

چکیده

رسیدن به یک تخمین قابل اطمینان 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 این رو، 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 دایر 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 دایر با اندازه مختلف.

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

ناصر حاجی (نویسنده مسئول)

استاد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 nkhaji@modares.ac.ir

۱- مقدمه

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 کمی طیف میدان دور امواج لرزه‌ای ساطع شده 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

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. به‌طور کلی 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 یک سو و نداشتن کنترل بر شرایط وقوع زلزله از علل پیچیدگی

از مدل ساتو و هیراساوا [۶] الگو برداری شده است. مدل ساتو و هیراساوا شامل تمام جنبه‌های مهم فرایند دینامیکی گسترش ترک دایره‌ای که به صورت 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 به ازای توابع چگالی احتمال متفاوت زمان رسیدن امواج لرزه‌ای و نیز توابع چگالی احتمال اندازه دوایر محاسبه نمودند.

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

$$S(M_0, f, \zeta) = \sqrt{N\zeta + N(N - \zeta) \left(\frac{\sin(\pi f T_0)}{\pi f T_0} \right)^2} \quad (1)$$

$$(2\pi f)^2 \tilde{M}_{oi}(f)$$

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:

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

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

آن نیز معمولاً به وسیله طیف square - ω 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 توصیف کننده دو خصیصه مهم چشمه‌های لرزه‌ای می‌باشند: فرکانس گوشه اول به ابعاد کلی چشمه، و فرکانس گوشه دوم به اندازه زیرویداد 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 کمی ناهمگونی‌های گسیختگی، فرض می‌کند زلزله به صورت چشمه‌ای محدود می‌باشد که توسط گسل لرزه‌ای مستطیلی (به طول L و عرض W)، که شامل تعدادی زیرویداد 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 زیرویداد) در شبیه‌سازی چشمه گسل را در نظر می‌گیرد، این مدل به سرعت به مدلی رایج برای شبیه‌سازی چشمه‌های لرزه‌ای تبدیل شده است. همان‌طور که گفته شد، در مدل موانع ویژه، صفحه گسل به صورت تعداد زیادی گسیختگی مستقل (به صورت 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. در نتیجه، به دلیل تصادفی بودن محل گسیختگی و نیز تصادفی بودن زمان گسیختگی، سیگنال‌های دریافتی به ایستگاهی در فاصله‌ای به اندازه کافی دور، به صورت ترکیبی خواهند بود. در مدل موانع ویژه، فرایند گسیختگی به صورت افت تنش $\Delta\sigma_L$ اعمال می‌شود. جهت شبیه‌سازی گسیختگی دایروی شکل

محاسبه مقدار طیف از مدل موانع ویژه کلاسیک، معرفی شده‌اند. در قسمت انتهایی نیز به بحث پیرامون نتایج به دست آمده از روش حاضر، پرداخته شده است.

۲- روش پیشنهادی

در صورتی 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:

$$S(\omega) = \sum_{j=1}^N S_j(\omega, R_j) e^{-i\omega T_j} \quad (3)$$

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

$$S_j = \frac{M_{oi}}{1+(f/f_2)^2} \quad (4)$$

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

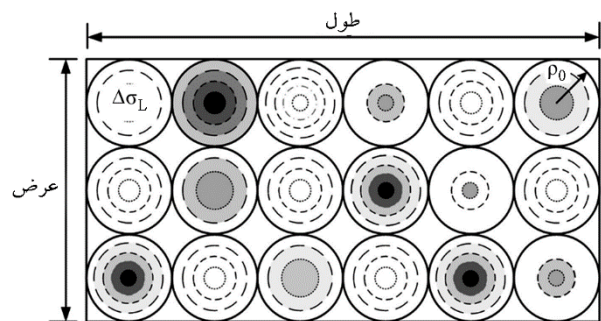
$$M_{oi} = \frac{16}{7} \Delta\sigma_L R^3 \quad (5)$$

$$f_2 = \frac{c_s \beta}{2\pi R} \quad (6)$$

که در رابطه (۵)، $\Delta\sigma_L$ مقدار افت تنش محلی، و R نیز شعاع دایره به عنوان زیررویداد می‌باشد. همچنین در رابطه (۶) مقدار β سرعت انتشار امواج برشی، و c_s نیز تابع وابسته به مقدار نسبت θ/β می‌باشد، به طوری که برای $1.72 \leq c_s \leq 1.85$ میزان تغییرات این نسبت به صورت $0.7 \leq \theta/\beta \leq 10.9$ است. مقدار مورد انتظار (یا میانگین) رابطه (۳) به صورت زیر است:

$$E[S(\omega)] = E[\sum_{j=1}^N S_j(\omega, R_j) e^{-i\omega T_j}] \quad (7)$$

با فرض مستقل بودن وقوع هر یک از زیررویدادها از نظر



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

در اولین انواع مدل موانع ویژه، جهت تسهیل محاسبات، دایره که به عنوان گسیختگی در نظر گرفته می‌شوند، به صورت یکسان و با ابعاد مشابه در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. در نظر گرفتن چنین فرضی به این معناست که در زلزله، تمام گسیختگی‌های رخ داده 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 دایره‌ای 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 دایره‌ای شکل با ابعادی که به صورت کاملاً تصادفی از محدوده مجاز تعریف شده 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 شبیه‌سازی شده»، ابعاد گسل‌های استفاده شده جهت محاسبه مقدار طیف چشمه، پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه طیف‌های چشمه، و همچنین پارامترهای مورد نیاز جهت

زمانی و هندسی، می توان مقدار طیف را برای تمامی دایر زیر وقایع محاسبه نمود (با محاسبه شعاع دایر)، رابطه (۷) به فرم ساده تر رابطه (۸) قابل باز نویسی می باشد:

$$E[S(\omega)] = \sum_{j=1}^N S_j(\omega, R_j) E[e^{-i\omega T_j}] \quad (8)$$

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

$$E[e^{-i\omega T_j}] = \int_{-\infty}^{\infty} f_{T_j}(t_j) e^{-i\omega t_j} dt_j \quad (9)$$

که در رابطه (۹)، T_j زمان رسیدن موج لرزه ای، و $f_{T_j}(t_j)$ تابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه ای می باشد. بنابراین رابطه (۸) به فرم رابطه (۱۰) نوشته می شود:

$$E[S(\omega)] = \sum_{j=1}^N S_j(\omega, R_j) \int_{-\infty}^{\infty} f_{T_j}(t_j) e^{-i\omega t_j} dt_j \quad (10)$$

در آن، تابع $(|\int_{-\infty}^{\infty} f_{T_j}(t_j) e^{-i\omega t_j} dt_j|)^2$ تابع زمانی طیف چشمه نامیده می شود. در این مطالعه، تابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه ای به طور 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. همان طور که در رابطه (۱۰) مشاهده می شود جهت محاسبه مقدار مورد انتظار طیف چشمه، علاوه بر مقادیر تابع طیف زمانی، طیف گسیل شده برای تمامی زیر وقایع مورد نیاز می باشد. محاسبه مقدار طیف برای تمام زیر وقایع، تنها با داشتن اطلاعات هندسی تمام دایر گسیختگی ممکن است، که در ادامه به چگونگی به دست آوردن پارامترهای نامبرده پرداخته می شود.

$$R_b = \alpha_1 R_c \quad \text{and} \quad R_a = \alpha_2 R_b = \alpha_1 \alpha_2 R_c \quad (11)$$

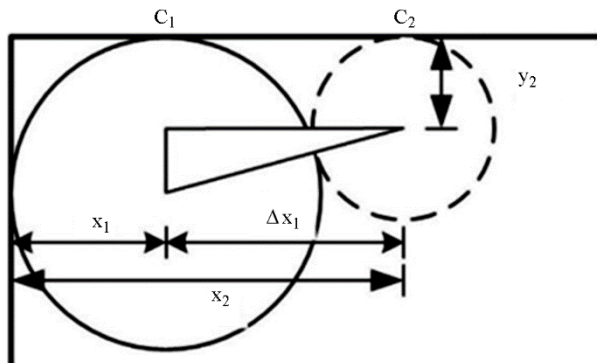
که R_c شعاع گسل معادل می باشد. پس از تعیین محدود مجاز تغییرات، شعاع هر یک از دایر به صورت تصادفی تعیین می شود. سپس، با استفاده از مختصات مرکز هر دایره، اقدام به چیدن آنها، به نحوی که در کنار یکدیگر قرار گیرند، در حالی که همپوشانی نداشته باشند، می شود. لازم به ذکر است که به دلیل اینکه در فرکانس های کم، مقدار طیف چشمه برابر مجموع مقدار انرژی

۳- اندازه گیری و محاسبه

۳-۱- چیدمان ترک های دایروی در گسل مستطیلی

همان گونه که در قسمت های قبلی ذکر شده است، مدل چشمه لرزه زای موانع ویژه، گسل را به طور ساده به صورت تعدادی ترک دایروی مدل سازی می نماید. ترک های مذکور به طور تصادفی گسیخته می شوند و حرکات فرکانس بالای

نمایش داده شده است. در این شکل، $\Delta x_1 = \sqrt{(R_2 + R_1)^2 + (R_2 - R_1)^2}$ است.



