

تأثیر نوع گسل، بزرگای زلزله و اثر فاصله برای گسلش ناهمگن بر حرکات توانمند زمین در حوزه نزدیک گسل

محمد رضا قائم‌مقامیان، دانشیار / بهنام خلیلی، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد پژوهشگاه

۱- چکیده

شتاب به صورت تابعی از فاصله، بزرگای، شرایط ساختگاه یا سازوکار زمین لرزه که با استفاده از داده‌های جهانی یا منطقه‌ای به دست می‌آید، تعریف می‌گردد. از عمده‌ترین محدودیتهای این روش آن است که روابط مذکور بر اساس زمین‌شناسی و زمین‌ساختی منطقه خاص به دست آمده و استفاده از آنها برای ناحیه دیگر با ویژگیهای زمین‌شناسی و زمین‌ساختی متفاوت، منطقیاً صحیح نمی‌باشد. از طرف دیگر، این روابط ممکن است از دقت کافی در ارائه تخمین صحیحی از میزان شتاب زمین و یا شتاب طیفی در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل به لحاظ مشخصات خاص آن برخوردار نباشند. تجربه زلزله‌های گذشته بویژه زلزله‌های اخیر نشان می‌دهد که جنبش زمین در نزدیک گسل دارای خصوصیات ویژه‌ای می‌باشد که با حرکات زمین در مناطق دور از گسل متفاوت است. در مناطق نزدیک گسل، حرکات زمین شدیداً تحت تاثیر مکانیزم شکست، جهت گسترش گسلش نسبت به ساختگاه و تغییر مکان ماندگار زمین قرار دارد. این عوامل در مجموع سبب ایجاد دو پدیده جهت‌پذیری گسیختگی (Rupture Directivity) و تغییر مکان ماندگار (Fling Step)

در این مقاله، جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل با در نظر گرفتن توزیع غیریکنواخت لغزش بر روی سطح گسل مورد بررسی قرار گرفته است. مناطقی بر روی گسل که جابه‌جایی بیشتری نسبت به جابه‌جایی 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 عمومی گسل، که بر اساس تحقیقات زمین‌شناسی و زلزله‌شناسی بر روی زلزله‌های مهم و گسل مسبب آن قابل تعیین هستند، نظیر ابعاد (طول و عرض) گسل، گشتاور لرزه‌ای و زاویه شیب گسل بر مشخصات پالس حوزه نزدیک گسل به صورت عددی و پارامتری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: حوزه نزدیک گسل، جهت‌پذیری، لغزش غیریکنواخت (اسپریتی)، تابع تئوری گرین

۲- مقدمه

روشهای متداول برای بررسی جنبش نیرومند زمین، اغلب به "روابط کاهندگی" منتهی می‌شوند. در این روابط عمدتاً پیشینه

مدل سینماتیکی در شبیه‌سازی امواج حوزه نزدیک گسل، به تأثیر هر یک از پارامترهای عمومی چشمه و مطالعه پارامتری آنها پرداخته شده است.

۳ - روشهای شبیه‌سازی حرکات توانمند زمین

در صورت مشخص بودن توزیع لغزش و جابه‌جایی بر روی سطح گسل (اثر چشمه) و تابع گرین که اثر پاسخ محیط انتشار است (اثر مسیر انتشار)، حرکت زمین بر اثر زلزله را می‌توان شبیه‌سازی نمود. دروش استفاده از مدل‌های سینماتیکی (مدل هسکل) و مدل‌های دینامیکی برای شبیه‌سازی حرکت توانمند زمین در هنگام زلزله در حوزه نزدیک گسل وجود دارد. مدل‌های سینماتیکی، اثر توابع جابه‌جایی در سطح گسل را بدون در نظر گرفتن ملاحظات فیزیکی تنش، فراهم می‌نماید. علی‌رغم عدم رعایت شرایط دینامیکی گسلش، مدل‌های سینماتیکی نتایج مهم متعددی در تفسیر حرکت زمین ناشی از زلزله‌های حوزه نزدیک گسل و برآورد توزیع لغزش و گسترش گسیختگی بر روی سطح گسل را به همراه داشته است. هسکل در سال ۱۹۶۴ پنج پارامتر طول گسل، عرض گسل، لغزش نهایی، زمان فرایش و سرعت گسیختگی را که از مهمترین پارامترهای مدل‌های سینماتیکی هستند، برای نشان دادن تأثیر گسلش معرفی کرده است. این روش بیشتر برای مشخص کردن ویژگیهای زلزله‌های بزرگ به کار می‌رود [۱]. آکی در سال ۱۹۶۸ اولین اقدام را برای شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل با استفاده از مدل هسکل و در نظر گرفتن لغزش یکنواخت و سرعت گسیختگی ثابت بر روی سطح گسل در یک نیم فضا به انجام رساند. نگاشتهای حاصل از شبیه‌سازی به روش هسکل، تطابق خوبی با نگاشتهای ثبت شده در هنگام زلزله ۱۹۶۶

شده که باید جهت تخمین حرکت زمین در نزدیکی گسل‌های فعال مد نظر قرار گیرند؛ لذا برای واقعی‌تر کردن بررسی رفتار جنبش زمین در حوزه نزدیک گسل باید پارامترهای مؤثر چشمه لرزه‌ای خصوصاً در حوزه نزدیک گسلی نیز به گونه‌ای لحاظ گردد.

پارامترهای گسل در حوزه نزدیک را می‌توان به دو قسمت پارامترهای محلی (Local) و پارامترهای عمومی (Global) تقسیم‌بندی نمود. پارامترهای محلی چشمه شامل لغزش ناهمگن (اسپریتی)، میزان لغزش بر روی اسپریتی، موقعیت اسپریتی و ابعاد آن، زمان فرایش (Rise Time) و سرعت گسیختگی می‌باشد که از تحلیل برگشتی امواج دور لرزه‌ای به دست می‌آیند. توزیع لغزش و سرعت آن بر روی سطح گسل در محدوده چشمه بویژه برای زلزله‌های با بزرگای بیشتر از شش، یکنواخت و همگن نمی‌باشد؛ بنابراین برای برآورد حرکت نیرومند زمین باید توزیع جابه‌جایی و میزان آن و نحوه گسیختگی علاوه بر جابه‌جایی متوسط مشخص گردد. محدوده‌ای بر روی سطح گسل که میزان جابه‌جایی بیشتری نسبت به جابه‌جایی متوسط دارد به عنوان اسپریتی (Asperity) شناخته می‌شود. مشخصات اسپریتی تأثیر بسزایی در برآورد جنبش نیرومند زمین خصوصاً در محدوده حوزه نزدیک گسل دارد. پارامترهای عمومی چشمه نیز، ابعاد گسل (طول و عرض)، گشتاور لرزه‌ای، جهت لغزش روی گسل و زاویه شیب گسل (Dip Angle) می‌باشند که بر اساس تحقیقات زمین‌شناسی و زلزله‌شناسی بر روی زلزله‌های مهم و گسل مسبب آن قابل تعیین هستند. از آنجایی که زلزله‌های مختلف بزرگای متفاوت و گسل‌های مسبب آنها ابعاد و شیبهای متفاوتی دارند، بررسی اثر تغییرات این پارامترها بر مشخصات پالس حوزه نزدیک گسل امری مهم به نظر می‌رسد؛ لذا در این مقاله ضمن تشریح

