

شبیه‌سازی زلزله لاکویلا ایتالیا ۲۰۰۹ به کمک مدل موانع ویژه

محمدهادی رضایی^۱، ناصر خاجی^۲*

۱- دانشجوی دکترای مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

nkhaji@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۶/۰۸]

تاریخ دریافت: [۹۴/۱۲/۱۵]

چکیده

هم‌زمان با پیشرفت نیاز جوامع به سازه‌های پیچیده‌تر، نیاز به شناخت بیشتر بارهای وارد شده بر سازه به ویژه بارهای لرزه‌ای نیز گسترش می‌یابد. داشتن تخمینی قابل اطمینان از حرکات قوی زمین در یک ساختمان مشخص، بدون داشتن شناخت صحیح از سازوکار تولید امواج لرزه‌ای، عوامل ساختاری اثرگذار بر این امواج در مسیر انتشار، و شناخت شرایط فیزیکی محل ساخته‌شدن سازه‌ها میسر نخواهد بود. در این میان، مدل موانع ویژه که از مشهورترین روش‌های سینماتیکی شبیه‌سازی گسل زلزله است، گسل را به عنوان مجموعه از ترک‌های دایره‌ای در نظر می‌گیرد. گسیختگی به صورت افت تنش‌های موضعی در این ترک‌ها فرض می‌شود، و توقف و شروع‌های مکرر گسیختگی، عامل اصلی تولید امواج فرکانس بالا در این مدل است. در این مطالعه سعی شده است با استفاده از مدل موانع ویژه به شبیه‌سازی چشمه گسل مولد زلزله لاکویلا در کشور ایتالیا اقدام شود، همچنین در سوی دیگر با استفاده از روابط کاهندگی مناسب منطقه آثار مسیر انتشار امواج در مدل‌سازی لحاظ شود. در انتها نیز به کمک ضرب توابع انتقال لایه‌های سطحی خاک آثار ساختگاه بر نتایج اعمال گشته و نتایج را قابل مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده از زلزله مذکور ساخته است.

واژه‌های کلیدی: روش‌های سینماتیکی، مدل‌سازی گسل، مدل موانع ویژه، طیف چشمه زلزله، زلزله لاکویلا

۱- مقدمه

آزمایشگاهی و مطالعات میدانی تنها برای کاهش تلفات ناشی از وقوع چنین پدیده‌های از طریق فهم چگونگی شروع، انتشار و توقف این پدیده صورت گرفته است. دانشمندان به تازگی برای مقابله با این پدیده مخرب، شاخه نوینی از علم به نام لرزه‌شناسی را به وجود آورده‌اند. به‌طورکلی هسته دانش لرزه‌شناسی زلزله را می‌توان فهم دقیق اتفاقات رخ داده در طی زلزله و علل ایجاد آن دانست. در صورتی که زلزله را به صورت یک آزمایش فرض کنیم، مولفه‌های گوناگون تنظیم اولیه که بر نتیجه این آزمایش تأثیر دارند، تحت کنترل و

زلزله همواره به‌عنوان یکی از مهلک‌ترین مخاطرات طبیعی در طول تاریخ تلفات بسیار سنگین جانی و مالی را به جوامع بشری تنها در طول چند دقیقه تحمیل نموده است. رویدادهای دردناکی مانند زلزله مکزیکوسیتی (مکزیک ۱۹۸۵)، زلزله بم (ایران ۲۰۰۳) و توهوکو (ژاپن ۲۰۱۱) و حجم خسارت ناشی از آن‌ها یادآور این حقیقت است که هنوز دانش بشری قابلیت جلوگیری از وقوع و یا تخمین دقیق حرکات قوی زمین را ندارد. دهه‌ها پژوهش دانشمندان شامل انواع بررسی‌های