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

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 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.

$$y_{i+1} = W - R_{i+1}, \quad x_{i+1} = x_i + R_i + Gap/2 \quad (16)$$

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 دایره قبلی همپوشانی نداشته باشد، به پایین منتقل می‌شود. مختصات چنین دایره‌ای از رابطه (۱۷) تعیین می‌شود.

$$y_{i+1} = W - (R_i + \Delta y_i), \quad x_{i+1} = L - R_{i+1} \quad (17)$$

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.

تک تک 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 دو قسمتی هالدرسون و پاپاجورجیو [۱۱-۱۲] مراجعه شود. رابطه (۱۲)، بقای ممان لرزه‌ای در مدل را نمایش می‌دهد:

$$M_0^c = \sum_{i=1}^N M_{0i} \quad (12)$$

که در آن، M_0^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 به نحوی که 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 به عنوان مرکز مختصات $(0,0)$ در نظر بگیریم، و R_1 شعاع اولین دایره باشد، مختصات مرکز اولین دایره به فرم زیر است.

$$x_1 = R_1, \quad y_1 = W - R_1 \quad (13)$$

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 به عنوان شعاع دایره i ام که به فرم تصادفی انتخاب شده در نظر بگیریم، مختصات مرکز آنها به فرم رابطه (۱۴) تعریف می‌شوند.

$$y_i = W - R_i, \quad x_i = x_{i-1} + \Delta x_i \quad (14)$$

که در آن

$$\Delta x_i = \sqrt{(R_i + R_{i-1})^2 + (R_i - R_{i-1})^2} \quad (15)$$

قرار گرفتن دایره‌ها درست زیر لبه بالایی مستطیل در شکل (۲)

$$y_i = y_{i-1} - \sqrt{(R_i + R_{i-1})^2 + (R_i - R_{i-1})^2}$$

در ساده‌ترین حالت، نخستین دایره ردیف دوم با دایره 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 (۲۰) چک می‌شود.

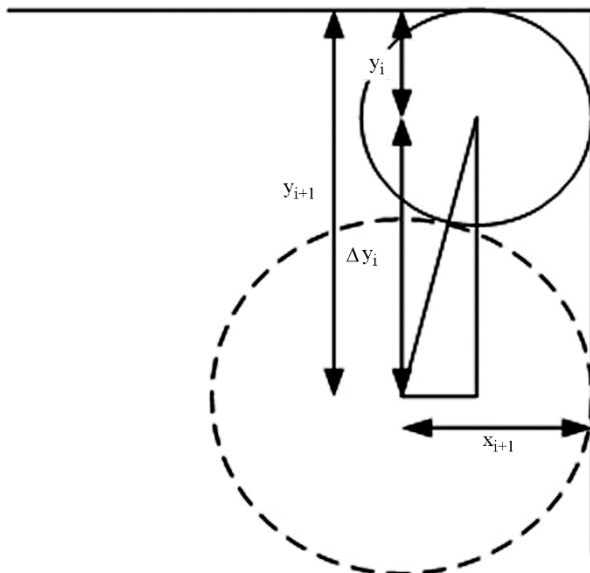
$$(R_i + R_j) > \sqrt{(|x_i - x_j|)^2 + (|y_i - y_j|)^2}, \quad (20)$$