پارکفیلد نشان داد [۲]. البته این مدل غالباً برای شبیه‌سازی حرکات توانمند زمین در فرکانس‌های پایین به کار برده می‌شود؛ ولی از آنجایی که حرکات توانمند زمین در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل به صورت یک پالس با فرکانس پایین نمایان می‌گردد، این روش در شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل کاربرد فراوان دارد.

مدل دینامیکی چشمه علاوه بر ملاحظات سینماتیکی شکست، شرایط تنش راهم به صورت دینامیکی بر روی سطح گسل در نظر می‌گیرد. در این مدل، ابتدا برای آنکه شرایط فیزیکی داخل و خارج چشمه به صورت رضایت‌بخشی شبیه‌سازی گردد، گسیختگی به صورت انباشته شده در نظر گرفته می‌شود و سپس بر روی سطح گسل گسترش می‌یابد. کاستروف از اولین دانشمندانی بود که در سال ۱۹۶۶ از مدل دینامیکی چشمه برای شبیه‌سازی استفاده نمود. او ترک برشی دو بعدی خارج از صفحه که با سرعت گسیختگی معینی منتشر می‌شود را تحلیل نمود و رفتار سرعت لغزش و تمرکز تنش را در نوک ترکها نشان داد [۳]. ماداریاگا در سال ۱۹۷۶ جنبش لرزه‌ای حوزه دور و طیف ترک خوردگی کروی با سرعت ثابت و شعاع مشخص را با استفاده از روش تفاضل محدود مورد مطالعه قرار داد [۴].

اخیراً روشهای ترکیبی دوتایی با استفاده از ترکیب هر دو مدل سینماتیکی و تصادفی برای شبیه‌سازی نگاهشهاد فرکانس‌های باند پهن معرفی گردیده است که در آنها برای شبیه‌سازی نگاهشهاد فرکانس بالا با توجه به ناشناخته بودن منشأ فیزیکی آن در چشمه از فرایندهای تصادفی استفاده می‌گردد. ساتو در سال ۱۹۸۴ گسلش نامنظمی را برای برآورد جنبش نیرومند فرکانس بالای زمین پیشنهاد نمود [۵]. سطح گسل برای زلزله‌های بزرگ به اجزای کوچکتری به نام زیرگسل

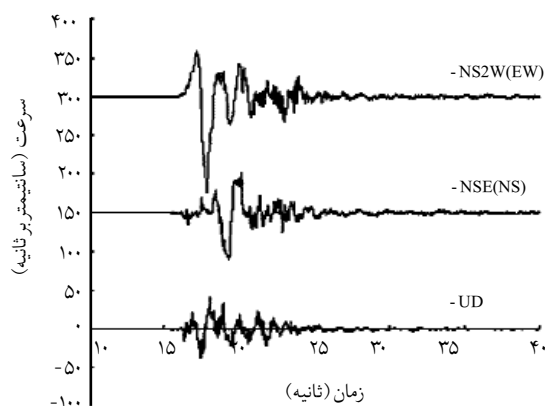
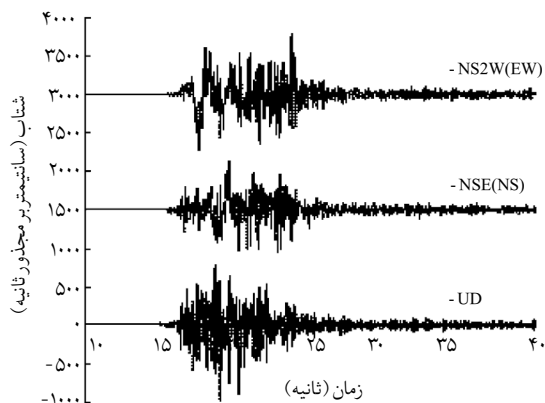
تقسیم می‌گردد. هر کدام از این اجزای عنوان یک چشمه نقطه‌ای لرزه‌زاد در نظر گرفته می‌شوند. جنبش نیرومند حاصل از جابه‌جایی گسل طبق اصل برهم‌نهی، حاصل جمع موجهای لرزه‌ای ایجاد شده از هر یک از چشمه‌های نقطه‌ای می‌باشد. تابع زمانی چشمه به صورت تابع شیب‌دار پله‌ای (Stepped-Ramp) با شیبهای جزئی که بر اساس تجارب آزمایشگاهی اوناکا (۱۹۸۶) بر روی شکست لغزشی چسبنده تعیین می‌گردد به صورت تصادفی مشخص می‌شوند [۶].

۴ - ویژگیهای زلزله‌های نزدیک گسل

تجربه زلزله‌های گذشته بویژه زلزله‌های اخیر نشان می‌دهد که جنبش زمین در نزدیک گسل خصوصیات ویژه‌ای دارد که با حرکات زمین در مناطق دور از گسل متفاوت است. در مناطق نزدیک گسل، حرکات زمین شدیداً تحت تأثیر مکانیزم شکست، جهت گسترش گسلش نسبت به ساختگاه و تغییر مکان ماندگار زمین قرار دارد. این عوامل در مجموع سبب ایجاد دو پدیده جهت‌پذیری گسیختگی و تغییر مکان ماندگار (گام جهشی تغییر مکان) شده که برای تخمین حرکت زمین در نزدیکی گسلهای فعال مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با در نظر گرفتن موقعیت ساختگاه و جهت انتشار گسیختگی و لغزش بر روی گسل، می‌توان جهت‌پذیری را به سه گروه جهت‌پذیری پیش‌رونده (Forward Directivity)، جهت‌پذیری پس‌رونده (Backward Directivity) و جهت‌پذیری خنثی (Neutral Directivity) تقسیم‌بندی نمود. پدیده جهت‌پذیری پیش‌رونده هنگامی اتفاق می‌افتد که گسیختگی به سمت ساختگاه گسترش یافته و جهت لغزش گسل نیز به سمت آن باشد. در این صورت به دلیل نزدیک بودن

سال ۱۹۹۹ ترکیه و تایوان، تغییر مکان دائمی زمین بر اثر تغییر شکل استاتیک آن در مناطق نزدیک گسل می باشد. این تغییر مکان استاتیک که تغییر مکان ماندگار (گام جهشی تغییر مکان) نیز نامیده می شود، در بازه زمانی چند ثانیه ای لغزش گسل اتفاق می افتد. تغییر مکان ماندگار در جهت لغزش گسل اتفاق افتاده و مستقل از حرکت پالسی زمین (در امتداد عمود بر راستای لغزش) می باشد. در گسلش راستالغز، پالس جهت پذیری در راستای عمود بر جهت لغزش اتفاق می افتد؛ در حالی که تغییر مکان ماندگار در جهت لغزش گسل رخ می دهد؛ ولی در گسلش شیب لغز، هم پالس جهت پذیری و هم تغییر مکان ماندگار در جهت عمود بر لغزش رخ می دهد [۷].



