تاریخ دریافت: ۹۶/۰۴/۱۱
تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۵/۲۱

مدل‌سازی گسلش با استفاده از یک مدل موانع ویژه با شیوه جدید چیدمان دایره‌های گسیختگی

محمد هادی رضایی
دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

ناصر خاجی (نویسنده مسئول)
استاد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، *nkhaji@modares.ac.ir*

چکیده

رسیدن به یک تخمین قابل‌اطمینان از حرکات زمین، ناشی از وقوع زلزله در یک ساختگاه مشخص، بدون داشتن شناخت صحیح از مکانیسم تولید امواج لرزه‌ای، عوامل ساختاری اثرگذار بر این امواج در مسیر انتشار، و شناخت شرایط فیزیکی و ویژگی‌های ساختاری محل ساخته‌شدن سازه‌ها میسر نخواهد بود. در این میان، مدل موانع ویژه که از مشهورترین روش‌های سینماتیکی شبیه‌سازی گسل زلزله می‌باشد، گسل را به‌عنوان مجموعه‌ای از ترک‌های دایره‌ای در نظر می‌گیرد. گسیختگی که به‌صورت افت تنش‌های موضعی در این ترک‌ها فرض می‌شود، عامل اصلی تولید امواج فرکانس بالا در این مدل است. یکی از ایرادات وارد بر این مدل، استفاده از دایره‌های یکسان است، که با خاصیت ذاتی زلزله مبنی بر تصادفی بودن این رخداد، فاصله چشمگیری دارد. از این‌رو، در این مطالعه سعی شده با پیشنهاد روش جدید چیدمان دایره‌ها با اندازه‌های متفاوت، که به‌عنوان گسیختگی‌های عامل تولید امواج لرزه‌ای می‌باشند، طیف‌های چشمه تولید شده را هرچه بیشتر به واقعیت نزدیک سازد. در روش پیشنهادی، دایره‌های با اندازه‌های متفاوت به‌صورت کاملاً تصادفی در گسل قرار می‌گیرند، از مجموع طیف‌های تک‌تک دوایر گسیختگی، طیف چشمه لرزه‌زا تولید می‌شود. در انتها، نتایج طیف‌های تولیدشده برای گسل‌های با ابعاد متفاوت با مقادیر مشابه از مدل کلاسیک اولیه مقایسه می‌شوند.

واژگان کلیدی: روش‌های سینماتیکی، مدل‌سازی گسل، مدل موانع ویژه، طیف چشمه زلزله، چیدمان دوایر با اندازه مختلف.

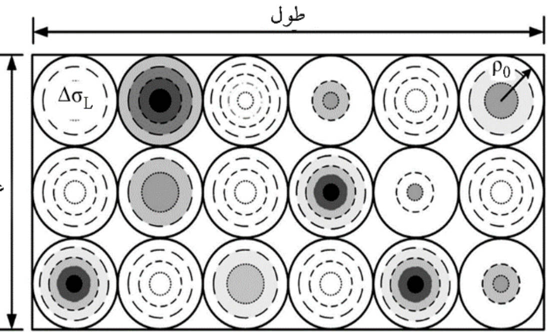
۱- مقدمه

زلزله به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی می‌باشد که در طول تاریخ تلفات بسیار سنگین جانی و مالی را به جوامع بشری تنها در طول چند دقیقه تحمیل نموده است. دانشمندان برای مقابله با این پدیده مخرب، شاخه جدیدی از علم به نام لرزه‌شناسی را به وجود آورده‌اند. به‌طورکلی هسته دانش لرزه‌شناسی زلزله را می‌توان به فهم دقیق اتفاقات رخ داده در طی زلزله و علل ایجاد آن دانست. در صورتی که پدیده زلزله را به یک آزمایش تشبیه نماییم، مؤلفه‌های گوناگون تنظیم اولیه که بر نتیجه این آزمایش تأثیر خواهند داشت، تحت کنترل و اختیار نیست. شناخت و دانش مختصر موجود در مورد لایه‌های زیر سطح زمین از یک‌سو و نداشتن کنترل بر شرایط وقوع زلزله از علل پیچیدگی و سختی مطالعه این آزمایش می‌باشند. ناشناخته بودن سطوح زیرین زمین و همچنین پیچیدگی‌های طبیعی این پدیده نتوانسته انسان‌ها را از مطالعه و بررسی این رخداد باز دارد.

مدل موانع ویژه از روش‌های تصادفی قابل اطمینان جهت مدل‌سازی پدیده زلزله به‌شمار می‌آید که نسبتاً کامل بوده و استفاده از آن مقرون‌به‌صرفه خواهد بود. بخش بنیادی مدل لرزه‌شناسی مورد بحث در این روش، توصیف کمّی طیف میدان دور امواج لرزه‌ای ساطع‌شده از چشمه زلزله است. امواج لرزه‌ای مورد بحث در این بخش امواج برشی می‌باشند که دلیل اصلی تخریب انواع سازه‌ها در زلزله هستند. قبل از آن در روش‌های تصادفی، چشمه زلزله به‌عنوان نقطه در نظر گرفته می‌شده و طیف آن نیز معمولاً به‌وسیله طیف $\omega -$ square که اولین بار توسط اکی [۱] معرفی شده و توسط براون [۲] اصلاح شد،

توصیف می‌شود. این مدل نقطه‌ای با طیف مذکور قادر به نمایش فرکانس‌های گوشه‌ای موجود در طیف چشمه زلزله نمی‌باشد. فرکانس‌های گوشه مورد بحث به نحوی توصیف‌کننده دو خصیصه مهم چشمه‌های لرزه‌ای می‌باشند: فرکانس گوشه اول به ابعاد کلی چشمه، و فرکانس گوشه دوم به اندازه زیررویداد مرتبط می‌باشند [۳]. در صورت تغییر فضای بحث از حوزه فرکانس به حوزه زمان، مقادیر زمانی مرتبط با فرکانس‌های گوشه، زمان کلی گسیختگی و زمان خیزش می‌باشند. مدل موانع ویژه که برای اولین بار توسط پاپاجورجیو و اکی [۴-۵] معرفی شد، برای توصیف کمّی ناهمگونی‌های گسیختگی، فرض می‌کند زلزله به‌صورت چشمه‌ای محدود می‌باشد که توسط گسل لرزه‌ای مستطیلی (به طول L و عرض W)، که شامل تعدادی زیررویداد دایره‌ای به شعاع ρ_0 است، در نظر گرفته می‌شود. با توجه به خصوصیت‌های موجود در مدل موانع ویژه که هردو پارامتر مهم و ضروری برای تولید فرکانس‌های گوشه (ابعاد کلی گسل و همچنین ابعاد زیررویداد) در شبیه‌سازی چشمه گسل را در نظر می‌گیرد، این مدل به‌سرعت به مدلی رایج برای شبیه‌سازی چشمه‌های لرزه‌ای تبدیل‌شده است. همان‌طور که گفته شد، در مدل موانع ویژه، صفحه گسل به‌صورت تعداد زیادی گسیختگی مستقل (به‌صورت دایره‌های یکسان) در نظر گرفته می‌شود که توسط موانع غیر قابل شکست از هم جدا شده‌اند. همان‌طور که گسیختگی پیش می‌رود و سطح گسل را می‌پوشاند، سیگنال‌هایی از گسیختگی‌های محلی ارسال می‌شوند. درنتیجه، به دلیل تصادفی بودن محل گسیختگی و نیز تصادفی بودن زمان گسیختگی، سیگنال‌های دریافتی به ایستگاهی در فاصله‌ای به اندازه کافی دور، به‌صورت ترکیبی خواهند بود. در مدل موانع ویژه، فرایند گسیختگی به‌صورت افت تنش $\Delta\sigma_L$ اعمال می‌شود. جهت شبیه‌سازی گسیختگی دایروی شکل از مدل ساتو و هیراساوا [۶] الگو برداری شده است. مدل ساتو و هیراساوا شامل تمام جنبه‌های مهم فرایند دینامیکی گسترش ترک دایره‌ای که به‌صورت ناگهانی متوقف می‌شود، می‌باشد. رفتار اولیه مدل را با حل دقیق رشد خود متشابه گسیختگی دایره‌ای با افت تنش یکنواخت پس از شروع گسیختگی که توسط کاستروف [۷] ارائه شده، مقایسه و تطبیق داده شده است. محققین دیگری مانند اکی [۸]، هالدرسون و پاپاجورجیو [۹]، و پاپاجورجیو [۱۰]، با انجام مطالعاتی، مدل موانع ویژه را اصلاح نمودند. همچنین هالدرسون و پاپاجورجیو [۱۱-۱۲] طیف‌های چشمه لرزه‌زا را به‌ازای توابع چگالی احتمال متفاوت زمان رسیدن امواج لرزه‌ای و نیز توابع چگالی احتمال اندازه دوایر محاسبه نمودند.