$$j \leq i - 2$$

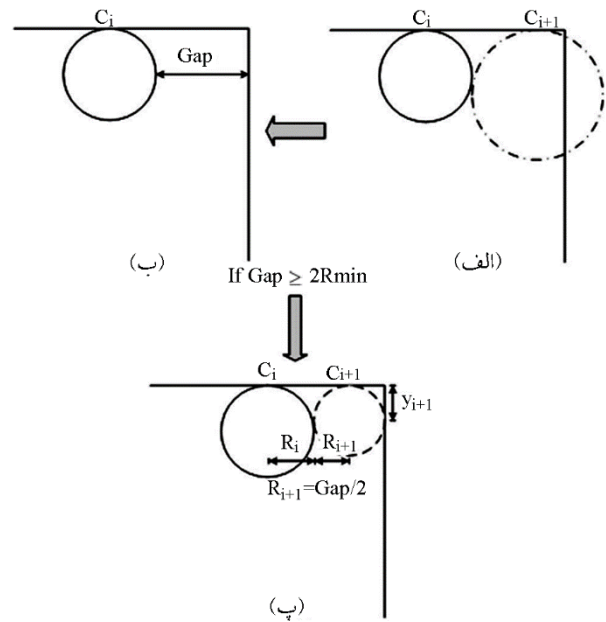
شکل (۵) قرارگیری نخستین دایره ردیف دوم در حالت بدون نیاز به جابه‌جایی را نمایش می‌دهد. در صورت وجود همپوشانی با دایره قبلی، یعنی ارضا نشدن رابطه (۲۰)، دایره آخر باید به سمت پایین کشیده شود تا همپوشانی رفع گردد و رابطه (۲۰) ارضا شود. مختصات مرکز دایره جابه‌جا شده از رابطه (۲۱) قابل دست‌یابی می‌باشد.

$$x_i = L - R_i, \quad (21)$$

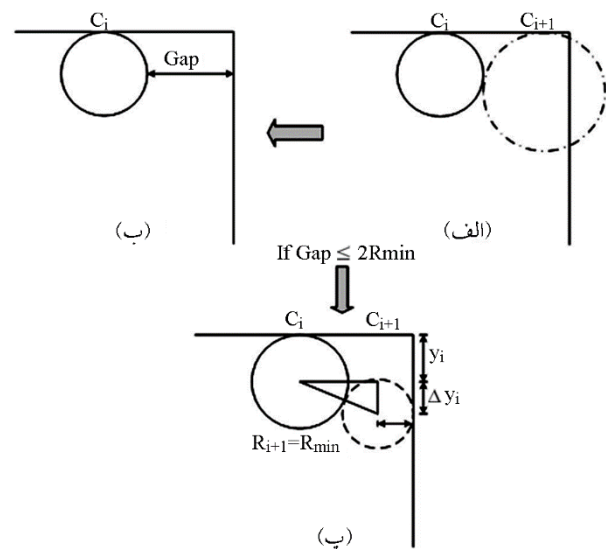
$$y_i = y_j - \sqrt{(R_i + R_j)^2 + (x_i - x_j)^2}$$



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.



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.

پس از تکمیل ردیف اول، اولین دایره از ردیف دوم درست زیر دایره ردیف نخست قرار خواهد گرفت. مختصات دایره مذکور به فرم رابطه (۱۹) قابل تعیین می‌باشد.

$$x_i = L - R_i, \quad (19)$$

را نمایش می دهد. لازم به ذکر است که در ردیف های فرد مقدار زاویه چرخش در صورت وجود همپوشانی، کاهش می یابد. فرایند ذکر شده تا ردیف آخر ادامه می یابد. اصطلاح ردیف آخر به ردیفی اطلاق می شود 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 می یابد. این کاهش تا جایی ادامه می یابد که شعاع دایره مذکور از حد پایینی مجاز کمتر نشود. مختصات مرکز این دوایر نیز برای جایگذاری مناسب تر تغییر می یابد.

شکل (۸) تغییر اندازه و تغییر مکان دایره هایی که قسمتی از آنها خارج از مستطیل قرار گرفته اند را نمایش می دهد. مختصات مرکز دایره تغییر یافته که در شکل (۸) نمایش داده شده است، را می توان با استفاده از رابطه (۲۳) به دست آورد.

$$x_{ni} = x_i \pm (\Delta R/2), y_{ni} = y_i + (\Delta R/2) \quad (23)$$

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

$$R_{ni} = (y_i + R_i)/2, \Delta R = R_i - R_{ni} \quad (24)$$

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

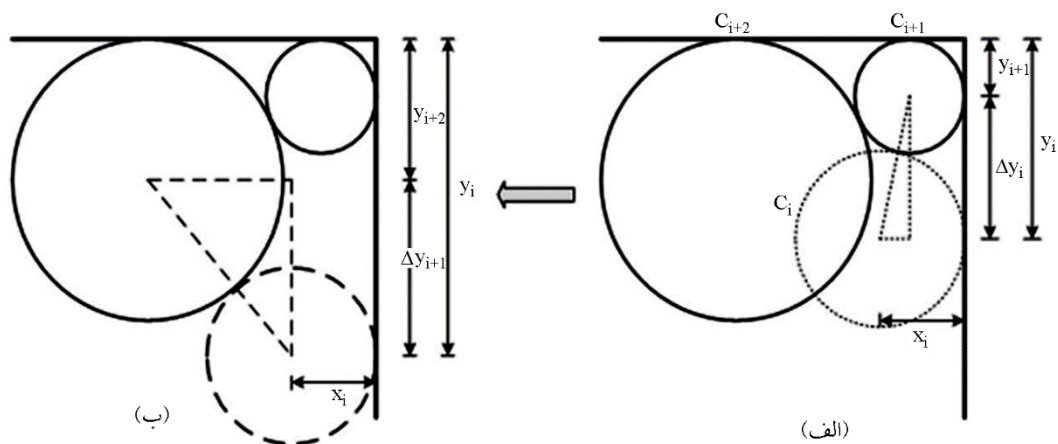
برای بررسی عملکرد این روش، سه گسل مستطیلی به ترتیب

