس‌های شبیه‌سازی شده جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل برای سرعت‌های گسیختگی متفاوت.

## تأثیر موقعیت مکانی ساختگاه

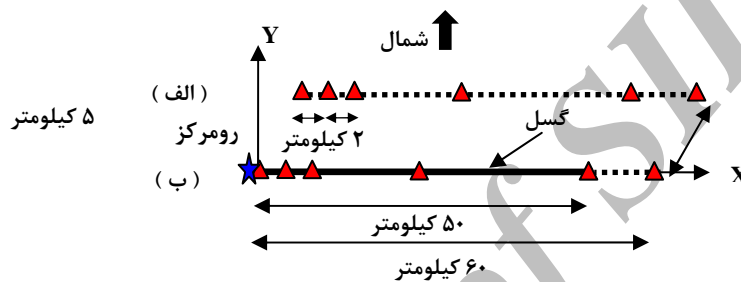
از دیگر عواملی که در تعیین جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک تأثیرگذار خواهد بود، موقعیت ساختگاه، دوری و یا نزدیکی آن نسبت به گسل می‌باشد. جهت بررسی اثر موقعیت ساختگاه بر روی جنبش زمین از مدل گسل ارائه شده در شکل (۳) استفاده گردیده و پالس حوزه نزدیک گسل برای فواصل مختلف شبیه‌سازی شده است. به جهت آن که بررسی دقیق‌تری بر روی اثر دوری و یا نزدیکی ساختگاه نسبت به گسل در برآورد جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک صورت گیرد، موقعیت ساختگاه در دو جهت عمود بر امتداد گسل و موازی آن به صورت متغیر با فاصله در نظر گرفته شده و نتایج حاصله تحلیل شده است.

## تأثیر فاصله در حالت عمود بر امتداد گسل

مطابق شکل (۸) تا فاصله ۳۰ کیلومتری در جهت عمود بر امتداد گسل و در بازه‌های ۲ کیلومتری، پالس



شکل ۱۰: نمودار حداکثر سرعت پالس‌های شبیه‌سازی شده بر حسب فاصله عمودی ساختگاه از گسل.



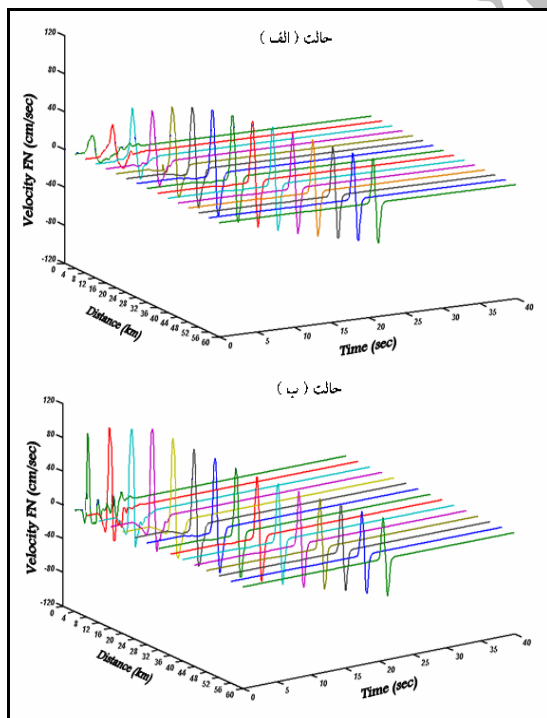
شکل ۱۱: موقعیت‌های مختلف ساختگاه در جهت موازی امتداد گسل.

کیلومتری مشاهده می‌شود.

### تأثیر فاصله در حالت موازی امتداد گسل

مطابق شکل (۱۱) دو حالت (الف) و (ب) یکی بر روی امتداد گسل و دیگری به فاصله ۵ کیلومتر و به موازات گسل برای این قسمت در نظر گرفته شده‌است. شکل (۱۲) پالس‌های شبیه‌سازی شده را در موقعیت‌های مختلف ساختگاه برای دو حالت (الف) و (ب) نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود دامنه پالس ایجاد شده در هر دو حالت با افزایش فاصله از رومکز زلزله، ابتدا افزایش یافته و بعد از فاصله‌ای روند کاهشی را دنبال می‌نماید.