تولیدکننده امواج لرزه‌ای در نظر می‌گرفتند. طیف این‌گونه مدل‌ها نیز معمولاً به‌وسیله طیف توانی فرکانس زاویه‌ای که اولین بار توسط اکی [1] معرفی شده و توسط برون [5] اصلاح شد، توصیف می‌شود. این مدل نقطه‌ای با طیف مذکور قادر به نمایش فرکانس‌های گوشه‌ای موجود در طیف چشمه زلزله نیست که به‌عنوان ضعف این مدل از آن یاد می‌شود. فرکانس‌های گوشه مورد‌بحث به نحوی توصیف‌کننده ۲ ویژگی مهم چشمه‌های لرزه‌ای است، فرکانس گوشه اول به ابعاد کلی چشمه L و فرکانس گوشه دوم به‌اندازه گسیختگی مرتبط است [17]. در صورت تغییر فضای محاسباتی از حوزه فرکانس به حوزه زمان، مقادیر زمانی مرتبط با فرکانس‌های گوشه زمان کلی گسیختگی و زمان خیزش است. مدل موانع ویژه که برای اولین بار توسط پاپاجورجیو و اکی [15-16] معرفی شد، برای توصیف کمی ناهمگونی‌های گسیختگی، فرض می‌کند زلزله به‌صورت چشمه‌ای محدود است که توسط گسل لرزه‌ای صفحه مستطیلی (به طول L و عرض W)، که شامل تعدادی زیر رویداد دایره‌ای به شعاع ρ_0 است، در نظر گرفته می‌شود. با توجه به ویژگی‌های موجود در مدل موانع ویژه که هر دو پارامتر مهم و ضروری برای تولید فرکانس‌های گوشه (ابعاد کلی گسل و همچنین ابعاد گسیختگی‌های دایری) در شبه‌سازی چشمه گسل را در نظر می‌گیرد، این مدل به‌سرعت به مدلی مرسوم برای شبه‌سازی چشمه‌های لرزه‌ای تبدیل شده است. همان‌طور که گفته شد، در مدل موانع ویژه، صفحه گسل به‌صورت تعداد زیادی گسیختگی مستقل (به‌صورت دایره‌های یکسان به شعاع ρ_0) در نظر گرفته می‌شود که توسط موانع غیرقابل شکست (عدم وجود همپوشانی میان دوایر گسیختگی) 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، امواج دریافتی به ایستگاهی در فاصله‌ای به اندازه کافی دور، به صورت ترکیبی خواهند بود. در مدل موانع ویژه، گسیختگی به صورت افت تنش محلی اعمال می‌شود. برای شبه‌سازی گسیختگی دایروی شکل از مدل ساتو [19] الگوبرداری شده است. مدل ساتو شامل تمام جنبه‌های مهم فرایند دینامیکی گسترش ترک

اختیار نیست. شناخت ناکافی در مورد لایه‌های زیر سطح زمین از یک‌سو و نداشت هیچ‌گونه کنترلی بر شرایط وقوع زلزله از علل اصلی پیچیدگی مطالعه این آزمایش است. اما ناشناخته بودن سطوح زیرین زمین همین‌طور پیچیدگی‌های طبیعی این پدیده نتوانسته پژوهشگران را از مطالعه و بررسی این رویداد بازدارد، و درنهایت نتوانسته‌اند با ارائه مدل‌هایی ساده به تشریح آن بپردازند. مدل‌های فیزیکی ارائه‌شده معمولاً از ۴ بخش مجزا تشکیل می‌شوند که بیانگر تأثیر چشمه، تأثیر مسیر انتشار، تأثیر ساختگاه و تأثیر نوع امواج هستند، بنابراین می‌توان به‌صورت کلی طیف دامنه فوریه حرکات قوی زمین را به فرم رابطه (۱) نوشت [4].