همچنین شکل (۶) نحوه انتقال نخستین دایره سطر دوم، در صورت وجود همپوشانی با سایر دوایر را نشان می دهد. برای قرار دادن مناسب سایر دوایر در ردیف های دوم و همین طور ردیف های بعد از آن، نیاز به معرفی پارامتر جدید زاویه چرخش (φ) می باشد. به کمک این پارامتر جدید، پس از تعیین شعاع دایره ها به صورت تصادفی، آنها در کنار یکدیگر قرار می گیرند. 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 می شود. در گام نخست مقدار زاویه چرخش برابر صفر می باشد $(\varphi = 0)$ ، که در صورت وجود همپوشانی با دوایر قبلی، مقدار آن افزایش می یابد تا جایی که شرط موجود در رابطه (۲۰) ارضا شود و فضای همپوشانی از بین برود. به عبارت دیگر، 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 می شوند از رابطه (۲۲) قابل تعیین می باشد.

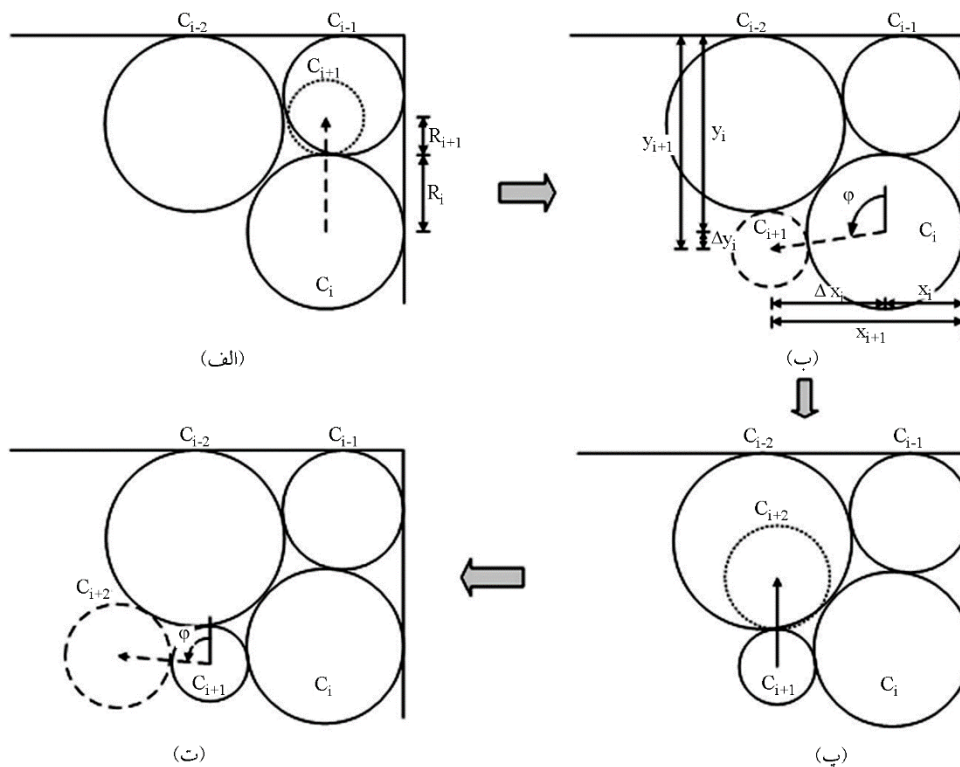
$$x_i = x_{i-1} + (R_i + R_{i-1}) \cos \varphi, \quad (22)$$