شکل (۱): نگاشتهای شتاب و سرعت زلزله بم که نحوه تأثیر جهت پذیری پیش رونده را در مؤلفه عمود بر گسل نشان می دهد (مؤلفه N82W در جهت عمود بر امتداد گسل می باشد).

سرعت گسیختگی گسل به سرعت امواج برشی زلزله (سرعت گسیختگی کمی کمتر از سرعت امواج برشی است)، هنگامی که جبهه گسیختگی از کانون به سمت ساختگاه انتشار می یابد امواج آزاد شده بر اثر لغزشهای متوالی نواحی مختلف گسل در نزدیکی جبهه گسلش (قسمت جلوی مسیر گسیختگی در گسل) جمع می شوند. در نتیجه، در پدیده جهت پذیری پیش رونده، جبهه موج دفعتاً و به صورت یک لرزش قوی به ساختگاه می رسد. این لرزش به صورت یک پالس قوی حرکت در جهت عمود بر لغزش و در ابتدای نگاشت زلزله بویژه در تاریخچه های زمانی سرعت و تغییر مکان قابل تشخیص است؛ بنابراین شرایط جهت پذیری پیش رونده از روی مدت دوام کم و پالس هایی با دامنه بزرگ و پریودهای متوسط تا بلند قابل شناسایی است. در شکل (۱) تاریخچه های زمانی شتاب و سرعت در هر سه مؤلفه، برای زلزله ۵ دیماه ۱۳۸۲ بم در نزدیک گسل نشان داده شده است. مطابق این شکل می توان تأثیر جهت پذیری پیش رونده را در مؤلفه عمودی سرعت به صورت یک پالس با دامنه بلند مشاهده نمود.

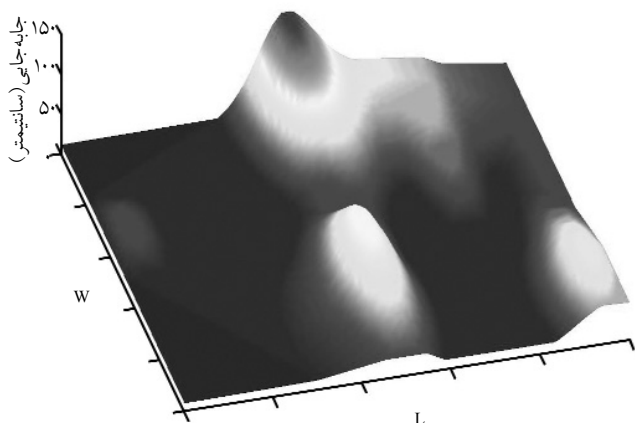
اگر ساختگاه در موقعیتی باشد که گسترش گسیختگی موجب دور شدن جبهه گسلش از ساختگاه شود، امواج زلزله به آرامی و به صورت توزیع شده در طول زمان به ساختگاه می رسند. به این شرایط اصطلاحاً جهت پذیری پس رونده گفته می شود که مشخصه آن نگاشتهایی با دامنه کم و مدت دوام طولانی می باشد. در صورتی که ساختگاه در موقعیتی قرار گیرد که گسیختگی نه از آن دور گردد و نه به سمت آن باشد، جهت پذیری خنثی رخ می دهد. پدیده جهت پذیری هم در گسلهای امتداد لغز (Strike Slip) و هم در گسلهای شیب لغز (Dip Slip) اتفاق می افتد.

خصوصیت دیگر نگاشت زلزله های جدید مانند زلزله های

۵- اثر لغزش غیریکنواخت 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 به معرفی الگوهای برای مقاومت و افت تنش ناهمگن روی سطح گسل منجر شده است. مدل چشمه اسپریتی یکی از مدل‌های چشمه‌های ناهمگن زلزله می‌باشد که در آن لغزش روی سطح گسل نامنظم است. در مدل چشمه اسپریتی مناطق با تنش بالا می‌شکنند و غالباً عامل انتشار انرژی لرزه‌ای فرکانس پایین هستند. به این ترتیب، اسپریتی‌ها به مناطقی بر روی سطح گسل اطلاق می‌شود که جابه‌جایی بیشتری نسبت به جابه‌جایی میانگین بر روی سطح گسل خواهند داشت. سامرویل در سال ۱۹۹۹ اسپریتی را به عنوان مناطقی بر روی سطح گسل که جابه‌جایی آنها از دو برابر جابه‌جایی میانگین در روی سطح گسل بیشتر می‌باشد معرفی کرد [۸]. باید توجه داشت که اصولاً توزیع یکنواخت لغزش بر روی سطح گسل وجود نداشته و یکنواخت در نظر گرفتن جابه‌جایی در سطح گسل به دلیل کمبود داده و اطلاعات موجود در خصوص زلزله‌ها می‌باشد. اخیراً با توجه به حجم داده‌های فراوان پس از گسلش برای زلزله‌های با بزرگای بالاتر از ۶ و با استفاده از روش تحلیل برگشتی، مشخصات اسپریتی‌ها بر روی سطح گسل قابل تعیین می‌باشد. در شکل (۲) توزیع غیریکنواخت لغزش

بر روی سطح گسل در زلزله بم که توسط یاگی در سال ۲۰۰۳ از روی موجهای دور لرزه‌ای تهیه شده، نشان داده شده است. مطالعات اخیر توسط سامرویل و همکاران [۸] و قائم‌میان [۹]، تأثیر اسپریتی و مشخصات آن بر حرکات توانمند زمین در حوزه نزدیک گسل بویژه بر پالس‌های حاصل از جهت‌پذیری پیش‌رونده را تأکید می‌نماید. به این ترتیب، با استفاده از مدل چشمه اسپریتی می‌توان شرایط واقعی تری برای شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل فراهم ساخت.