اگر مطابق شکل (۱۳) نمودار حداکثر مقدار سرعت در پالس‌های شبیه‌سازی شده بر حسب فاصله از گسل برای هر دو حالت (الف) و (ب) رسم شود، به خوبی می‌توان روند تغییرات حداکثر سرعت بر حسب فاصله را تشخیص داد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در هر دو حالت تغییرات سرعت بر حسب فاصله از رومکز زلزله، روندی افزایشی-کاهشی دارد. به این ترتیب مطابق شکل (۱۳) برای حالت (الف)، ماکزیمم مقدار سرعت در فاصله ۲۶ کیلومتری از رومکز و برای حالت (ب) در فاصله ۱۴

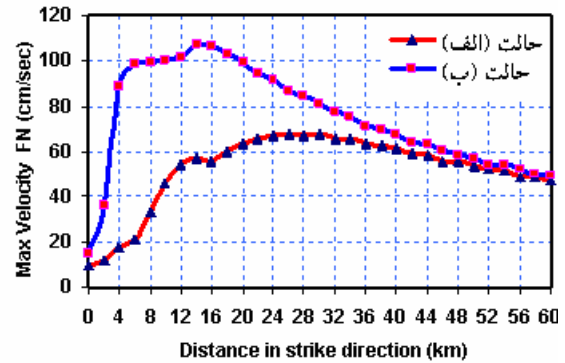


شکل ۱۲: پالس‌های شبیه‌سازی شده جنبش نیرومند زمین در موقعیت‌های متفاوت ساختگاه در دو حالت (الف) و (ب).



خصوصاً در مورد مقادیر حداکثر شتاب یا سرعت بدست آورد. افزایش میزان لغزش در روی اسپریتی‌ها باعث افزایش دامنه پالس دریافتی شده حال آن که این افزایش هیچ گونه تغییری در پریود پالس حوزه نزدیک گسل ایجاد نمی‌نماید. به بیان دیگر میزان لغزش در اسپریتی صرفاً بر روی دامنه پالس حوزه نزدیک گسل تأثیر گذار خواهد بود. در ضمن با بررسی نحوه تأثیر زمان فرآیند و سرعت گسیختگی مشخص گردید که افزایش زمان فرآیند باعث کاهش دامنه و افزایش پریود گشته و در مقابل افزایش سرعت گسیختگی باعث افزایش دامنه و کاهش پریود پالس حوزه نزدیک گسل می‌گردد.

با بررسی اثر موقعیت مکانی و فاصله ساختگاه نسبت به گسل مشخص شد که با افزایش فاصله در جهت عمود بر امتداد گسل، دامنه پالس کاهش و پریود افزایش می‌یابد. بعلاوه اگر فواصل متناظر با ۵۰٪ و ۷۵٪ مقدار حداکثر سرعت پالس‌های شبیه‌سازی شده را به عنوان شاخص‌های تأثیر پالس حوزه نزدیک گسل نسبت به فاصله تا ساختگاه فرض نماییم، برای زلزله‌ای با بزرگای ۶/۷ ریشتر فواصل ۵ و ۸ کیلومتری از گسل را می‌توان به عنوان فواصلی که در آن اثر پالس حوزه نزدیک چشمگیر می‌باشد، تعیین نمود. مسلماً جهت تهیه الگویی به منظور تعیین شاخص‌های تأثیر پالس حوزه نزدیک گسل برای زلزله‌های با بزرگای متفاوت، نیازمند بررسی مدل‌های مختلفی از چشمه لرزه‌ای مشابه مدل گسل مفروض خواهیم بود. با افزایش فاصله از رومرکز زلزله و به موازات گسل، دامنه پالس ایجاد شده ابتدا افزایش یافته و بعد از فاصله‌ای روند کاهشی را دنبال می‌نماید.