$$y_i = y_{i-1} + (R_i + R_{i-1}) \sin \varphi$$

شکل (۷)، نحوه جایگذاری دوایر با استفاده از زاویه چرخش

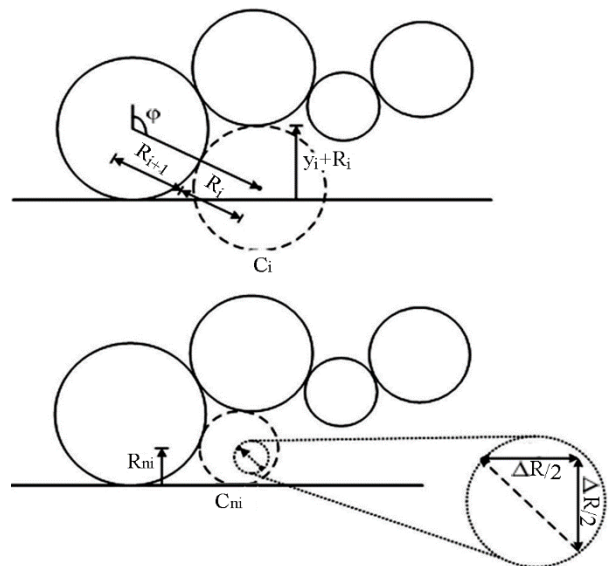


شکل (۶): قرارگیری اولین دایره از سطر دوم درست زیر آخرین دایره سطر اول، در صورت وجود فضای همپوشانی با سایر دایره های سطر اول. در این شکل، $\Delta y_j = \sqrt{(R_i + R_j)^2 + (x_i - x_j)^2}$ است.

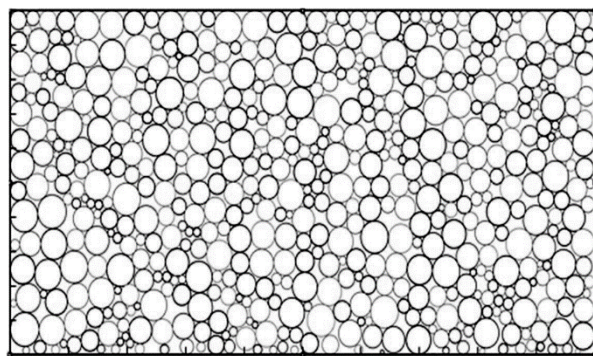


شکل (۷): نحوه جایگذاری سایر دایره‌ها در سطرهای دوم به بعد به کمک زاویه چرخش. با افزایش مقدار این زاویه که نسبت به مرکز دایره ماقبل آخر تغییر می‌نماید، دایره‌ها در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. در این شکل، $\Delta x_i = (R_i + R_{i-1}) \cos \phi$ و $\Delta y_i = (R_i + R_{i-1}) \sin \phi$ است.

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



شکل (۹): قرارگیری تعداد ۵۶۶ دایره که شعاع آنها بین ۰/۱ تا ۰/۵ کیلومتر تغییر می‌نماید، در گسل اول.

به ابعاد $20 \times 10 \text{ km}^2$ ، $70 \times 20 \text{ km}^2$ و $30 \times 30 \text{ km}^2$ نظر گرفته شده است. گسل‌های مفروض، با استفاده از این روش و با در

ایستگاه دریافت کننده امواج را داشته اند. با این فرض تابع چگالی احتمال به فرم زیر خواهد بود:

$$f_T(t) = \frac{1}{T_0}, t \in [0, T_0] \quad (25)$$

در این صورت، تابع زمان طیف چشمه به فرم رابطه (26) به دست می آید:

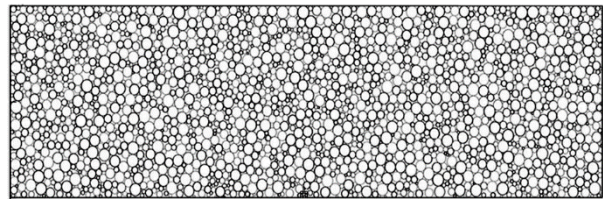
$$\left(\left| \int_{-\infty}^{\infty} f_{T_i}(t_j) e^{-i\omega t_j} dt_j \right| \right)^2 = \left(\sin \frac{\omega T_0}{2} \right)^2 / \left(\frac{\omega T_0}{2} \right)^2 \quad (26)$$

که از تابع زمانی رابطه (26) برای به دست آوردن طیف های چشمه استفاده خواهد شد.