$$Y(M_0, r, f) = E(M_0, f) \cdot P(r, f) \cdot G(f) \cdot I(f) \quad (1)$$

در رابطه اخیر $E(M_0, f)$ طیف تولیدشده توسط چشمه لرزه‌زا، $P(r, f)$ تابع اعمال‌کننده تأثیر مسیر انتشار امواج، $G(f)$ تابع اعمال‌کننده تأثیر ساختگاه بر امواج و $I(f)$ بیانگر نوع موج سطحی است. مقدار $I(f)$ در رابطه (۱) به‌عنوان یک فیلتر نوع حرکت‌های حاصل از شبه‌سازی را کنترل می‌نماید. در صورتی‌که امواج سطحی به‌عنوان خروجی شبه‌سازی مدنظر باشند، مقدار $I(f)$ از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$I(f) = (2\pi fi)^n \quad (2)$$

که در رابطه اخیر $i = \sqrt{-1}$ و مقدار n برای جابه‌جایی، سرعت و شتاب به ترتیب برابر ۰، ۱ و ۲ است. شکل (۱) چگونگی تأثیر هر یک از توابع بر امواج را نمایش می‌دهد.

شکل ۱. آثار چشمه، مسیر انتشار و ساختگاه.

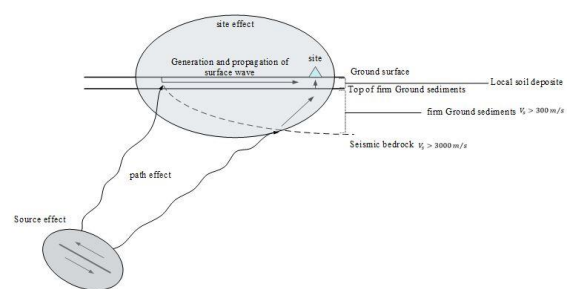


FIG. 1. SOURCE, PATH OF PROPAGATION AND SITE EFFECT.

روش‌های تصادفی مدل‌سازی چشمه‌های لرزه‌ای کار خود را با مدل‌هایی آغاز کردند که چشمه لرزه‌زا را به عنوان نقطه

لایه‌های خاک نزدیک به سطح، آثار ساختگاه بر امواج لرزه‌ای به نتایج اعمال شود و در نهایت نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج به دست آمده از رویداد اصلی قابل مقایسه شوند.

شکل (۲) شکل ظاهری مدل موانع ویژه که گسل را به صورت صفحه مستطیلی در نظر می‌گیرد که توسط گسیختگی‌های دایروی پوشیده می‌شود. این گسیختگی‌ها به صورت تصادفی روی گسل روی می‌دهند.

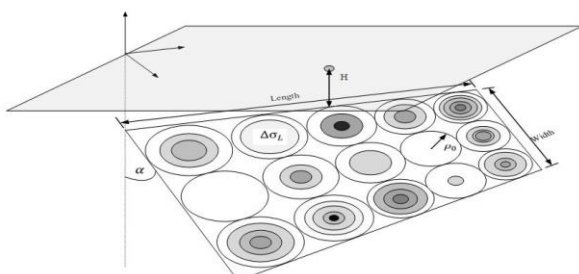


Fig. 2. Schematic view of the SBM (Specific Barrier Model), which considers an earthquake as random occurrence of some circular cracks.

۲- مدل پیشنهادی (موانع ویژه)

همان‌گونه که در بخش پیشین ذکر شد، مدل موانع ویژه حرکات قوی فرکانس بالای زمین را حاصل تعدادی گسیختگی دایروی شکل که به صورت مستقل از یکدیگر بر روی سطح گسل گسیخته می‌شوند، فرض می‌نماید. بنابراین طیف کلی چشمه لرزه را مجموع طیف‌های هر یک از گسیختگی‌های یادشده می‌داند. از این رو طیف چشمه را می‌توان به فرم رابطه (۵) نوشت:

$$S(\omega) = \sum_{j=1}^N S_j(\omega, R_j) e^{-i\omega T_j} \quad (5)$$

که در آن ω فرکانس زاویه ای، R_j شعاع j امین دایره گسیختگی و T_j زمان رسیدن موج لرزه‌ای برای گسیختگی j است ($0 < T_j < T_0$)، و S_j نیز طیف هر یک از زیر وقایع است و به فرم رابطه (۶) قابل نوشتن می‌باشد.

$$S_j = \frac{M_{Oj}}{1 + (f/f_2)^2} \quad (6)$$

که M_{Oj} ممان لرزه‌ای رویداد j ام است و از رابطه (۷) قابل محاسبه است. همچنین f_2 نیز فرکانس گوشه است که از رابطه (۸) به دست می‌آید.