از نقطه‌نظر کاربرد مدل موانع ویژه می‌توان به چند مورد اشاره نمود. سقراط و همکاران [۱۳] به کمک مدل موانع ویژه حرکات قوی زمین در قسمت‌های شمالی ایران را شبیه‌سازی نمودند. در مطالعاتی مشابه، زعفرانی و همکاران [۱۴] به کاربرد مدل موانع ویژه جهت شبیه‌سازی زلزله‌های ایران پرداختند. همچنین موسوی و همکاران [۱۵] نیز به بررسی و تحلیل حرکات قوی زمین رخ داده در ایران به کمک مدل موانع ویژه پرداختند.



شکل (۱): شمای کلی مدل موانع ویژه. مستطیلی با ابعاد مشخص که توسط دایره‌های گسیختگی به شعاع ρ_0 و گسیختگی به‌صورت افت تنش $\Delta\sigma_L$ اعمال می‌شود.

شکل (۱) نمای کلی مدل موانع ویژه را نمایش می‌دهد. پس از اصلاحات انجام‌گرفته بر روی مدل، مقادیر طیف شتاب چشمه زلزله با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد:

$$S(M_0,f,\zeta)=\sqrt{N\zeta+N(N-\zeta)\left(\frac{\sin(\pi f T_0)}{\pi f T_0}\right)^2}\,(2\pi f)^2\dot{M}_{oi}(f) \qquad (۱)$$

که در رابطه اخیر، N تعداد دوایر گسیختگی، T_0 زمان کلی رسیدن امواج لرزه‌ای، $\tilde{M}_{oi}(f)$ طیف جابه‌جایی چشمه برای هر دایره، و ζ پارامتر مقیاس برای بزرگای زلزله می‌باشد. پارامتر مقیاس بزرگای زلزله از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\zeta = 10^{2\eta}\ ,\ \eta = s_m(M_w - M_{cr}) \quad (۲)$$

که $s_m = -0.12$ و $M_{cr} = 6.35$ می‌باشد.

در اولین انواع مدل موانع ویژه، جهت تسهیل محاسبات، دوایر که به‌عنوان گسیختگی در نظر گرفته می‌شوند، به‌صورت یکسان و با ابعاد مشابه در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. در نظر گرفتن چنین فرضی به این معناست که در زلزله، تمام گسیختگی‌های رخ‌داده یکسان می‌باشند، که در یک پدیده کاملاً اتفاقی مانند زلزله، بسیار دور از واقعیت است. در این مطالعه، سعی شده است که با ارائه روشی نوین، گسیختگی‌های دایروی شکلی با ابعاد کاملاً تصادفی در محیط مستطیل شکل گسل قرار گیرند و با در نظر گرفتن محدوده‌ای وسیع از ابعاد گسیختگی، طیف چشمه تولید شده، هر چه بیشتر به طیف‌های زلزله حقیقی نزدیک شود. در این مطالعه، در قسمت «روش پیشنهادی»، به بررسی بیشتر مدل موانع ویژه پرداخته شده است. در قسمت «اندازه‌گیری و محاسبه»، روشی نوین جهت جایگذاری گسیختگی‌های دایروی شکل با ابعادی که به‌صورت کاملاً تصادفی از محدوده مجاز تعریف‌شده انتخاب می‌شوند، در محیط مستطیل شکل گسل، ارائه شده است. همچنین در این بخش تابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه‌ای مورد استفاده (یعنی توزیع یکنواخت) معرفی شده است. در قسمت مربوط به «مشخصات گسل‌های شبیه‌سازی‌شده»، ابعاد گسل‌های استفاده شده جهت محاسبه مقدار طیف چشمه، پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه طیف‌های چشمه، و همچنین پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه مقدار طیف از مدل موانع ویژه کلاسیک، معرفی شده‌اند. در قسمت انتهایی نیز به بحث پیرامون نتایج به‌دست‌آمده از روش حاضر، پرداخته شده است.

۲- روش پیشنهادی

درصورتی که زلزله را مجموعه‌ای از گسیختگی‌های دایره شکل در نظر بگیریم، طیف چشمه از مجموع طیف‌های هر یک از این گسیختگی‌ها به دست خواهد آمد. طیف چشمه را می‌توان به فرم رابطه (۳) نوشت:

$$S(\omega) = \sum_{j=1}^{N} S_j(\omega, R_j) e^{-i\omega T_j} \quad (۳)$$

که در آن T_j زمان رسیدن موج لرزه‌ای برای گسیختگی j می‌باشد ($0 < T_j < T_0$)، و S_j نیز طیف هر یک از زیررویداد می‌باشد و به فرم رابطه (۴) قابل نوشتن می‌باشد.

$$S_j = \frac{M_{oi}}{1+\left(f/f_2\right)^2} \quad (۴)$$

که M_{oi} ممان لرزه‌ای رویداد i می‌باشد و از رابطه (۵) قابل‌محاسبه است. همچنین f_2 نیز فرکانس گوشه می‌باشد که از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$M_{oi} = \frac{16}{7} \Delta\sigma_L R^3 \quad (۵)$$

$$f_2 = \frac{c_s \beta}{2\pi R} \quad (۶)$$

که در رابطه (۵)، $\Delta\sigma_L$ مقدار افت تنش محلی، و R نیز شعاع دوایر به‌عنوان زیررویداد می‌باشد. همچنین در رابطه (۶) مقدار β سرعت انتشار امواج برشی، و c_s نیز تابع وابسته به مقدار نسبت ϑ/β می‌باشد، به‌طوری‌که برای $1.72 \le c_s \le 1.85$ میزان تغییرات این نسبت به‌صورت $0.7 \le \vartheta/\beta \le 0.9$ است. مقدار مورد انتظار (یا میانگین) رابطه (۳) به‌صورت زیر است:

$$E[S(\omega)] = E\left[\sum_{j=1}^{N} S_j(\omega, R_j) e^{-i\omega T_j}\right] \quad (۷)$$

با فرض مستقل بودن وقوع هر یک از زیررویدادها از نظر زمانی و هندسی، می‌توان مقدار طیف را برای تمامی دوایر زیر وقایع محاسبه نمود (با محاسبه شعاع دوایر)، رابطه (۷) به فرم ساده‌تر رابطه (۸) قابل بازنویسی می‌باشد:

$$E[S(\omega)] = \sum_{j=1}^{N} S_j(\omega, R_j)\, E\left[e^{-i\omega T_j}\right] \quad (۸)$$

بر اساس روابط موجود برای محاسبه مقدار مورد انتظار یک تابع، می‌توان نوشت:

$$E\left[e^{-i\omega T_j}\right] = \int_{-\infty}^{\infty} f_{T_i}(t_j) e^{-i\omega t_j}\, dt_j \qquad (۹)$$

که در رابطه (۹)، T_j زمان رسیدن موج لرزه‌ای، و $f_{T_i}(t_j)$ تابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه‌ای می‌باشد. بنابراین رابطه (۸) به فرم رابطه (۱۰) نوشته می‌شود:

$$E[S(\omega)] = \sum_{j=1}^{N} S_j(\omega, R_j) \int_{-\infty}^{\infty} f_{T_i}(t_j) e^{-i\omega t_j}\, dt_j \qquad (۱۰)$$

که در آن، تابع $\left(\left|\int_{-\infty}^{\infty} f_{T_i}(t_j) e^{-i\omega t_j}\, dt_j\right|\right)^2$ تابع زمانی طیف چشمه نامیده می‌شود. در این مطالعه، تابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه‌ای به‌طور یکنواخت فرض شده است (یعنی همان مدل اولیه)، و با توجه به فرض مذکور، محاسبه تابع زمانی مورد نیاز جهت محاسبه طیف چشمه صورت پذیرفته است. همان‌طور که در رابطه (۱۰) مشاهده می‌شود جهت محاسبه مقدار مورد انتظار طیف چشمه، علاوه بر مقادیر تابع طیف زمانی، طیف گسیل شده برای تمامی زیروقایع مورد نیاز می‌باشد. محاسبه مقدار طیف برای تمام زیروقایع، تنها با داشتن اطلاعات هندسی تمام دوایر گسیختگی ممکن است، که در ادامه به چگونگی به دست آوردن پارامترهای نامبرده پرداخته می‌شود.