شکل (۲): توزیع غیریکنواخت لغزش بر روی گسل در زلزله بم با استفاده از تحلیل برگشتی امواج دور لرزه‌ای. سه اسپریتی بر روی سطح گسل قابل مشاهده می‌باشد [۹].

۶- شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک برای مدل گسل محدود

با استفاده از تئوری بازنمایی (Representation Theorem) می‌توان نشان داد که در محیط نامحدود، همسان و همگن، جابه‌جایی $\vec{u}_i(\vec{x}, t)$ 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 Σ (شکل ۳) با رابطه (۱) ارائه می‌گردد [۱۰]:

$$\vec{u}_i(\vec{x}, t) = \frac{R_c(\phi, \delta)}{4\pi\rho c^3 r} \cdot \mu \iint_{\Sigma} \Delta U_j(\vec{\xi}, t - \frac{r}{c}) d\Sigma \quad (1)$$

در این رابطه، μ معرف صلبیت، r فاصله مابین سطح گسل و نقطه ثبت، R_c (اندیس c بیانگر نوع موج از جمله P، SV و یا

و از طریق آن جنبش زمین، $u^X(t)$ ، را در نقطه X به دست آورد:

$$\bar{u}^X(t) = \sum_k^N m_k \bar{G}_k^X(t) \quad (4)$$

$$\bar{G}_k^X(t) = \delta(t - \frac{r_k}{V_R}) * f^s(t) * \bar{f}_k^X(t) \quad (5)$$

در روابط (4) و (5)، N تعداد اعضای گسل، $\bar{G}_k^X(t)$ تابع گرین، m_k لغزش و جابه جایی عضو k ، r_k فاصله مابین نقطه شروع گسیختگی و مرکز عضو k ، V_R سرعت گسیختگی، $\delta(\cdot)$ معرف تابع دلتای دیراک، $f^s(t)$ تابع زمان چشمه و $\bar{f}_k^X(t)$ تابع پاسخ ضربه برای جابه جایی عضو k است. تابع زمان جابه جایی چشمه (Dislocation Time-Function) به صورت تابع شیبدار (Ramp Function) و تابع سرعت جابه جایی (Dislocation Velocity Time-Function) به صورت پله ای (Step Function) فرض می شود. برای یک محیط همگن، همسان و نامحدود تابع پاسخ ضربه به صورت رابطه (6) توسط آکی و ریچاردز ارائه گردیده است [10]:

$$f_k^X(\bar{x}, t) = 1/4\pi\rho(\gamma_k\gamma_p - \delta_{pk})r^{-3} \quad (6)$$

$$\int_{r/\alpha}^{r/\beta} t' \delta(t - \tau - t') dt' + 1/4\pi\rho V_p^2 \gamma_k \gamma_p r^{-1} \delta(t - \tau - r/\alpha) +$$

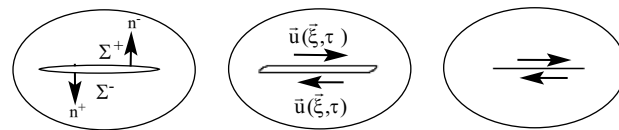
$$1/4\pi\rho V_s^2 (\gamma_k \gamma_p - \delta_{kp}) r^{-1} \delta(t - \tau - r/\beta)$$

در این رابطه r فاصله تا کانون، V_p سرعت موج P ، V_s سرعت موج S ، ρ چگالی، τ زمان فرآینش، γ_k و γ_p بردارهای هادی است که جهت ساختگاه تاگسل را حین انتشار نشان می دهند.

۷- بررسی پارامتری عوامل گسلش

بر اساس روابط مذکور، برنامه کامپیوتری که می تواند حرکات توانمند زمین در حوزه نزدیک گسل را شبیه سازی نماید توسط قائم مقامیان و یاماموتو در سال ۲۰۰۱، در محیط فرترن تهیه شده است. به منظور مطالعه پارامتری عوامل گسلش بر پالس حوزه نزدیک گسل لازم است تا مدلی برای گسل در نظر گرفته شود. بدین منظور، مدلی از گسل مطابق

SH می باشد) ضریب انتشار (Radiation Coefficient)، ϕ ، امتداد گسل و δ شیب گسل می باشد. تابع Δu به عنوان "تابع چشمه" و یا "تابع لغزش" در سطح گسل می باشد.



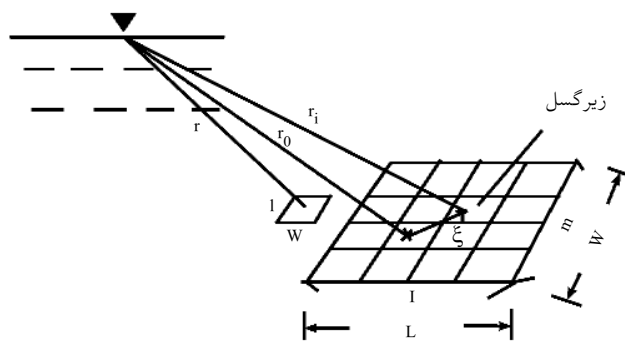
شکل (۳): تصویر شماتیکی از تغییر مکان ناپیوسته $\bar{u}(\bar{\xi}, \tau)$ در نقطه $(\bar{\xi}, \tau)$ بر روی سطح داخلی Σ

برای گسلی با طول L و پهنای W ، تغییر مکان موج را می توان به صورت رابطه ساده (۲) بیان نمود:

$$\bar{u}_i(\bar{x}, t) = \int_0^L \int_0^W \Delta u_i(\xi, \eta) * \bar{G}(\bar{x}, \xi, \eta, t) d\xi d\eta \quad (2)$$

در این رابطه، G تابع گرین و $*$ معرف کانولوشن می باشد. برای شبیه سازی جنبش زمین، سطح گسل به زیر گسلهای کوچکتری تقسیم بندی می گردد (شکل ۴). اگر سطح گسل به l عضو در جهت طول گسل و m عضو در جهت پهنای گسل تقسیم بندی گردد، در این صورت رابطه (۲) را می توان به صورت رابطه (۳) بازنویسی نمود:

$$\bar{u}_i(\bar{x}, t) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \int_{L_i}^{L_i+\Delta L_i} \int_{W_i}^{W_i+\Delta W_i} \Delta u_i(\xi_i, \eta_j, t - \tau_{ij}) * \bar{G}(\bar{x}, \xi_i, \eta_j, t) d\xi d\eta \quad (3)$$



شکل (۴): سطح گسل به l عضو در جهت طول گسل و m عضو در جهت پهنای گسل تقسیم بندی می گردد و از مجموع تغییر مکانهای تمامی اعضا، تغییر مکان نهایی به دست می آید [۷].