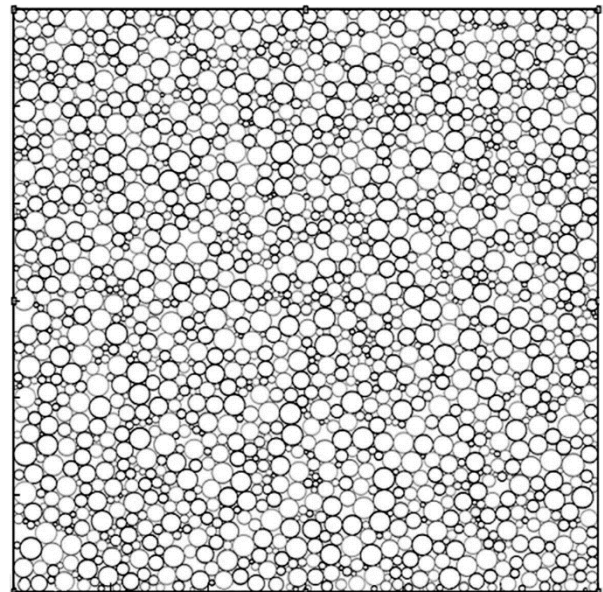
۴- مشخصات گسل های شبیه سازی شده

در این مطالعه، گسل های اول، دوم، و سوم بخش ۳ مقاله که در عمق ۱۵ کیلومتری سطح مدفون شده اند، مورد مطالعه قرار می گیرند. همچنین بزرگای زلزله تولید شده $M_w = 6.4$ در نظر گرفته شده، که بر اساس مطالعه هالدرسن و پاپاجورجیو [۱۱]، مقادیر افت تنش محلی و کلی به ترتیب $\Delta\sigma_L = 161 \text{ bar}$ و $\Delta\sigma_G = 30 \text{ bar}$ در نظر گرفته شده است. سرعت انتشار امواج برشی نیز $\beta = 3.5 \text{ km/s}$ 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 شده اند (شکل های ۱۲ تا ۱۴). پارامترهای مورد نیاز جهت محاسبه طیف از روش احتمالاتی مذکور، در روابط (27) تا (30) آمده است، و برای هر دو روش در جدول (۱) مقایسه شده اند. به غیر از روش به دست آوردن تعداد و شعاع دایره ها، سایر پارامترهای تأثیر گذار بر نتیجه یکسان می باشد. قابل ذکر است که پارامترهای α_1 و α_2 به ترتیب 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.

$$f_R(r) = \frac{1}{R_b - R_a} \quad (27)$$



شکل (۱۰): قرارگیری تعداد ۲۰۶۴ دایره که شعاع آنها بین ۰/۱ تا ۰/۵ کیلومتر تغییر می نماید، در گسل دوم.

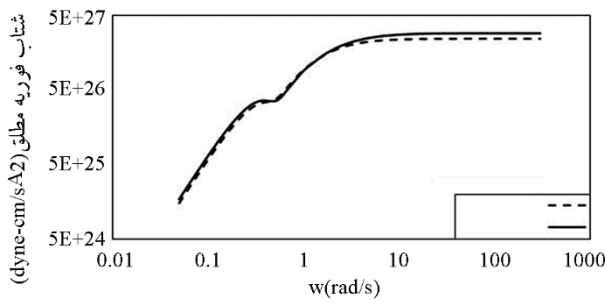


شکل (۱۱): قرارگیری تعداد ۱۷۶۰ دایره که شعاع آنها بین ۰/۱ تا ۰/۶ کیلومتر تغییر می نماید، در گسل سوم.

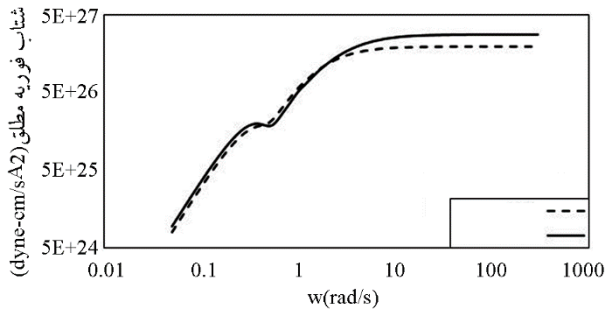
در انتها، با داشتن توابع زمانی، همچنین تعداد و شعاع دایره های گسیختگی، می توان به محاسبه طیف چشمه در این مدل پرداخت. جهت مقایسه بهتر نتایج به دست آمده از روش جدید جایگذاری ترک های گسیختگی، طیف به دست آمده با استفاده از این روش با روش های قبلی مقایسه می شوند که ادامه به شرح آن پرداخته خواهد شد.