۳- اندازه‌گیری و محاسبه

۳-۱- چیدمان ترک‌های دایروی در گسل مستطیلی

همان‌گونه که در قسمت‌های قبلی ذکر شده است، مدل چشمه لرزه‌زای موانع ویژه، گسل را به‌طور ساده به‌صورت تعدادی ترک دایروی مدل‌سازی می‌نماید. ترک‌های مذکور به‌طور تصادفی گسیخته می‌شوند و حرکات فرکانس بالای زلزله را شبیه‌سازی می‌نمایند. در مدل ابتدایی موانع ویژه اندازه این ترک‌های دایروی برای سادگی مدل‌سازی، یکسان در نظر گرفته شد، که چنین فرضی با ماهیت تصادفی زلزله همخوانی ندارد. در این بخش، به معرفی روش جدید چیدمان ترک دایروی در سطح مستطیلی گسل پرداخته می‌شود. در این روش، ترک‌های دایروی با شعاع تصادفی تولید می‌شوند و به نحوی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند که اولاً کاملاً به یکدیگر بچسبند و ثانیاً هیچ فرورفتگی بین هیچ‌کدام از آنها وجود نداشته باشد. ازآنجاکه ابعاد گسل از پارامترهای ورودی مسئله می‌باشد، شکل هندسی گسل و پارامترهای مهمی نظیر نسبت طول به عرض نیز خودبه‌خود در این چیدمان لحاظ می‌شوند، و از این لحاظ نسبت به روش‌هایی که تنها با استفاده از مساحت گسل، نسبت به تخمین تعداد ترک‌های دایروی اقدام می‌نمایند، ارجحیت دارد.

در این روش جدید، شعاع‌های دوایر به‌صورت تصادفی بین مقادیر مجاز تعیین شده (یعنی شعاع کمینه R_a و شعاع بیشینه R_b) انتخاب شده و در یک ردیف افقی قرار می‌گیرند. با قرار گرفتن آخرین دایره در ردیف، ردیف جدیدی درست زیر ردیف قبلی تشکیل می‌شود. این روند تا پر شدن کامل مستطیل از دایره‌های با شعاع متنوع ادامه می‌یابد. برای انجام فرایند ذکر شده، اولین گام تعیین محدوده مجاز تغییرات شعاع دوایر می‌باشد. برای این منظور، پارامترهای α_1 و α_2 توسط هالدرسون و پاپاجورجیو [۱۱] معرفی شدند. مقدار کمینه و بیشینه محدوده مجاز تغییرات شعاع ترک‌های دایروی به فرم زیر تعیین می‌شود.

$$R_b = \alpha_1 R_c \quad \text{and} \quad R_a = \alpha_2 R_b = \alpha_1 \alpha_2 R_c \qquad (۱۱)$$

که R_c شعاع گسل معادل می‌باشد. پس از تعیین محدود مجاز تغییرات، شعاع هر یک از دوایر به‌صورت تصادفی تعیین می‌شود. سپس، با استفاده از مختصات مرکز هر دایره، اقدام به چیدن آنها، به‌نحوی‌که در کنار یکدیگر قرار گیرند، درحالی‌که همپوشانی نداشته باشند، می‌شود. لازم به ذکر است که به دلیل اینکه در فرکانس‌های کم، مقدار طیف چشمه برابر مجموع مقدار انرژی تک‌تک گسیختگی‌های دایروی می‌باشد، مقدار آن در فرکانس‌های پایین بایستی برابر ممان کلی گسل باشد (بقای ممان لرزه‌ای). جهت مطالعه بیشتر و تشریح جزئیات، به مقالات دوقسمتی هالدرسون و پاپاجورجیو [۱۱-۱۲] مراجعه شود. رابطه (۱۲)، بقای ممان لرزه‌ای در مدل را نمایش می‌دهد:

$$M_o^c = \sum_{i=1}^{N} M_{oi} \quad (۱۲)$$

که در آن، M_o^c ممان لرزه‌ای کل گسل می‌باشد. جهت نیل به اهداف ذکر شده، اولین دایره پس از تعیین مقدار شعاع، در یکی از گوشه‌های بالای مستطیل قرار می‌گیرد. سایر دایره‌ها بعد از تعیین شعاع آنها در کنار دایره اول در یک ردیف قرار می‌گیرند، پس از پر شدن ردیف‌ها، آنها به فرم ستونی زیر یکدیگر قرار خواهند گرفت به‌نحوی‌که مستطیل کاملاً پر شود. در ادامه، به جزئیات روش نوین چیدمان ترک‌های دایروی در سطح گسل می‌پردازیم.

نخستین دایره را پس از تعیین مقدار شعاع، در گوشه بالا و سمت چپ مستطیل قرار می‌دهیم. در صورتی که گوشه پایین سمت چپ مستطیل را به‌عنوان مرکز مختصات (۰،۰) در نظر بگیریم، و R_1 شعاع اولین دایره باشد، مختصات مرکز اولین دایره به فرم زیر است.

$$x_1 = R_1\,,\ y_1 = W - R_1 \quad (۱۳)$$

که W عرض مستطیل می‌باشد. سایر دایره‌ها در ردیف اول باید درست زیر لبه بالای مستطیل و چسبیده به دایره قبل از خود قرار گیرند. بنابراین در صورتی که R_i را به‌عنوان شعاع دایره iام که به فرم تصادفی انتخاب شده در نظر بگیریم، مختصات مرکز آنها به فرم رابطه (۱۴) تعریف می‌شوند.

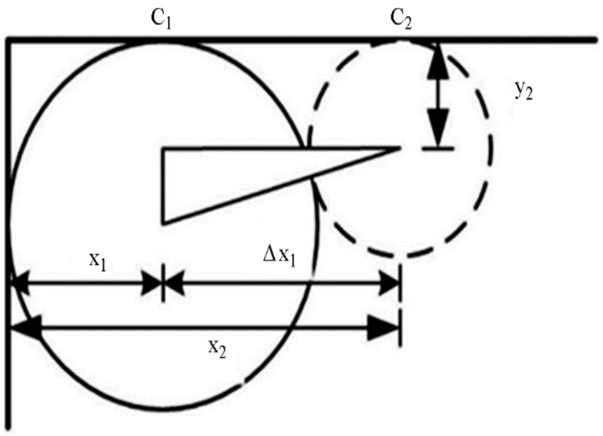
$$y_i = W - R_i\ ,\ x_i = x_{i-1} + \Delta x_i \quad (۱۴)$$

که در آن

$$\Delta x_i = \sqrt{(R_i + R_{i-1})^2 + (R_i - R_{i-1})^2} \quad (۱۵)$$

قرار گرفتن دایره‌ها درست زیر لبه بالایی مستطیل در شکل (۲) نمایش داده شده است. در این شکل، $\mathbf{\Delta x_1} = \sqrt{(\mathbf{R_2} + \mathbf{R_1})^2 + (\mathbf{R_2} - \mathbf{R_1})^2}$ است.

این فرایند تا آنجایی که قسمتی از یک دایره خارج از مستطیل بیفتد، ادامه خواهد داشت. در این صورت آخرین دایره حذف و با توجه به مقدار فاصله Gap بین لبه سمت راست



شکل (۲): محل و نحوه جایگذاری دومین دایره در سطر اول.