دایره‌ای که به صورت ناگهانی متوقف می‌شود، است. رفتار اولیه مدل با حل دقیق رشد خود متشابه گسیختگی دایره‌ای با افت تنش یکنواخت پس از شروع گسیختگی که توسط کاستروف [13] ارائه شده مقایسه و هماهنگ شده است.

در مطالعات دیگری مانند اکی [2] هالدرسون [8] و پاپاجورجیو [18] مدل موانع ویژه اصلاح و به‌روز شده است. همچنین هالدرسون و پاپاجورجیو [9-10] محدودیت وجود دایره هم‌اندازه را برداشته و توانستند طیف‌های چشمه لرزه را به ازای توابع چگالی احتمال متفاوت زمان رسیدن امواج لرزه‌ای و نیز توابع چگالی احتمال اندازه دایره محاسبه نمایند. در ادامه این مطالعات سقراط [20] توانست به کمک مدل موانع ویژه حرکات قوی زمین در قسمت‌های شمالی ایران کالیبره نماید همچنین در مطالعاتی مشابه زعفرانی [23] به هماهنگی مدل موانع ویژه برای شبیه‌سازی زلزله‌های ایرانی پرداخته است. موسوی [14] نیز به بررسی و تحلیل حرکات قوی زمین رخ داده در ایران به کمک مدل موانع ویژه پرداخته است. شکل (۲) نمای کلی مدل موانع ویژه را نمایش می‌دهد. پس از اصلاحات متعدد انجام گرفته روی مدل، مقادیر طیف شتاب چشمه زلزله که تحت عنوان طیف کلاسیک از آن یاد می‌شود، با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$S(M_0, f, \zeta) = \sqrt{N\zeta + N(N-\zeta) \left(\frac{\sin(\pi f T_0)}{\pi f T_0} \right)^2} (2\pi f)^2 \tilde{M}_{Oj}(f) \quad (3)$$

که در رابطه اخیر، N تعداد دایره گسیختگی، T_0 زمان کلی رسیدن امواج لرزه‌ای، $\tilde{M}_{Oj}(f)$ طیف جابه‌جایی چشمه برای هر دایره، و ζ پارامتر مقیاس برای بزرگای زلزله است. پارامتر مقیاس بزرگای زلزله از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$\zeta = 10^{2\eta}, \quad \eta = s_m(M_w - M_{cr}) \quad (4)$$

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

در این مطالعه سعی شده است به کمک استفاده از مدل موانع ویژه، چشمه لرزه را و عامل ایجاد زلزله لاکوئیلای ایتالیا شبیه‌سازی شود همچنین با بهره‌گیری از روابط متناسب منطقه، تابع مسیر آثار مربوط به عبور امواج لرزه‌ای در طی مسیر را به نتایج می‌افزاید. در ادامه به کمک مدل‌سازی

$$E[|S(\omega)|^2] = N \cdot E[|S_R(\omega, R)|^2] + N(N-1) \left(\left| \int_{-\infty}^{\infty} f_{T_i}(t_j) e^{-i\omega t_j} dt_j \right| \right)^2 \quad (13)$$

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.