در رابطه (۳)، τ_{ij} زمانی است که صرف انتشار گسیختگی از کانون تا عضو i و j گسل می شود. به این ترتیب، می توان رابطه (۳) را به صورت روابط ساده (۴) و (۵) برای هر زیر گسل (k) تبدیل نمود

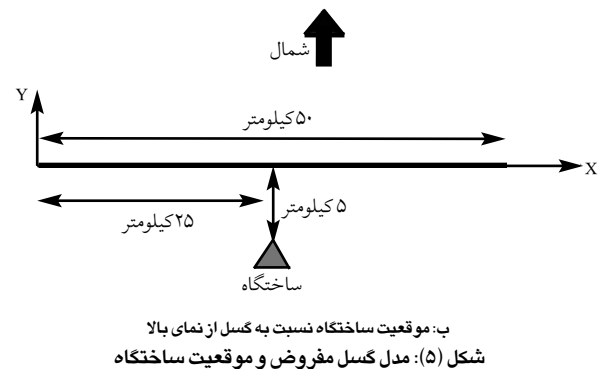
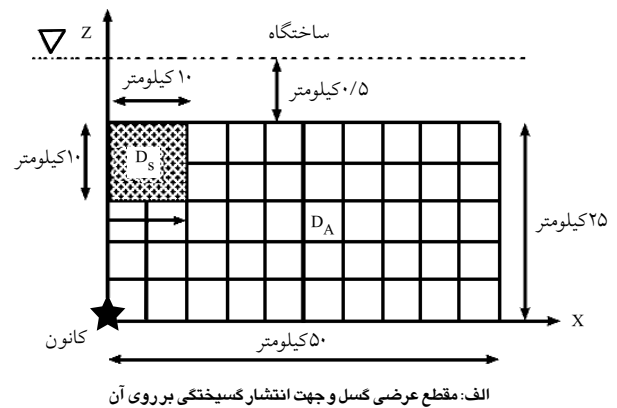
با توجه به جهت گسلش، ضرایب انتشار و موقعیت ساختگاه عموماً پالس حوزه نزدیک و اثر جهت پذیری پیش رونده در مؤلفه عمود بر امتداد گسل ظاهر می شود؛ لذا در بررسیهای انجام شده مؤلفه سرعت در جهت عمود بر امتداد گسل مد نظر قرار گرفته است.

قائمقامیان در سال ۲۰۰۵ نحوه تأثیر مشخصات اسپریتی ها را در جنبش نیرومند زمین مورد بررسی قرار داد و مشخص نمود زمانی که اسپریتی در کمترین فاصله از سطح زمین قرار می گیرد (اسپریتی کم عمق)، پالس به دست آمده در ساختگاه بیشترین دامنه را خواهد داشت [۹]. شکل (۵) مبین آن است که اسپریتی در روی مدل گسل مفروض به صورت اسپریتی کم عمق انتخاب شده و سپس نحوه تأثیر تغییرات زاویه شیب و بزرگای زلزله بر پالس جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل مورد مطالعه قرار گرفته است.

۷-۱- تأثیر زاویه شیب گسل

زاویه بین سطح افقی و صفحه گسل، زاویه شیب گسل نامیده می شود. از جمله پارامترهای عمومی گسل که بر پالس حوزه نزدیک گسل تأثیر خواهد داشت، شیب صفحه گسل می باشد. به منظور مطالعه منطقی اثر تغییرات شیب گسل در تعیین جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل نسبت به جهت لغزش، این تغییرات با در نظر گرفتن دو مقدار صفر و ۴۵ درجه برای زاویه لغزش (زاویه بین راستای گسل و راستای لغزش) بررسی شده است. در هر یک از این حالات مقدار زاویه شیب از صفر تا ۹۰ درجه در بازه های ۱۰ درجه تغییر خواهد کرد. در شکل (۶) پالس های شبیه سازی شده به ازای مقادیر مختلف شیب گسل نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می شود که در هر دو حالت با افزایش شیب گسل دامنه پالس نیز افزایش می یابد.

شکل (۵) و ساختگاهی در فاصله پنج کیلومتری از گسل مفروض برای شبیه سازی جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل در نظر گرفته شده که پارامترهای لرزه ای آن در جدول (۱) ارائه شده است. برای توزیع غیریکنواخت لغزش و جابه جایی، محدوده ای بر روی سطح گسل که هاشور خورده، با داشتن جابه جایی بیشتری نسبت به بقیه نقاط به عنوان اسپریتی انتخاب شده است (شکل ۵).



جدول (۱): پارامترهای چشمه مفروض در شبیه سازی جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل

گشتاور لرزه ای	$10^{26} \times 1/5$ دین سانتیمتر
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 فرآیند	۱ ثانیه
میزان لغزش اسپریتی (D_s)	۴۰۰ سانتیمتر

گسلهایی که شامل هر دو مؤلفه شیب لغز و امتداد لغز می باشند، پالس های قوی تری در ساختگاه ایجاد می نمایند. به عبارت دیگر، می توان نتیجه گرفت که مکانیزم گسلش نیز در برآورد جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل مؤثر خواهد بود.

۷-۲- تأثیر بزرگای زلزله

از دیگر پارامترهای گسل که در تعیین جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل تأثیرگذار خواهد بود، بزرگای زلزله است. بزرگای گشتاوری یکی از مقیاسهای بزرگای زلزله بوده و به دلیل آنکه مستقیماً به گشتاور لرزه ای وابسته است، مشکل اشباع بزرگی در آن وجود ندارد و معیار مناسبی برای بیان بزرگای زلزله می باشد. از آنجایی که بزرگای گشتاوری با سایر پارامترهای عمومی گسل نظیر طول و عرض گسل، جابه جایی متوسط و... مرتبط می باشد، تغییرات این کمیت مقادیر پارامترهای دیگر را نیز تحت تأثیر قرار می دهد. محققان بسیاری [۸، ۱۱ و ۱۲] با استفاده از داده های زلزله های مختلف، روابط تجربی و نیمه تجربی زیادی بین بزرگای زلزله و سایر پارامترهای گسل به دست آورده اند که مهمترین آنها عبارتند از:

$$M_w = 2/3 \log M_0 - 10.7 \quad (7)$$

$$\log L = 0.59 M_w - 2.44 \quad (8)$$

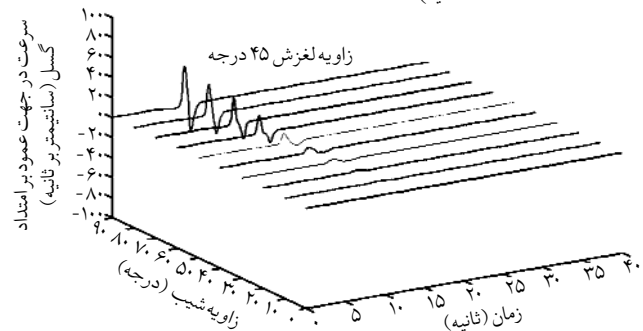
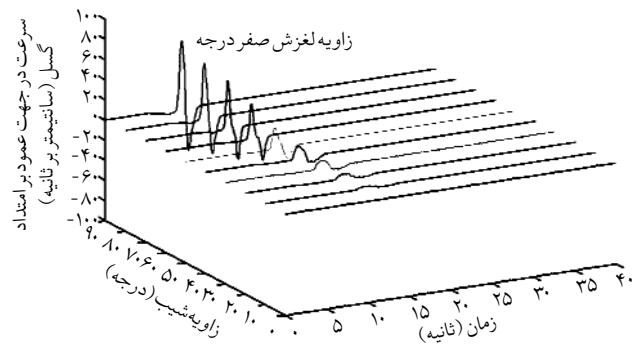
$$\log W = 0.32 M_w - 1.01 \quad (9)$$

$$R = 1.08 \times 10^{-8} \times M_0^{1/3} \quad (10)$$

$$\log \bar{D} = 0.5 M_w - 1.44 \quad (11)$$

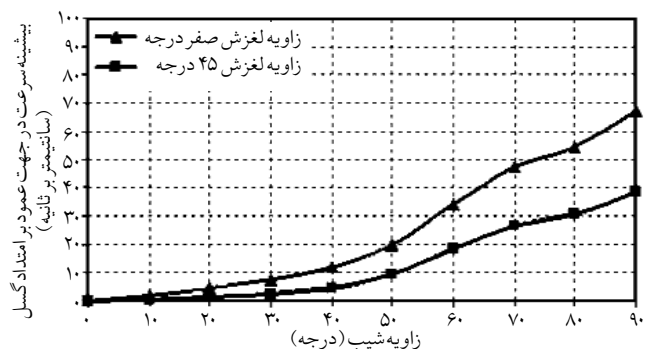
$$D = 2.01 \bar{D} \quad (12)$$

روابط (۸) و (۹) توسط ولز و کپراسمیت [۱۱] و روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) توسط سامرویل [۸] ارائه گردیده است که در آنها M_w بزرگای گشتاوری، L طول گسل، W پهناي گسل، M_0 گشتاور لرزه ای، R شعاع بزرگترین اسپریتی بر روی سطح

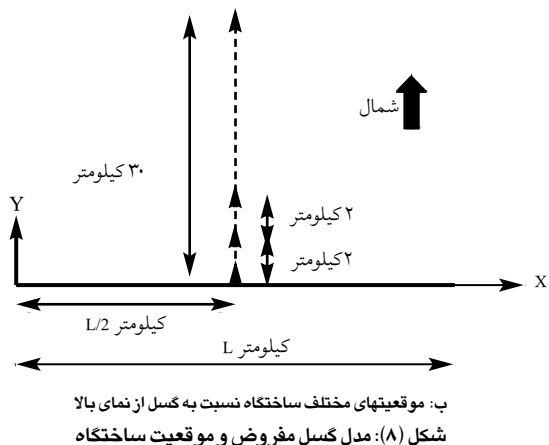
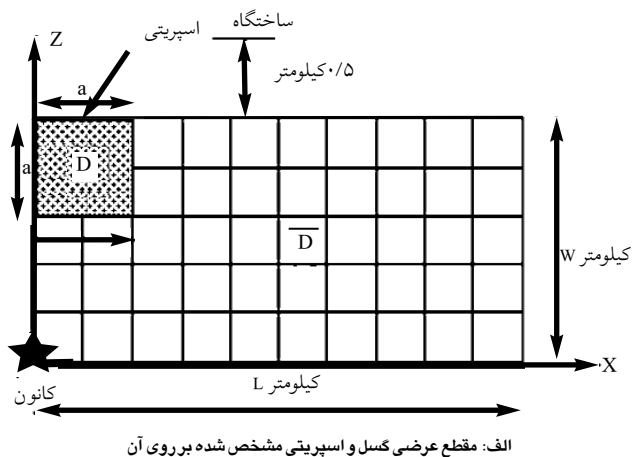


شکل (۶): پالس های شبیه سازی شده جنبش نیرومند زمین برای شیبهای مختلف گسل در دو حالت با زاویه لغزش ۰ و ۴۵ درجه برای مدل مفروض

اگر مطابق شکل (۷) نمودار بیشینه مقدار سرعت در پالس های شبیه سازی شده بر حسب شیب گسل رسم شود، بخوبی می توان روند افزایشی سرعت بیشینه را با افزایش شیب گسل مشاهده نمود. نمودار مربوط به گسلهای با زاویه لغزش صفر درجه در بالای نمودار گسلهای با زاویه لغزش ۴۵ درجه قرار گرفته است. زاویه لغزش صفر درجه، معرف گسلهای امتداد لغز خالص بوده و در مقابل زاویه لغزش ۴۵ درجه گسلهایی با مؤلفه های امتداد لغز و شیب لغز را نشان می دهد. به این ترتیب، با توجه به شکل (۷) می توان چنین استنباط نمود که گسلهای امتداد لغز در مقابل