و دایره آخر موجود، نسبت به قرار دادن آخرین دایره در این ردیف تصمیم‌گیری می‌شود. در صورتی که این فاصله از قطر کمینه مجاز بیشتر باشد ($Gap \geq 2R_{min}$)، شعاع دایره آخر به اندازه نصف فاصله مذکور ($R_{i+1} = Gap/2$) انتخاب می‌شود و مختصات مرکز آن از رابطه (۱۶) قابل محاسبه است.

$$y_{i+1} = W - R_{i+1}\ \ ,\ x_{i+1} = x_i + R_i + \ Gap/2 \quad (۱۶)$$

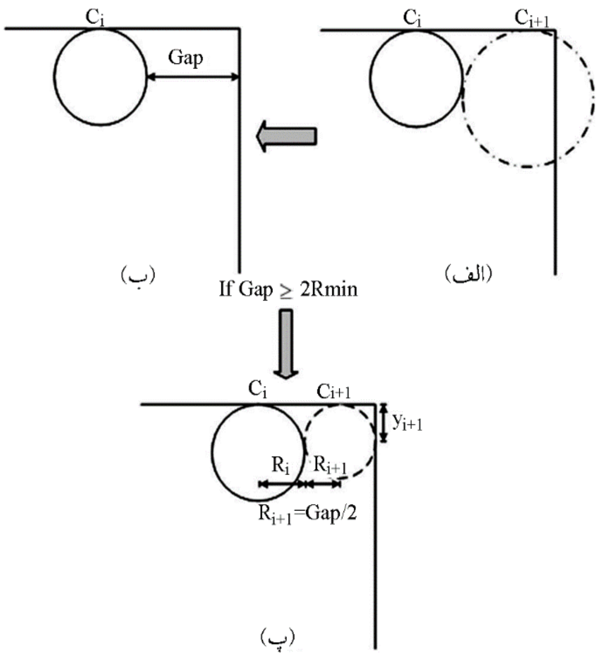
اما کمتر بودن مقدار فاصله از قطر دایره کمینه ($Gap \leq 2R_{min}$) به این معنی می‌باشد که حتی کوچک‌ترین دایره مجاز نیز در این فاصله نمی‌گنجد. بنابراین در این حالت دایره با شعاع کمینه انتخاب شده ($R_{i+1} = R_{min}$) و تا آنجا که با دوایر قبلی همپوشانی نداشته باشد، به پایین منتقل می‌شود. مختصات چنین دایره‌ای از رابطه (۱۷) تعیین می‌شود.

$$y_{i+1} = W - (R_i + \Delta y_i\ ),\ x_{i+1} = L - R_{i+1} \quad (۱۷)$$

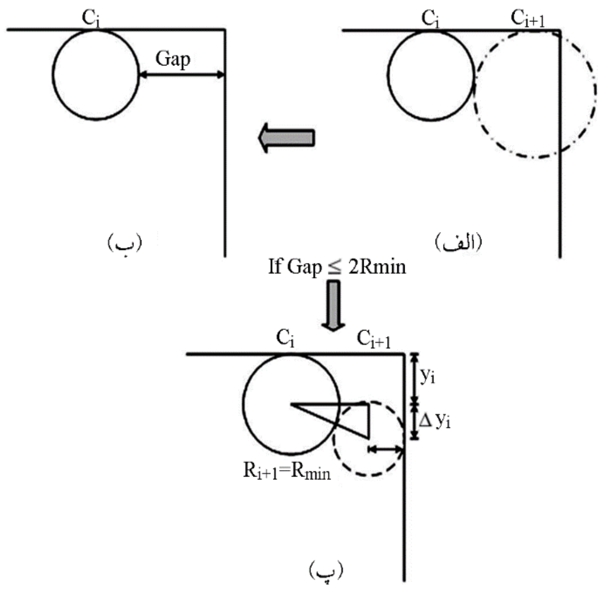
که L طول مستطیل است. شکل (۳) نحوه قرار گرفتن آخرین دایره در ردیف را در حالت اول، و شکل (۴) نحوه قرار گرفتن آخرین دایره در ردیف را در حالت دوم نمایش می‌دهند.

پس از تکمیل ردیف اول، اولین دایره از ردیف دوم درست زیر دوایر ردیف نخست قرار خواهد گرفت. مختصات دایره مذکور به فرم رابطه (۱۸) قابل تعیین می‌باشد.

$$\begin{aligned} x_i &= L - R_i, \\ y_i &= y_{i-1} - \sqrt{(R_i + R_{i-1})^2 + (R_i - R_{i-1})^2} \end{aligned} \quad (۱۸)$$



شکل (۳): نحوه جایگذاری آخرین دایره در سطر اول. در صورتی که فاصله باقیمانده بیش از قطر کوچک‌ترین دایره باشد.



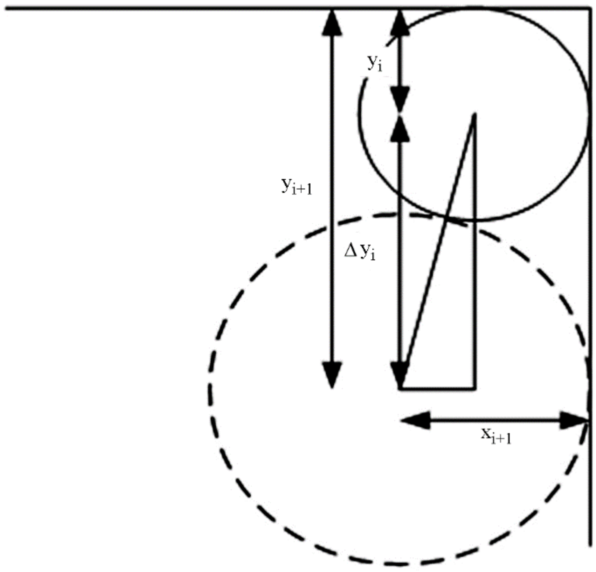
شکل (۴): نحوه جایگذاری آخرین دایره در سطر اول. در صورتی که فاصله باقیمانده کمتر از قطر کوچک‌ترین دایره باشد، آخرین دایره مقداری پایین کشیده می‌شود.

در ساده‌ترین حالت، نخستین دایره ردیف دوم با دوایر پیشین همپوشانی نخواهد داشت، که در این صورت نیازی به جابه‌جایی دایره مذکور نیست. در غیر این صورت، دایره بایستی جابه‌جا شود. شرط نداشتن همپوشانی با سایر دایره‌ها توسط رابطه (۱۹) چک می‌شود.

$$\left(R_i + R_j\right) > \sqrt{\left(\left|x_i - x_j\right|\right)^2 + \left(\left|y_i - y_j\right|\right)^2}, \quad j \le i-2 \qquad (۱۹)$$

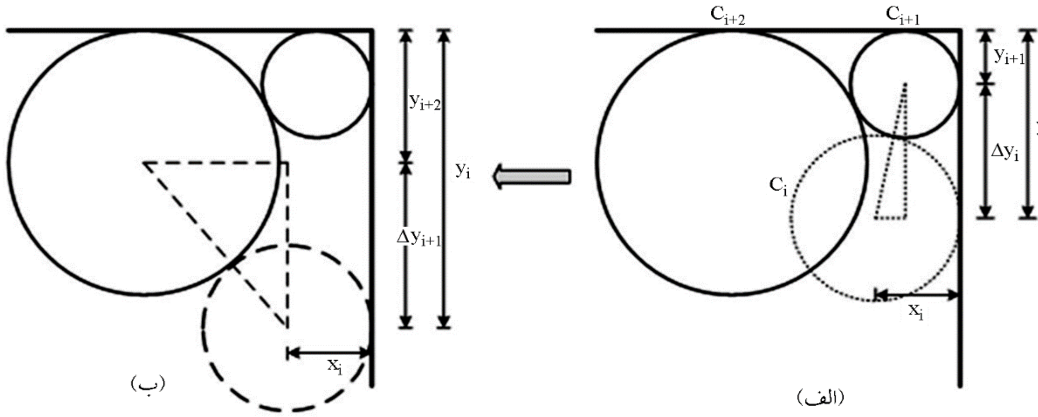
شکل (۵) قرارگیری نخستین دایره ردیف دوم در حالت بدون نیاز به جابه‌جایی را نمایش می‌دهد. در صورت وجود همپوشانی با دوایر قبلی، یعنی ارضا نشدن رابطه (۱۹)، دایره آخر باید به سمت پایین کشیده شود تا همپوشانی رفع گردد و رابطه (۱۹) ارضا شود. مختصات مرکز دایره جابه‌جا شده از رابطه (۲۰) قابل دست‌یابی می‌باشد.

$$x_i = L - R_I, \quad y_i = y_j - \sqrt{\left(R_i + R_j\right)^2 + \left(x_i - x_j\right)^2} \qquad (۲۰)$$



شکل (۵): نحوه قرارگیری اولین دایره از سطر دوم در حالتی که همپوشانی وجود ندارد. در این شکل، $\Delta y_i = \sqrt{(R_i + R_{i-1})^2 + (R_i - R_{i-1})^2}$ است.

همچنین شکل(۶) نحوه انتقال نخستین دایره سطر دوم، در صورت وجود همپوشانی با سایر دوایر را نشان می‌دهد. برای قرار دادن مناسب سایر دوایر در ردیف‌های دوم و همین‌طور ردیف‌های بعد از آن، نیاز به معرفی پارامتر جدید زاویه چرخش (φ) می‌باشد. به کمک این پارامتر جدید، پس از تعیین شعاع دایره‌ها به‌صورت تصادفی، آنها در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند.