۲-۱- تابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه‌ای

در این مطالعه نیز مانند مدل کلاسیک موانع ویژه، تابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه‌ای به‌طور یکنواخت فرض شده است. به عبارت دیگر امواج لرزه‌ای گسیل شده از تمامی نقاط گسل شانس برابری برای رسیدن هم‌زمان به محل ایستگاه دریافت‌کننده امواج را داشته‌اند. با توجه به فرض مذکور، محاسبه تابع زمانی مورد نیاز برای محاسبه طیف چشمه صورت پذیرفته است. شکل (۳) تابع چگالی احتمال مفروض در این مطالعه را نمایش می‌دهد. مقدار تابع چگالی احتمال و تابع زمانی مورد نیاز برای محاسبه مقدار طیف چشمه به ترتیب به فرم روابط (۱۴ و ۱۵) نوشته می‌شوند.

شکل ۳. تابع چگالی احتمال رسیدن امواج لرزه‌ای یکنواخت.

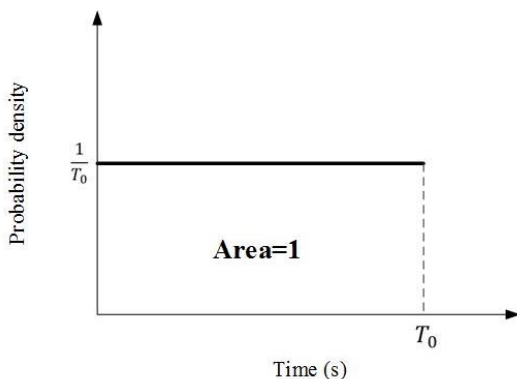


Fig. 3. Uniform PDF (Probability Density Function) of arrival time.

$$f_T(t) = \frac{1}{T_0}, \quad t \in [0, T_0] \quad (14)$$

مقدر تابع زمانی تابع چگالی احتمال رابطه (۱۴) نیز به فرم رابطه (۱۵) خواهد بود.

$$\left(\left| \int_{-\infty}^{\infty} f_{T_i}(t_j) e^{-i\omega t_j} dt_j \right| \right)^2 = \left(\sin \frac{\omega T_0}{2} \right)^2 / \left(\frac{\omega T_0}{2} \right)^2 \quad (15)$$

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

$$f_2 = \frac{c_s \beta}{2\pi R} \quad (8)$$

که در رابطه (۷)، $\Delta\sigma_L$ مقدار افت تنش محلی، و R نیز شعاع دایره به‌عنوان زیر وقایع است. همچنین در رابطه (۸) مقدار β سرعت انتشار امواج برشی، و c_s نیز تابع وابسته به مقدار نسبت ϑ/β است [16]، به‌طوری‌که برای $1.72 \leq c_s \leq 1.85$ میزان تغییرات این نسبت به‌صورت $0.7 \leq \vartheta/\beta \leq 0.9$ است. مقدار مورد انتظار (یا متوسط) رابطه (۵) به‌صورت زیر است:

$$E[S(\omega)] = E \left[\sum_{j=1}^N S_j(\omega, R_j) e^{-i\omega T_j} \right] \quad (9)$$

که مقدار مورد انتظار توان دوم طیف نیز به فرم رابطه (۱۰) قابل نگارش است.

$$E[|S(\omega)|^2] = E \left[\left(\sum_{j=1}^N S_j(\omega, R_j) e^{-i\omega T_j} \right) \left(\sum_{k=1}^N S_k^*(\omega, R_k) e^{i\omega T_k} \right) \right] \quad (10)$$

$$= \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N E[S_j(\omega, R_j) S_k^*(\omega, R_k) e^{-i\omega T_j} e^{i\omega T_k}]$$

با فرض مستقل بودن وقوع هر یک از زیر وقایع از نظر زمانی و هندسی، می‌توان مقدار طیف را برای تمامی دایره‌های زیروقایع محاسبه نمود (با محاسبه شعاع دایره)، رابطه (۱۰) به فرم ساده‌تر رابطه (۱۱) قابل بازنویسی است:

$$|S(\omega)|^2 = \sum_{j=1}^N E[|S(\omega, R_j)|^2] + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1, k \neq j}^N E[e^{-i\omega T_j}] E[e^{i\omega T_k}] E[S_j(\omega, R_j) S_k^*(\omega, R_k)] \quad (11)$$