شکل ۱۳: نمودار حداکثر مقدار سرعت پالس‌های شبیه‌سازی شده بر حسب فاصله ساختگاه از رومرکز زلزله و به موازات صفحه گسل برای دو حالت (الف) و (ب).

### نتیجه‌گیری

در این مقاله حرکات زمین در حوزه نزدیک گسل با استفاده از مدل چشمه محدود و توابع تئوری گرین برای محیط نامحدود شبیه‌سازی شده و ویژگی‌های حرکات توانمند زمین در حوزه نزدیک گسل مطالعه گردیده است. در پالس‌های حوزه نزدیک بدست‌آمده تغییرات دو کمیت دامنه و پریود به جهت اهمیت این کمیت‌ها در طراحی سازه‌ها، با پارامترهای گسلش نظیر لغزش ناهمگن (اسپریتی)، میزان لغزش بر روی اسپریتی، زمان فرآیند و سرعت گسیختگی در روی گسل و هم‌چنین موقعیت مکانی و فاصله ساختگاه نسبت به گسل به صورت عددی و پارامتریک مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌است. با بررسی‌های به عمل آمده مشخص گردید توزیع غیر یکنواخت لغزش بر روی گسل سبب می‌شود که پالس‌های با مشخصات متفاوت در ساختگاه ایجاد شود و یا به عبارت دیگر بدون در نظر گرفتن اثر گسلش ناهمگن نمی‌توان برآورد صحیحی از جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک

### مراجع

- 1 - Haskell, N. A. (1964). "Total energy and spectral density of elastic wave radiation from propagating faults." *Bull. Seism. Soc. Am*, Vol. 54, PP. 1811-1842.
- 2 - Aki, K. (1968). "Seismic displacement near a fault." *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, PP. 5359-5376.
- 3 - Kostrov, B. V. (1966). "Unsteady propagation of longitudinal shear cracks." *J. Applied Math. and Mechanics*, Vol. 30, PP. 1241-1248.
- 4 - Madariaga, R. (1976). "Dynamics of an expanding circular fault." *Bull. Seism. Soc. Am*, Vol. 66, PP. 639-666.
- 5 - Sato, R. (1984). "Strong ground motion from an irregular faulting model." *Report of a Grant-in-aid for research on Natural Disasters from the ministry of Education, Science and Culture of Japan* (No. A-59-3), PP. 117-138.

- 6 - Ohnaka, M. (1986). "Dynamic breakdown processes and the generating mechanism for high-frequency elastic radiation during stick-slip instabilities." *Earthquake source mechanism, Maurice Ewing*, Vol. 6, PP. 13-24.
- 7 - Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Smith, N. and Kowada, A. (1999). "Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion." *Seismological Research Letters*, Vol. 70, No. 1, PP. 59-79.
- 8 - Yamanaka, Y. Seismological Note: No.145, *Earthquake Information Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, (2003). /Available at <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/seismo-Note/EIC-News/031226w.jpg/>
- 9 - Ghayamghamian, M. R. (2003). "Near-field Ground Motion Simulation for Heterogeneous Faulting." *Fourth International Conference of Earthquake Engineering and Seismology*, Tehran, Iran.
- 10 - Ghayamghamian, M. R. (2005). "The Effects Of Variability In Near-Fault Ground Motion Prediction." *73th Annual Meeting of ICOLD*, Tehran, Iran.
- 11 - Ghayamghamian, M. R. and Hisada, (2007). "Near-fault strong motion complexity of the 2003 Bam earthquake (Iran) and low-frequency ground motion simulation." *Geophysical journal international*, Vol. 170, No. 2, PP. 679-686(8).
- 12 - Aki, K. and Richards, P. G. (1980). *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, W.H. Freeman and Co. New York.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1-Near-fault
- 2-Global
- 3-Local
- 4 -Dip angle
- 5 -Rise time
- 6-Asperity
- 7-stepped-ramp
- 8-Representation theorem
- 9-radiation coefficient
- 10-Dislocation time-function
- 11-Ramp function
- 12- Dislocation velocity time-function
- 13- Step function
- 14- Radiation pattern coefficient
- 15- Near field
- 16- Intermediate field
- 17- Far field