شکل (۶): قرارگیری اولین دایره از سطر دوم درست زیر آخرین دایره سطر اول، در صورت وجود فضای همپوشانی با سایر دایره‌های سطر اول. در این شکل، $\Delta y_j = \sqrt{\left(R_i + R_j\right)^2 + \left(x_i - x_j\right)^2}$ است.

در صورت وجود همپوشانی بین دایره جدید با دوایر قبلی، افزایش مقدار زاویه چرخش (چرخاندن دایره نسبت به مرکز چرخش موجود روی مرکز دایره ماقبل آخر) باعث جداسازی دوایر و از بین رفتن فضای همپوشانی می‌شود. در گام نخست مقدار زاویه چرخش برابر صفر می‌باشد ($\varphi = 0$)، که در صورت وجود همپوشانی با دوایر قبلی، مقدار آن افزایش می‌یابد تا جایی که شرط موجود در رابطه (۱۹) ارضا شود و فضای همپوشانی از بین برود. به‌عبارت‌دیگر، با افزایش مقدار زاویه چرخش همپوشانی بین دوایر از بین خواهد رفت. مختصات مرکز دوایر موجود در ردیف دوم که با استفاده از چرخش جایگذاری می‌شوند از رابطه (۲۱) قابل تعیین می‌باشد.

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + \left(R_i + R_{i-1}\right)\cos\varphi, \\ y_i &= y_{i-1} + \left(R_i + R_{i-1}\right)\sin\varphi \end{aligned} \qquad (۲۱)$$

شکل(۷)، نحوه جایگذاری دوایر با استفاده از زاویه چرخش را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که در ردیف‌های فرد مقدار زاویه چرخش در صورت وجود همپوشانی، کاهش می‌یابد. فرایند ذکر شده تا ردیف آخر ادامه می‌یابد. اصطلاح ردیف آخر به ردیفی اطلاق می‌شود که تعدادی از دوایر موجود در آن در خارج از مستطیل قرار گیرند. در این حالت، برای قرار دادن دوایر مذکور در داخل مستطیل، مقدار شعاع آنها کاهش می‌یابد. این کاهش تا جایی ادامه می‌یابد که شعاع دایره مذکور از حد پایینی مجاز کمتر نشود. مختصات مرکز این دوایر نیز برای جایگذاری مناسب‌تر تغییر می‌یابد.

شکل (۸) تغییر اندازه و تغییر مکان دایره‌هایی که قسمتی از آنها خارج از مستطیل قرار گرفته‌اند را نمایش می‌دهد. مختصات مرکز دایره تغییر یافته که در شکل (۸) نمایش داده شده است، را می‌توان با استفاده از رابطه (۲۲) به دست آورد.

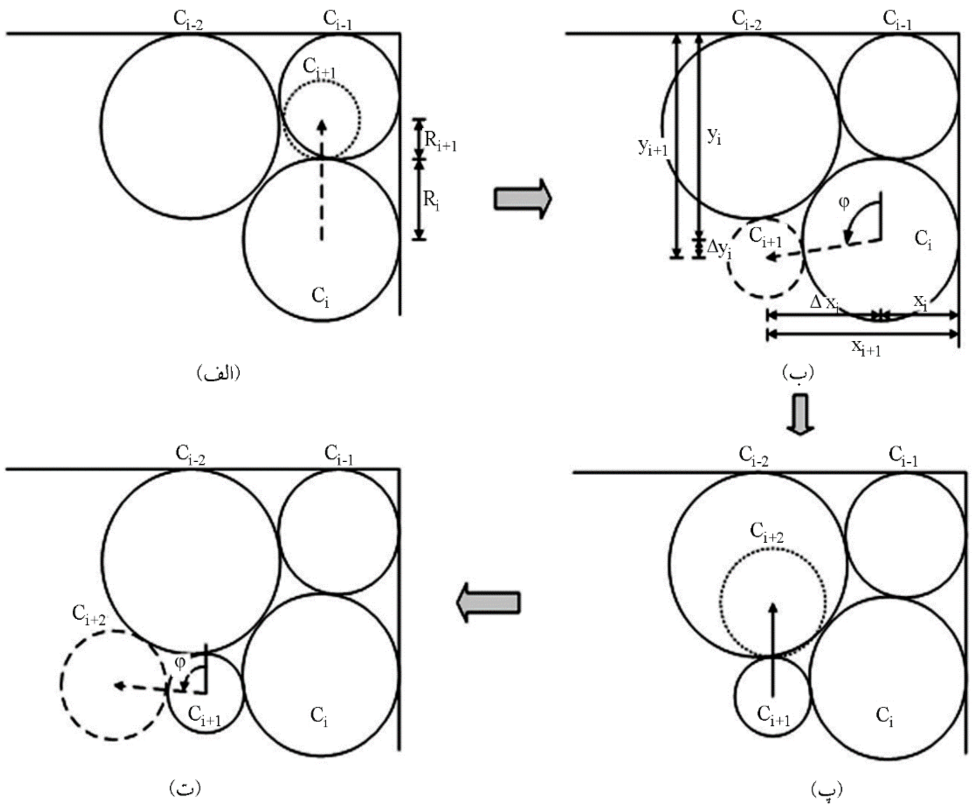
$$x_{ni} = x_i \pm \left(\Delta R / 2\right), \quad y_{ni} = y_i + \left(\Delta R / 2\right) \qquad (۲۲)$$

که x_{ni} و y_i مختصات دایره جدید می‌باشند. همچنین

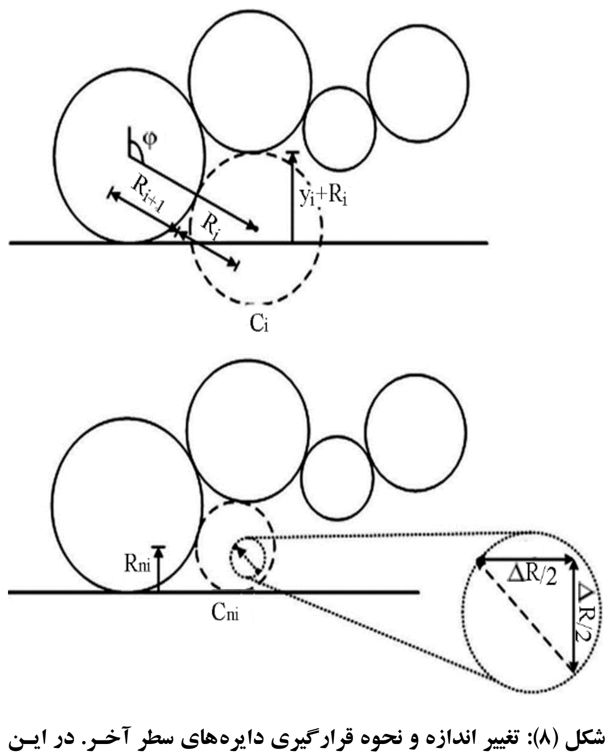
$$R_{ni} = \left(y_i + R_i\right) / 2 \;, \quad \Delta R = R_i - R_{ni} \qquad (۲۳)$$

این روند تا زمانی که دوایر موجود در یک ردیف کاملاً داخل مستطیل قرار گیرند، ادامه می‌یابد.

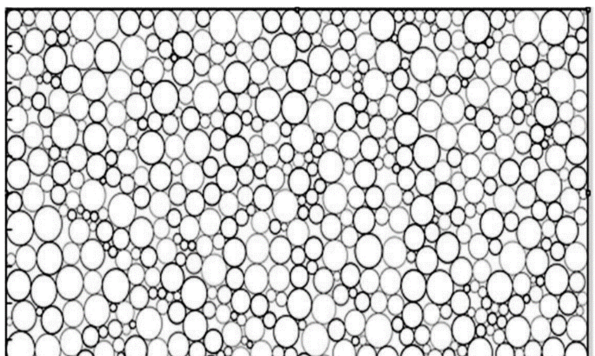
برای بررسی عملکرد این روش، سه گسل مستطیلی به‌ترتیب به ابعاد $20 \times 10km^2$، $70 \times 20km^2$ و $30 \times 30km^2$ در نظر گرفته شده است. گسل‌های مفروض، با استفاده از این روش و با در نظر گرفتن محدوده مجاز تغییرات شعاع‌های متفاوت، از دایره با شعاع متغیر پر شده است. شکل (۹) جایگذاری ۵۶۶ دایره با شعاعی متغیر بین ۰/۱ تا ۰/۵ کیلومتر را در گسل اول نشان می‌دهد. در ادامه، شکل (۱۰) قرارگیری ۲۰۶۴ دایره که شعاع آنها در بازه بین ۰/۱ تا ۰/۵ کیلومتر قرار دارد، را در گسل دوم، و شکل (۱۱) قرارگیری ۱۷۶۰ دایره با شعاعی بین ۰/۱ تا ۰/۵ کیلومتر را در گسل سوم نمایش می‌دهند.