که در روابط اخیر T_j زمان رسیدن موج لرزه‌ای است، همچنین بر اساس روابط موجود برای محاسبه مقدار مورد انتظار یک تابع، می‌توان نوشت:

$$E[e^{-i\omega T_j}] = \int_{-\infty}^{\infty} f_{T_i}(t_j) e^{-i\omega t_j} dt_j \quad (12)$$

که $f_{T_i}(t_j)$ تابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه‌ای است. بنابراین رابطه (۱۱) را می‌توان به فرم رابطه (۱۳) نوشت:

۲-۲- تابع چگالی احتمال اندازه زیرویدادها

همان‌گونه که ذکر شد ایده اصلی مدل موانع ویژه گسیختگی ترک‌های دایروی شکل روی صفحه گسل است. مدل اولیه موانع ویژه برای سادگی اندازه تمامی این ترک‌ها را یکسان در نظر می‌گرفت، اما تصادفی بودن پدیده زلزله منجر به ایجاد اصلاحاتی در این زمینه روی مدل شد. در این رابطه هالدرسون و پاپاجورجیو [9] با معرفی توابع چگالی احتمال متنوعی برای اندازه ترک‌های دایروی، به‌صورت احتمالاتی تأثیر تنوع اندازه شعاع دایر گسیختگی روی طیف چشمه را بررسی کردند. در مطالعه مذکور برای محاسبه تعداد دایر گسیختگی، حد پایین مقدار طیف را که برابر با مجموع طیف‌های تک‌تک دایر گسیختگی است، برابر مقدار ممان لرزه‌ای کل قرار داده‌اند. لازم به ذکر است که در مطالعه یادشده شعاع دایر گسیختگی بین مقادیر شعاع ماکزیمم و شعاع مینیمم تغییر می‌نماید. در صورتی که R_c را شعاع دایره معادل گسل فرض نماییم، مقادیر شعاع ماکزیمم و شعاع مینیمم به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$R_b = \alpha_1 * R_c \quad (16)$$

$$R_a = \alpha_2 * R_b = \alpha_1 * \alpha_2 * R_c \quad (17)$$

با فرض اینکه مجموع ممان لرزه‌ای زیروقایع تشکیل‌دهنده رخداد اصلی با ممان لرزه‌ای کل با فرض گسیختگی گسل مستطیلی برابر است، می‌توان رابطه (۱۸) را نوشت.

$$M_0^c = \int_{R_a}^{R_b} M_{o_1}(r) n_R(r) dr \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، $n_R(r)$ تابع چگالی فرکانس اندازه زیروقایع همچنین $n_R(r) dr$ مشخص‌کننده تعداد زیروقایع با شعاع بین $r < R < r + dr$ است [24].

۲-۲-۱- تابع چگالی احتمال یکنواخت اندازه ترک‌های دایروی در صورتی که تابع چگالی احتمال اندازه زیرویدادها را به فرم یکنواخت در نظر بگیریم، مقدار تابع به فرم رابطه (۱۹) قابل نوشتن است.

$$f_R(r) = \frac{1}{R_b - R_a} \quad (19)$$

در این صورت مقادیر توان دوم مقدار مورد انتظار طیف چشمه، مقدار مورد انتظار توان دوم طیف همچنین تعداد گسیختگی دایر بر اساس هالدرسون [9] که از برابر قرار دادن مجموع ممان لرزه‌ای گسیختگی‌های دایروی کوچک با ممان لرزه‌ای کل به‌دست‌آمده‌اند، از روابط (۲۰ تا ۲۲) قابل بازیابی است.