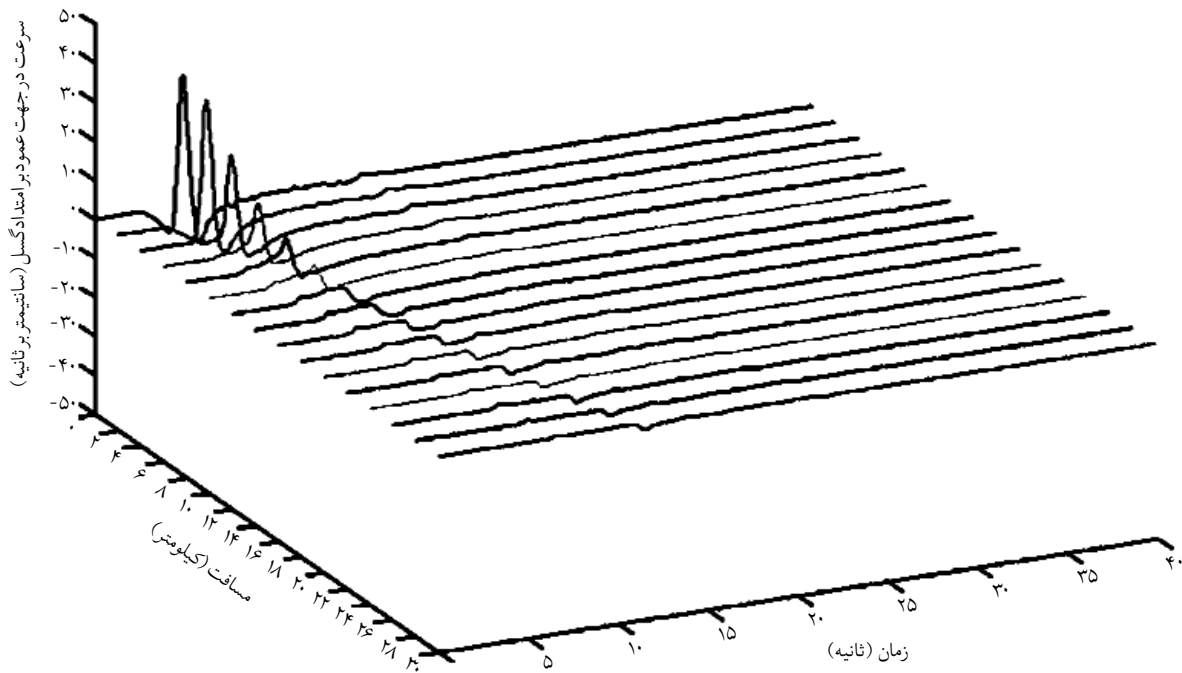
شکل (۷): نمودار بیشینه سرعت پالس های شبیه سازی شده بر حسب تغییرات شیب گسل برای دو حالت با زاویه لغزش ۰ و ۴۵ درجه



جدول (۲): مقادیر پارامترهای مدل های لرزه ای مفروض

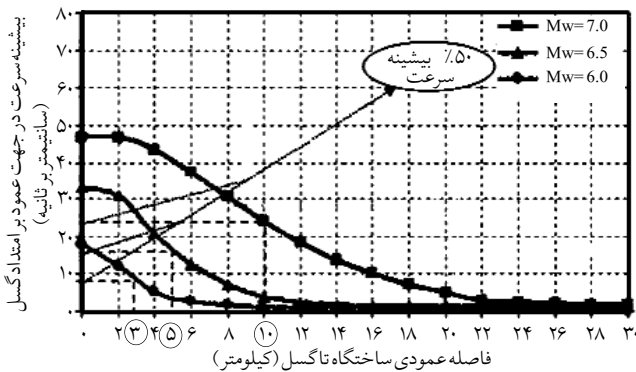
$M_w=7.0$	$M_w=6.5$	$M_w=6.0$	بزرگای گشتاوری	پارامترهای گسل
$3/54 \times 10^{26}$	$6/3 \times 10^{25}$	$1/12 \times 10^{25}$	گشتاور لرزه ای (دین \times سانتیمتر)	
۵۰	۲۵	۱۳	$L =$ طول گسل (کیلومتر)	
۱۸	۱۲	۹	$W =$ پهناي گسل (کیلومتر)	
۱۲	۷	۴	$a =$ طول اسپریتی (کیلومتر)	
۱۲۰	۶۵	۳۶	$\bar{D} =$ جابه جایی متوسط سطح گسل (سانتیمتر)	
۲۴۰	۱۳۰	۷۲	$D =$ جابه جایی اسپریتی (سانتیمتر)	
۵/۵	۵/۵	۵/۵	سرعت موج P (کیلومتر بر ثانیه)	
۳/۰	۳/۰	۳/۰	سرعت موج S (کیلومتر بر ثانیه)	
۲/۵	۲/۵	۲/۵	سرعت گسیختگی (کیلومتر بر ثانیه)	
۱/۰	۱/۰	۱/۰	زمان فرایش (ثانیه)	

گسل، \bar{D} جابه جایی و لغزش متوسط بر روی سطح گسل و D مقدار جابه جایی بر روی اسپریتی می باشد. برای در نظر گرفتن اثر بزرگای زلزله بر پالس حوزه نزدیک گسل، با توجه به اینکه عموماً بزرگای زلزله های ایران در بازه ۶ تا ۷ می باشد، سه مقدار ۶، ۶/۵ و ۷ برای بزرگای گشتاوری فرض شده و سایر پارامترهای گسل با استفاده از روابط مذکور تعیین گردیده است. گسلهای امتدادلغز باعث ایجاد پالس های قوی تری در ساختمانها می شوند؛ بنابراین مطابق شکل (۸، الف) مدلی از گسل امتدادلغز که پارامترهای لرزه ای آن به ازای هر مقدار بزرگای گشتاوری در جدول (۲) آورده شده است، در نظر گرفته شد. به منظور بررسی اثر فاصله ساختمان نسبت به گسل بر مشخصات پالس حوزه نزدیک گسل نیز مطابق شکل (۸، ب) موقعیتهای مختلفی در جهت عمود بر امتداد گسل برای ساختمانها در نظر گرفته شد و فاصله ای را که در آن اثر پالس حوزه نزدیک گسل به ازای بزرگای مختلف مؤثر می باشد به دست آمد. به ازای سه مقدار بزرگای گشتاوری، سه مدل برای گسل تشکیل می شود و پالس های ناشی از جنبش نیرومند زمین به طور مجزا برای هر یک از چشمه ها در فواصل مختلف در جهت عمود بر امتداد گسل محاسبه شده است. به عنوان نمونه در شکل (۹) پالس های شبیه سازی شده در موقعیتهای مختلف ساختمانها در جهت عمود بر امتداد گسل برای بزرگای ۶/۵ نشان داده شده است. مطابق شکل واضح است که با افزایش فاصله از گسل، دامنه پالس کاهش می یابد. این روند دقیقاً برای بزرگای ۶ و ۷ نیز قابل مشاهده است. نمونه ای از پالس های شبیه سازی شده جنبش نیرومند زمین، به ازای بزرگای مختلف در فاصله چهار کیلومتری ساختمانها در جهت عمود بر امتداد گسل در شکل (۱۰) نشان داده شده است. شکل مذکور مبین آن است که با افزایش بزرگای زلزله، دامنه و پیرو پالس افزایش می یابد.