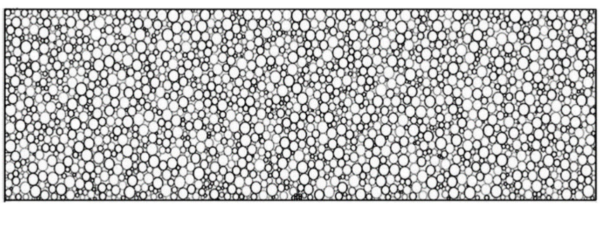
شکل(۷): نحوه جایگذاری سایر دایره‌ها در سطرهای دوم به بعد به کمک زاویه چرخش. با افزایش مقدار این زاویه که نسبت به مرکز دایره ماقبل آخر تغییر می‌نماید، دایره‌ها در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. در این شکل، $\Delta x_i = (R_i + R_{i-1})\cos\varphi$ و $\Delta y_i = (R_i + R_{i-1})\sin\varphi$ است.



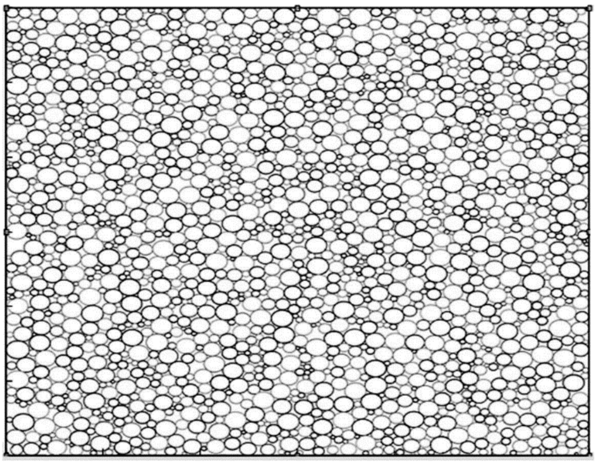
شکل (۸): تغییر اندازه و نحوه قرارگیری دایره‌های سطر آخـر. در ایـن شکل، R_{ni} شعاع دایره تغییر فرم یافتـه، $R_{ni} = (y_i + R_i)/2$ و $\Delta R = R_i - R_{ni}$ است.



شکل (۹): قرارگیری تعداد ۵۶۶ دایره کـه شـعاع آنهـا بـین ۰/۱ تـا ۰/۵ کیلومتر تغییر می‌نماید، در گسل اول.



شکل (۱۰): قرارگیری تعداد ۲۰۶۴ دایره که شعاع آنهـا بـین ۰/۱ تـا ۰/۵ کیلومتر تغییر می‌نماید، در گسل دوم.



شکل (۱۱): قرارگیری تعداد ۱۷۶۰ دایره که شعاع آنها بین ۰/۱ تا ۰/۶ کیلومتر تغییر می‌نماید، در گسل سوم.

در انتها، با داشتن توابع زمانی، همچنین تعداد و شعاع دایره‌های گسیختگی، می‌توان به محاسبه طیف چشمه در این مدل پرداخت. جهت مقایسه بهتر نتایج به‌دست‌آمده از روش جدید جایگذاری ترک‌های گسیختگی، طیف به‌دست‌آمده با استفاده از این روش با روش‌های قبلی مقایسه می‌شوند که ادامه به شرح آن پرداخته خواهد شد.

۳-۲- تابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج

تا قبل از مطالعات هالدرسون و پاپاجورجیو [۱۱]، توابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه‌ای به‌صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شد. به‌عبارت‌دیگر امواج لرزه‌ای گسیل شده از تمامی نقاط گسل شانس برابری برای رسیدن هم‌زمان به محل ایستگاه دریافت کننده امواج را داشته‌اند. با این فرض تابع چگالی احتمال به فرم زیر خواهد بود:

$$f_T(t) = \frac{1}{T_0} \quad , t \in [0, T_0] \tag{۲۴}$$

در این صورت، تابع زمان طیف چشمه به فرم رابطه (۲۶) به دست می‌آید:

$$\left(\left|\int_{-\infty}^{\infty} f_{T_i}\left(t_j\right) e^{-i\omega t_j} dt_j\right|\right)^2 = \left(\sin\frac{\omega T_0}{2}\right)^2 \Big/ \left(\frac{\omega T_0}{2}^2\right) \tag{۲۵}$$

که از تابع زمانی رابطه (۲۶) برای به دست آوردن طیف‌های چشمه استفاده خواهد شد.

۴- مشخصات گسل‌های شبیه‌سازی‌شده

در این مطالعه، گسل‌های اول، دوم، و سوم بخش ۳ مقاله که در عمق ۱۵ کیلومتری سطح مدفون شده‌اند، مورد مطالعه قرار می‌گیرند. همچنین بزرگای زلزله تولیدشده $M_W = 6.4$ در نظر گرفته شده، که بر اساس مطالعه هالدرسن و پاپاجورجیو [۱۱]، مقادیر افت تنش محلی و کلی به‌ترتیب $\Delta\sigma_L = 161$ bar و $\Delta\sigma_G = 30$ bar در نظر گرفته شده است. سرعت انتشار امواج برشی نیز $\beta = 3.5$ km/s فرض شده است. برای مقایسه و اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش یاد شده، نتایج آن با نتایج حاصل از روش احتمالاتی به کمک تابع چگالی احتمال یکنواخت برای اندازه زیروقایع (هالدرسون و پاپاجورجیو [۱۱])، مقایسه شده‌اند (شکل‌های ۱۲ تا ۱۴). پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه طیف از روش احتمالاتی مذکور، در روابط (۲۶) تا (۲۹) آمده است، و برای هر دو روش در جدول (۱) مقایسه شده‌اند. به غیر از روش به دست آوردن تعداد و شعاع دایره‌ها، سایر پارامترهای تأثیرگذار بر نتیجه یکسان می‌باشد. قابل ذکر است که پارامترهای α_1 و α_2 به‌ترتیب مقادیر ۰/۳ و ۰/۲، همچنین مقادیر افت تنش محلی $\Delta\sigma_L$ و کلی $\Delta\sigma_G$ نیز مقادیری برابر ۱۶۱ و ۳۰ بار خواهند داشت.

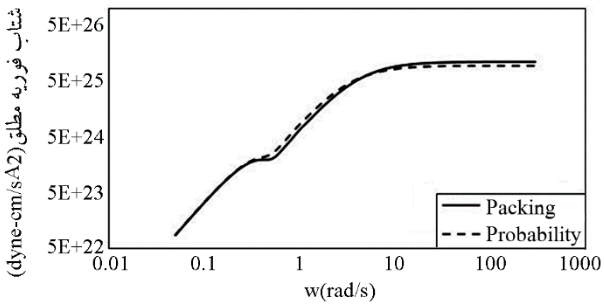
$$f_R(r) = \frac{1}{R_b - R_a} \tag{۲۶}$$

$$\{E[S_R(\omega, R)]\}^2 = \left(\frac{16\Delta\sigma_L}{7}\frac{\beta^2 c_s^2}{2\omega^2}\right)^2 \left[R_b + R_a - \frac{\beta^2 c_s^2}{\omega^2(R_b - R_a)} \ln\frac{1+\frac{\omega^2}{\beta^2 c_s^2}R_b^2}{1+\frac{\omega^2}{\beta^2 c_s^2}R_a^2}\right]^2 \tag{۲۷}$$

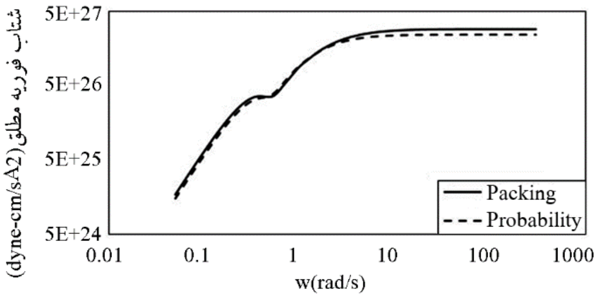
$$E[|S_R(\omega, R)|^2] = \left(\frac{16\Delta\sigma_L}{7}\right)^2 \frac{\beta^4 c_s^4}{\omega^4}\frac{1}{(R_b - R_a)}\left[\frac{R_b^3 - R_a^3}{3} - \frac{2\beta^2 c_s^2}{\omega^2}(R_b - R_a) - \frac{\beta^2 c_s^2}{2\omega^2}\left\{\frac{R_b}{1+\frac{\omega^2}{\beta^2 c_s^2}R_b^2} - \frac{R_a}{1+\frac{\omega^2}{\beta^2 c_s^2}R_a^2}\right\} + 2.5 * \frac{\beta^3 c_s^3}{\omega^3}\left\{\tan^{-1}\left(\frac{\omega R_b}{c_s\beta}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega R_a}{c_s\beta}\right)\right\}\right] \tag{۲۸}$$

جدول (۱): پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی.