$$\{E[|S_R(\omega, R)|]\}^2 = \left(\frac{16 \Delta \sigma_L}{7} \cdot \frac{(c_s \beta)^2}{2\omega^2} \right)^2 \left(R_b + R_a - \frac{(c_s \beta)^2}{\omega^2 (R_b - R_a)} \ln \frac{1 + \left(\frac{\omega R_b}{c_s \beta} \right)^2}{1 + \left(\frac{\omega R_a}{c_s \beta} \right)^2} \right)^2 \quad (20)$$

$$E[|S_R(\omega, R)|^2] = \left(\frac{16 \Delta \sigma_L}{7} \right)^2 \cdot \frac{(c_s \beta)^4}{\omega^4 (R_b - R_a)} \left[\frac{R_b^3 - R_a^3}{3} - \frac{2(c_s \beta)^2}{\omega^2} (R_b - R_a) - \frac{(c_s \beta)^2}{2\omega^2} \left\{ \frac{R_b}{1 + \left(\frac{\omega R_b}{c_s \beta} \right)^2} - \frac{R_a}{1 + \left(\frac{\omega R_a}{c_s \beta} \right)^2} \right\} + 2.5 \left(\frac{c_s \beta}{\omega} \right)^3 \left(\tan^{-1} \left(\frac{\omega R_b}{c_s \beta} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\omega R_a}{c_s \beta} \right) \right) \right] \quad (21)$$

$$N = \frac{1}{2} - \frac{8 \sum_{n=0}^6 \alpha_2^n}{7(1 + \alpha_2)^2(1 + \alpha_2^2)^2} + \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{7} \sum_{n=0}^6 \alpha_2^n - \frac{1}{16} (1 + \alpha_2)^2 (1 + \alpha_2^2)^2 \right)^2 + \frac{1}{4\alpha_1^6} (1 + \alpha_2)^2}{\frac{1}{8} (1 + \alpha_2)^2 (1 + \alpha_2^2)^2}} \quad (22)$$

۲-۲-۲- تابع چگالی احتمال فراکتالی اندازه ترک‌های دایروی برای اولین بار ژنگ [24] از توابع چگالی احتمال فراکتالی برای مدل‌سازی حرکات قوی استفاده نمود. در این مدل‌سازی تابع چگالی احتمال به فرم رابطه (۲۳) خواهد بود.

$$f_R(r) = \frac{DR_a^D R_b^D}{R_b^D - R_a^D} \frac{1}{r^{D+1}} \quad (23)$$

که پارامتر D بعد فراکتال است که در این مطالعه برابر مقادیر ۲ و ۳ خواهد بود. بر اساس توزیع فراکتالی مقادیر توان دوم مقدار مورد انتظار طیف چشمه، مقدار مورد انتظار توان دوم

کلی ۳۰ بار، سرعت انتشار امواج برشی ۳/۵ کیلومتر بر ثانیه، نسبت سرعت انتشار گسیختگی به سرعت انتشار امواج برشی برابر ۰/۸ و مقدار α_1 و α_2 به ترتیب برابر ۰/۴ و ۰/۲ است.

شکل ۴. تابع چگالی احتمال اندازه گسیختگی‌های دایروی با توزیع‌های فراکتالی ((D=2 and 3)) و توزیع یکنواخت. ماکزیمم و مینیمم شعاع مجاز به ترتیب $R_a = 0.5 \text{ km}$ و $R_b = 2.5 \text{ km}$ است.