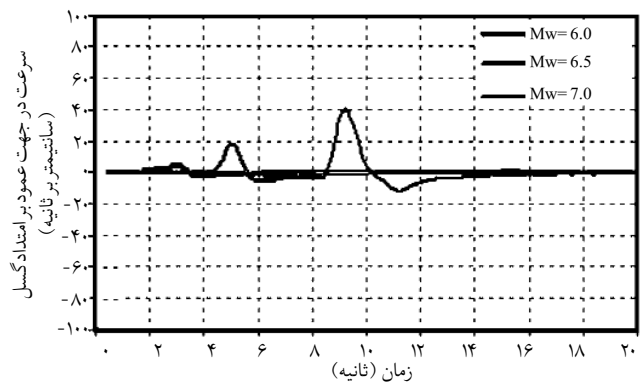


شکل (۹): پالس‌های شبیه‌سازی شده سرعت در موقعیتهای مختلف ساختگاه در جهت عمود بر امتداد گسل به ازای Mw=6.5

عنوان شاخص تأثیر پالس حوزه نزدیک گسل نسبت به فاصله تا ساختگاه فرض شود، مشاهده می‌شود با افزایش بزرگای زلزله فاصله‌ای که در آن اثر پالس حوزه نزدیک گسل قابل توجه خواهد بود نیز افزایش می‌یابد. این فاصله برای زلزله‌های با بزرگای ۶، ۵/۶ و ۷ به ترتیب مقادیر ۳، ۵ و ۱۰ کیلومتر خواهد بود.



شکل (۱۱): نمودار بیشینه سرعت پالس‌های شبیه‌سازی شده بر حسب فاصله عمودی ساختگاه از گسل به ازای بزرگای گشتاوری متفاوت



شکل (۱۰): پالس‌های شبیه‌سازی شده جنبش نیرومند زمین در فاصله چهار کیلومتری ساختگاه در جهت عمود بر امتداد گسل به ازای بزرگای گشتاوری متفاوت

چنانچه نمودار حداکثر سرعت پالس‌های شبیه‌سازی شده بر حسب فاصله عمودی از گسل برای هر سه حالت مطابق شکل (۱۱) رسم شود، بخوبی می‌توان روند کاهش سرعت بیشینه را با افزایش فاصله از گسل برای هر یک از حالت‌های در نظر گرفته شده مشاهده نمود. شکل (۱۱) مبین آن است که هر چه بزرگای زلزله بیشتر باشد حداکثر سرعت پالس ایجاد شده هم، به مراتب در موقعیتهای مشابه ساختگاه، بیشتر خواهد بود. اگر فاصله متناظر با ۵۰٪ مقدار حداکثر سرعت در نمودار به

۸ - نتیجه‌گیری

توزیع خرابی زلزله‌های بزرگ اخیر مانند هیوگوکن نانبو (۱۹۹۵، ژاپن)، کوجائیلی (۱۹۹۹، ترکیه)، چی چی (۱۹۹۹، تایوان) و

زلزله بم (۲۰۰۳، ایران) نشان دادند که مشخصات زلزله‌های حوزه نزدیک شدیداً تحت تأثیر گسلش ناهمگن بر روی سطح گسل می‌باشد. توزیع لغزش و سرعت آن بر روی سطح گسل در محدوده چشمه بویژه برای زلزله‌های با بزرگای بیشتر از شش یکنواخت و همگن نمی‌باشد؛ بنابراین برای برآورد حرکت نیرومند زمین باید توزیع جابه‌جایی و میزان آن و نحوه گسیختگی علاوه بر جابه‌جایی متوسط مشخص گردد. محدوده‌ای بر روی سطح گسل که میزان جابه‌جایی بیشتری نسبت به جابه‌جایی متوسط دارد به عنوان اسپریتی شناخته می‌شود. مشخصات اسپریتی تأثیر بسزایی در برآورد جنبش نیرومند زمین بویژه در محدوده حوزه نزدیک گسل دارد. از طرفی از آنجایی که زلزله‌های مختلف بزرگای متفاوت دارند و گسل‌های مسبب آنها دارای ابعاد و شبیهای متفاوتی می‌باشند، بررسی اثر تغییرات این پارامترها بر مشخصات پالس حوزه نزدیک گسل امری مهم به نظر می‌رسد.

۹- مراجع

1. Haskell, N.A. (1964). Total energy and spectral density of elastic wave radiation from propagating faults. *Bull. Seism. Soc. Am*, 54, 1811-1842.
2. Aki, K. (1968). Seismic displacement near a fault. *J. Geophys. Res.*, 73, 5359-5376.
3. Kostrov, B. V. (1966). Unsteady propagation of longitudinal shear cracks. *J. Applied Math. and Mechanics*, 30, 1241-1248.
4. Madariaga, R. (1976). Dynamics of an expanding circular fault. *Bull. Seism. Soc. Am*, 66, 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, No. A-59-3, 117-138]. Japan: Ministry of Education, Science and Culture.
6. Ohnaka, M. (1986). Dynamic breakdown processes and the generating mechanism for high-frequency elastic radiation during strike-slip instabilities. *Earthquake Source Mechanism, Maurice Ewing*, 6, 13-24.
7. Stewart, J.P., Chiou, S.J., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., Abrahamson, N.A. (2001). *Ground motion evaluation procedures for performance based design*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, No. EEC-9701568.
8. Somerville, P., Abrahamson, N. Smith, N., Irikura, K., Graves R., Sawada, S., Wald, D., Iwasaki, Y., Kowada, A. (1999). Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong

در این مقاله، ضمن تشریح مدل سینماتیکی در شبیه‌سازی امواج حوزه نزدیک، حرکات زمین در حوزه نزدیک گسل با استفاده از مدل چشمه محدود و توابع تئوری گرین برای محیط نامحدود شبیه‌سازی شده و به تأثیر هر یک از پارامترهای عمومی چشمه و مطالعه پارامتری آنها پرداخته شده است. با بررسی‌های به عمل آمده مشخص گردید که با افزایش شیب گسل، دامنه پالس افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، مشاهده شد که مکانیزم گسلش نیز در برآورد جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل مؤثر بوده و در میان حالت‌های مختلف گسلش، گسل‌های امتداد لغز، پالس‌های حوزه نزدیک قوی‌تری در ساختگاه ایجاد می‌نمایند. با افزایش بزرگای زلزله دامنه و پریود پالس افزایش می‌یابد. چنانچه فاصله متناظر با ۵۰٪ مقدار حداکثر سرعت پالس‌های شبیه‌سازی شده به عنوان شاخص تأثیر پالس حوزه

- ground motion. *Seismological Research Letters*, 70, No. 1.
9. Ghayamghamian, M.R. (2005). The effects of variability in near-fault ground motion prediction. *73th Annual Meeting of ICOLD*. Tehran, Iran
10. Aki, K., Richards, P.G. (1980). *Quantitative seismology: Theory and methods*. New York: W.H. Freeman and Co.
11. Wells, D.L., Coppersmith, K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002.
12. Haiyun, W., Xiabin, T., Jie, L. (2004). Global source parameters of finite model for strong ground motion simulations or predictions. *Proc. 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, Canada. ◀