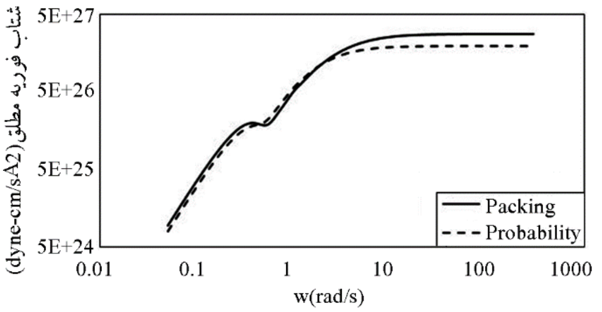
	$R_c = 7.98km$			$R_c = 21.11km$			$R_c = 16.92km$		
	N	R_a	R_b	N	R_a	R_b	N	R_a	R_b
Probabilistic Method	26.77	0.48	2.39	26.77	1.266	6.33	26.77	1.01	5.07
Packing Method	29	0.5	2.4	30	1.26	6.3	29	1	5.1



شکل (۱۲): طیف چشمه لرزه‌زای مدل موانع ویژه به‌دست‌آمده از روش جدید جایگذاری دایره‌ها (منحنی مشکی) و طیف مزبور به‌دست‌آمده از با استفاده از مدل موانع ویژه کلاسیک (منحنی خط‌چین)، در گسل مستطیلی اول.



شکل (۱۳): طیف چشمه لرزه‌زای مدل موانع ویژه به‌دست‌آمده از روش جدید جایگذاری دایره‌ها (منحنی مشکی) و طیف مزبور به‌دست‌آمده از با استفاده از مدل موانع ویژه کلاسیک (منحنی خط‌چین)، در گسل مستطیلی دوم.



شکل (۱۴): طیف چشمه لرزه‌زای مدل موانع ویژه به‌دست‌آمده از روش جدید جایگذاری دایره‌ها (منحنی مشکی) و طیف مزبور به‌دست‌آمده از با استفاده از مدل موانع ویژه کلاسیک (منحنی خط‌چین)، در گسل مستطیلی سوم.

$$N = \frac{1}{2} - \frac{8}{7}\frac{\sum_{n=0}^{6}\alpha_2^n}{(1+\alpha_2)^2\left(1+\alpha_2^2\right)^2} + \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{7}\sum_{n=0}^{6}\alpha_2^n - \frac{1}{16}(1+\alpha_2)^2\left(1+\alpha_2^2\right)^2\right)^2 + \frac{1}{4}(1+\alpha_2)^2\left(1+\alpha_2^2\right)^2\left(\frac{\Delta\sigma_L}{\Delta\sigma_G}\right)^2}}{\frac{1}{8}(1+\alpha_2)^2\left(1+\alpha_2^2\right)^2} \tag{۲۹}$$

کـه $f_R(r)$ تـابع چگـالی احتمـال انـدازه زیررویـداد و N تعـداد زیررویداد می‌باشد.

برای به دست آوردن طیف‌های چشمه بـا اسـتفاده از رابطـه (۸)، پس از محاسبه تعداد دوایر گسیختگی با استفاده از روش جدید، و داشتن شعاع آنها، نتایج با توابع زمانی مذکور ادغام می‌شوند.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

همـان‌گونـه کـه بحـث شـد، در مـدل موانـع ویـژه، گسـلش به‌صورت تعداد زیادی گسیختگی مستقل در نظر گرفته می‌شـود که توسط موانع غیرقابل‌شکست از هم جدا شـده‌انـد. همـان‌طـور کـه گسـیختگی پـیش مـی‌رود و سـطح گسـل را مـی‌پوشـاند، سیگنال‌هایی از گسیختگی‌های محلی ارسال می‌شـوند. درنتیجـه، به دلیل تصادفی بودن محل گسیختگی و نیز تصادفی بودن زمـان گسـیختگی، سـیگنال‌هـای دریـافتی بـه ایسـتگاهی در فاصـله‌ای به‌اندازه کافی دور، به‌صورت ترکیبی خواهند بود. بـه‌بیـان‌دیگـر، تصـادفی بـودن محـل گسـیختگی و نیـز تصـادفی بـودن زمـان گسیختگی، به‌صورت ضمنی بیانگر عدم یکسانی تمرکز تنش‌هـا در گسل، و توزیع ناهمگن تنش‌هاست. همچنین ذکر شد کـه در مدل اولیه موانع ویژه علاوه بر اینکه از تابع چگالی احتمال زمـان رسیدن امواج با توزیع یکنواخت اسـتفاده مـی‌شـود، انـدازه تمـام ترک‌های دایروی نیز برابر بوده است که با ماهیت اتفـاقی زلزلـه همخوانی ندارد. در این مطالعـه، بـه ارائـه روش جدیـد چیـدمان

ترک‌های دایروی در گسل مستطیلی پرداخته می‌شود. در این روش ترک‌های دایروی با اندازه‌های متفاوت به‌گونه‌ای در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند که اولاً فضای گسل از آنها پر شود، و ثانیاً هیچ‌گونه فضای همپوشانی بین آنها وجود نداشته باشد. شکل‌های (۲) تا (۸) نحوه عملکرد این روش در قراردهی دایره‌های نشان‌دهنده‌ی ترک روی سطح گسل مستطیلی را نمایش می‌دهند. در این مطالعه، سه گسل به‌عنوان نمونه انتخاب شدند تا مقادیر طیف چشمه آنها به کمک روش معرفی شده مورد محاسبه و با مدل موانع ویژه کلاسیک مقایسه گردند. جهت بررسی اولیه عملکرد روش پیشنهادی در پوشاندن سطح گل با دوایر گسیختگی، شکل‌های (۹) تا (۱۱)، قرارگیری دایره‌های با ابعاد متغیر در سه گسل به ابعاد هندسی مختلف را نمایش می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌های مذکور قابل‌مشاهده است، سطح گسل‌ها کاملاً با دوایری با شعاع متنوع پوشانده شده است، به‌طوری‌که هم‌پوشانی در هیچ‌یک دیده نمی‌شود. همچنین جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، طیف چشمه به‌دست‌آمده از روش ارائه‌شده در این مطالعه، با مقدار طیف چشمه حاصل از روش مدل موانع ویژه کلاسیک مقایسه شده که شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) مقایسه انجام شده را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که طیف چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه‌ای برای هر دو روش، یکنواخت در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای موردنیاز جهت به دست آوردن مقادیر طیف چشمه لرزه‌ای در جدول (۱) آمده است. همان‌طور که در جدول مذکور مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از نسبت شعاع ماکزیمم به مینیمم یکسان، تعداد دوایر حاصل از روش احتمالاتی بدون در نظر گرفتن نسبت ابعادی گسل همواره برابر خواهد بود که این موضوع دور از واقعیت می‌باشد. در روش پیشنهادی، هم محدوده مجاز تغییرات و هم ابعاد گسل، در تعداد دوایر به وجود آمده مؤثرند که به فیزیک واقعی مسئله نزدیک‌تر می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) نمایش داده شده است، به دلیل بیشتر بودن تعداد دوایر در مدل ارائه شده در این مطالعه، فرکانس‌های بالا مقداری بیش از مدل موانع ویژه کلاسیک دارند. همچنین به دلیل استفاده از ابعاد واقعی گسل در مدل‌سازی، پارامتر نسبت طول به عرض در تعداد و جایگذاری دوایر مؤثر می‌باشد، و این در حالی است که این نسبت مهم در مدل موانع ویژه کلاسیک نادیده گرفته می‌شود. در مدل موانع ویژه کلاسیک، تنها با برابر قرار دادن مساحت گسل با یک گسل معادل دایره‌ای، تعداد و شعاع دوایر گسیختگی را به دست می‌آورند. همچنین می‌توان گفت که در مواردی که نسبت ابعادی (نسبت طول به عرض) گسل عدد بالایی باشد، نتایج به‌دست‌آمده از روش چیدمان دوایر گسیختگی، بیشتر از روش آماری به واقعیت زلزله نزدیک است. همچنین لازم به ذکر است که در صورت لزوم استفاده از توابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه‌ای غیریکنواخت در محاسبه طیف چشمه لرزه‌زا، داشتن اطلاعاتی نظیر تعداد و شعاع دوایر در قسمت‌های مختلف گسل ضروری می‌باشد. بنابراین، مزیت دیگر استفاده از روش چیدمان ارائه‌شده نسبت به روش کلاسیک موجود، قابلیت استفاده از آن، در صورت استفاده از توابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج، به‌صورت غیریکنواخت است.