۳-۲- تابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج

تا قبل از مطالعات هالدرسون و پاپاجورجیو [۱۱]، توابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه ای به صورت یکنواخت در نظر گرفته می شد. به عبارت دیگر امواج لرزه ای گسیل شده از تمامی نقاط گسل شانس برابری برای رسیدن هم زمان به محل



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



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

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

جدول (۱): پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی.

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

$$\{E[S_R(\omega, R)]\}^2 = \quad (28)$$

$$\left(\frac{16\Delta\sigma_L}{7} \frac{\beta^2 c_s^2}{2\omega^2}\right)^2 \left[R_b + R_a - \frac{\beta^2 c_s^2}{\omega^2(R_b - R_a)} \ln \frac{1 + \frac{\omega^2}{\beta^2 c_s^2} R_b^2}{1 + \frac{\omega^2}{\beta^2 c_s^2} R_a^2} \right]^2$$

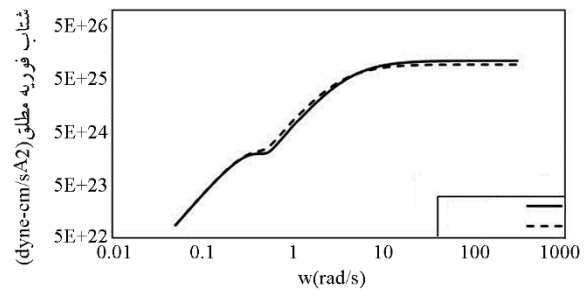
$$E[|S_R(\omega, R)|^2] = \quad (29)$$

$$\left(\frac{16\Delta\sigma_L}{7}\right)^2 \frac{\beta^4 c_s^4}{\omega^4} \frac{1}{(R_b - R_a)} \left[\frac{R_b^3 - R_a^3}{3} - \frac{2\beta^2 c_s^2}{\omega^2} (R_b - R_a) - \frac{\beta^2 c_s^2}{2\omega^2} \left\{ \frac{R_b}{1 + \frac{\omega^2}{\beta^2 c_s^2} R_b^2} - \frac{R_a}{1 + \frac{\omega^2}{\beta^2 c_s^2} R_a^2} \right\} + 2.5 * \frac{\beta^3 c_s^3}{\omega^3} \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{\omega R_b}{c_s \beta} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\omega R_a}{c_s \beta} \right) \right\} \right]$$

$$N = \frac{1}{2} - \frac{8}{7} \frac{\sum_{n=0}^6 \alpha_2^n}{(1 + \alpha_2)^2 (1 + \alpha_2^2)^2} + \quad (30)$$

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

که $f_R(r)$ تابع چگالی احتمال اندازه زیرویداد و N تعداد زیرویداد می‌باشد.



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

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

همان‌گونه که بحث شد، در مدل موانع ویژه، گسلش به‌صورت تعداد زیادی گسیختگی مستقل در نظر گرفته می‌شود که توسط موانع غیرقابل شکست از هم جدا شده‌اند. همان‌طور که گسیختگی پیش می‌رود و سطح گسل را می‌پوشاند، سیگنال‌هایی از گسیختگی‌های محلی ارسال می‌شوند. در نتیجه، به دلیل تصادفی بودن محل گسیختگی و نیز تصادفی بودن زمان گسیختگی، سیگنال‌های دریافتی به ایستگاهی در فاصله‌ای به‌اندازه کافی دور، به‌صورت ترکیبی خواهند بود. به‌بیان‌دیگر، تصادفی بودن محل گسیختگی و نیز تصادفی بودن زمان گسیختگی، به‌صورت ضمنی بیانگر عدم یکسانی تمرکز تنش‌ها در گسل، و توزیع ناهمگن تنش‌هاست. همچنین ذکر شد که در مدل اولیه موانع ویژه علاوه بر اینکه از تابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج با توزیع یکنواخت استفاده می‌شود، اندازه تمام ترک‌های دایروی نیز برابر بوده است که با ماهیت اتفاقی زلزله همخوانی ندارد. در این مطالعه، به ارائه روش جدید چیدمان 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 قراردمی 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 دایر 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 قابل مشاهده است، سطح گسل‌ها کاملاً با دایری با شعاع متنوع پوشانده شده است، به‌طوری که 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 دایر 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 دایر 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 دایر 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 دایر 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 دایر 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 دایر 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 دایر 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.

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.

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 f_{max} . *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*. **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)

فهرست توابع و متغیرها

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