مراجع

1. Aki, K. (1967) Scaling law of seismic spectrum. *J. Geophys. Res.*, **72**(4), 1217-1231.
2. Brune, J.N. (1970) Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.*, **75**(26), 4997-5009.
3. Papageorgiou, A.S. (1988) On two characteristic frequencies of acceleration spectra: patch corner frequency and fmax. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **78**(2), 509-529.
4. Papageorgiou, A.S. and Aki, K. (1983) A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. I. Description of the model. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **73**(3), 693-722.
5. Papageorgiou, A.S. and Aki, K. (1983) A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. Part II. Applications of the

model. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **73**(4), 953-978.

6. Sato, T. and Hirasawa, T. (1973) Body wave spectra from propagating shear cracks. *Journal of Physics of the Earth,* **21**(4), 415-431.
7. Kostrov, B.V. (1964) Self-similar problems of propagation of shear cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*و **28**(5), 1077-1087.
8. Aki, K. (2003) A perspective on the history of strong motion seismology. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **137**(1-4), 5-11.
9. Halldorsson, B. and Papageorgiou, A.S. (2005) Calibration of the specific barrier model to earthquakes of different tectonic regions. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **95**(4), 1276-1300.
10. Papageorgiou, A.S. (2003) The barrier model and strong ground motion. *Pure Appl. Geophys.*, **160**(3-4), 603-634.
11. Halldorsson, B. and Papageorgiou, A.S. (2012) Variations of the specific barrier model—part I: effect of subevent size distributions. *Bull. Earthquake Eng*., **10**(4), 1299-1319.
12. Halldorsson, B. and Papageorgiou, A.S. (2012) Variations of the specific barrier model—part II: effect of isochron distributions. *Bull Earthquake Eng.*, **10**(4), 1321-1337.
13. Soghrat, M.R., Khaji, N., and Zafarani, H. (2012) Simulation of strong ground motion in northern Iran using the specific barrier model. *Geophys J. Int.*, **188**(2), 645-679.
14. Zafarani, H., Mousavi, M., Noorzad, A., and Ansari, A. (2008) Calibration of the specific barrier model to Iranian plateau earthquakes and development of physically based attenuation relationships for Iran. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **28**(7), 550-576.
15. Mousavi, M., Zafarani, H., Noorzad, A., Ansari, A., and Bargi, K. (2007) Analysis of Iranian strong-motion data using the specific barrier model. *J. Geophys. Eng.*, **4**(4), 415-428.

فهرست توابع و متغیرها

مربع فرکانس دورانی	$\omega - \mathrm{square}$
حوزه فرکانس	Frequency Domain
موانع غیرقابل‌شکست	Barrier
افت تنش محلی	$\Delta\sigma_L$
افت تنش جامع	$\Delta\sigma_G$
طیف جابه‌جایی چشمه برای هر دایره	$\widetilde{M}_{oi}(f)$
پارامتر مقیاس طیف	ζ
زمان رسیدن موج لرزه‌ای	T_j
سرعت انتشار موج برشی	β
تابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه‌ای	$f_{T_j}(t_j)$
تابع زمانی طیف چشمه	$(\lvert \int_{-\infty}^{\infty} f_{T_j}(t_j) e^{-i\omega t_j} dt_j \rvert)^2$
شعاع کمینه	R_a
شعاع بیشینه	R_b
فاصله	Gap
زاویه چرخش	ϕ
بزرگای زلزله	M_w
تابع چگالی احتمال اندازه زیررویداد ها	$f_R(r)$
مقدار مورد انتظار طیف چشمه	$E[S_R(\omega, R)]$

Fault Modeling by a Specific Barrier Model Using a New Approach for Circular Cracks' Arrangement

Mohammad Hadi Rezaei[1] and Naser Khaji[2*]

1. Ph.D. Candidate of Earthquake Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Professor of Earthquake Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: nkhaji@modares.ac.ir

In order to develop a reliable fault simulation process, there are three crucial parameters which needs to be accurately introduced. The mentioned parameters are seismic source specifications, wave propagation path, and seismic site effects. Relationships of strong ground motion attenuation are important for seismic hazard analysis at a specific site. Attenuation relationships may be obtained using two different approaches depending upon the region under study. In the first approach which is appropriate for regions with abundant records of strong ground motion, the statistical model can be used for developing the attenuation relationships employing regression techniques. The common required data for developing attenuation relationships consist of magnitudes, source-to-site distances, and peak ground characteristics. For regions such as California, Japan, and Taiwan, with sufficient data, these methods are suitable and have been successfully developed. Obviously, the validity and accuracy of these methods strongly depend on data sufficiency, the type of regression technique, and the classification of data. On the other hand, for the regions of limited records of strong ground motion, the first approach may not be appropriate and the application of physical models, as the second approach, will be necessary for successful predicting. In this approach, limited records are basically employed for the physical model calibration. These models usually have been developed in the context of the random vibration theory and the stochastic modeling approach. Among various seismic source specifications, a more physically realistic source model is the specific barrier model (SBM). The SBM is known as one of the most complete, simple, and self-consistent statement of the faulting process which is applicable in both "near-fault" and "far-field" regions. Consequently, the SBM may provide consistent ground motion simulations over the entire necessary frequency range and for all distances of engineering interests. The SBM is specifically more suitable for regions with poor seismological data-base and/or ground motions from large earthquakes with large recurrence intervals. An essential part of the seismological model used in this method is the quantitative description of the far-field spectrum of seismic waves emitted from the seismic source. Since shear (S) wave is primarily the main factor of earthquake damages, the application of stochastic approach of the SBM has almost been focused on the far-field S wave spectrum, in which two corner frequencies of observed earthquake are represented. The 'two-corner-frequency' shows two considerable length-scales of an earthquake source: a length-scale that quantifies the overall size of the fault that ruptures (e.g., the length L of a strike-slip fault) and another length-scale that measures the size of the subevents. Associated with these length-scales are two corresponding time scales: (1) the overall duration of rupture, and (2) the rise time. The SBM has a few main source parameters which have been calibrated to earthquakes of different tectonic regions. The SBM may be considered as a general idealization of the faulting process of an earthquake. For example, the SBM originally is an aggregate of some circular cracks which take place on the fault plane. In initial version of the SBM, the size of all cracks was assumed to be equal; however, the random nature of earthquake phenomenon leads to considering some modifications on such an assumption. In the present paper, a new method of so-called geometry packing is introduced to locate circular cracks of different radii in the fault plane. Using different size of circles is expected to result in more realistic model of earthquake source. In this method, the mentioned circles are set next to each other with no intersections between them. In other words, the proposed method guarantees the existence of barriers between of circular cracks of random radii. The aspect ratio of length to width ($L/_W$) as an important parameter which effects on the number and arrange of circular cracks, is usually being ignored by recent modifications of the SBM.

In other words, the mentioned methods usually use equivalent circular fault by radius of R_C and the same area as rectangular fault, instead of the rectangular one. In this study, by using the fault's geometry as the basis of calculations, the aspect ratio of the fault plane may effect on the number and arrangement of circular cracks in the model. Also, this method has capability to set specific size of circles in specified location of the fault, which may become useful in more complex future models. Afterwards, by using the proposed method, source spectra of different faults are investigated.

Keywords: Kinematic Methods; Fault Modeling; Specific Barrier Model; Seismic Source Spectrum; Packing Method.