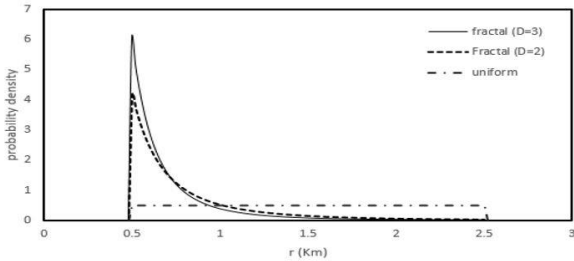


Fig. 4. PDF of sub-event size for fractal (D=2 and 3) and uniform distribution

۳-۲- اثر مسیر انتشار بر امواج لرزه‌ای

از تغییرات روی داده روی شکل و طیف کلی امواج گسیل شده پس از ساطع شدن از چشمه لرزه‌زا تا لحظه رسیدن به لایه‌های سطحی زمین، تحت عنوان آثار مسیر روی امواج یاد می‌شود. شکل (۵) چگونگی تأثیرگذاری مسیر را روی امواج لرزه‌ای نمایش می‌دهد. از آثار مسیر روی امواج گسیل شده می‌توان به آثار میرایی ناشی از انتشار هندسی و همچنین آثار ناشی از میرایی‌های غیر الاستیک اشاره نمود که معمولاً به صورت ترکیبی از هر دو در نظر گرفته می‌شود. میرایی ناشی از انتشار هندسی که با تقسیم انرژی موج منتشر شده از یک نقطه روی کره‌ای با شعاعی که لحظه به لحظه افزایش صورت می‌پذیرد، میرایی‌های غیر الاستیک نیز که با تبدیل انرژی موج به فرم تغییر شکل ماندگار مواد مسیر و مقداری به فرم تغییر دما باعث تغییراتی بر امواج در طول مسیر می‌شوند. در ادامه رابطه (۳۰) به‌طور خلاصه چگونگی تأثیر میرایی‌های یاد شده ناشی از طی مسیر بر امواج را نمایش می‌دهد.

$$P(r, f) = D_g(r) \times D_{Q'}(f, r). \quad (30)$$

در رابطه (۳۰)، $D_g(r)$ نمایانگر میرایی هندسی (پخش هندسی) که تابع فاصله و $D_{Q'}(f, r)$ نیز نمایانگر میرایی ناشی از رفتار غیر الاستیک مواد مسیر است که تابع فاصله و

طیف همچنین تعداد گسیختگی دایر بر اساس هالدرسون [9] از روابط (۲۴ تا ۲۶) برای بعد فراکتالی ۲ و روابط (۲۷ تا ۲۹) برای بعد فراکتالی ۳ قابل‌بازیابی است.

$$(24)$$

$$\begin{aligned} E[|S_R(\omega, R)|]^2 &= \left(\frac{16 \Delta\sigma_L \cdot c_s \beta}{7 \omega}\right)^2 \cdot \frac{2R_a^2 R_b^2}{R_b^2 - R_a^2} \left(\tan^{-1}\left(\frac{\omega R_b}{c_s \beta}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega R_a}{c_s \beta}\right)\right)^2 \\ E[|S_R(\omega, R)|^2] &= \left(\frac{16 \Delta\sigma_L \cdot c_s \beta}{7 \omega}\right)^2 \cdot \frac{R_a^2 R_b^2}{R_b^2 - R_a^2} \cdot \left[\frac{R_a^2 - R_b^2}{\left(1 + \left(\frac{\omega R_b}{c_s \beta}\right)^2\right) \left(1 + \left(\frac{\omega R_a}{c_s \beta}\right)^2\right)} + \frac{(c_s \beta)^2}{\omega^2} \ln \left(\frac{1 + \left(\frac{\omega R_b}{c_s \beta}\right)^2}{1 + \left(\frac{\omega R_a}{c_s \beta}\right)^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} N &= -\frac{1}{16} (\alpha_2^2 + 4\alpha_2 + 1) \frac{(1 - \alpha_2)^2}{\alpha_2^2} \\ &+ \sqrt{(\alpha_2^2 + 4\alpha_2 + 1)^2 \frac{(1 - \alpha_2)^4}{256 \alpha_2^4} + \left(\frac{1 + \alpha_2}{2\alpha_1^3 \alpha_2^2}\right)^2 \left(\frac{\Delta\sigma_G}{\Delta\sigma_L}\right)^2} \end{aligned} \quad (26)$$

$$E[|S_R(\omega, R)|]^2 = \left(\frac{16 \Delta\sigma_L}{7}\right)^2 \left(\frac{3R_a^3 R_b^3}{R_b^3 - R_a^3}\right)^2 \left(\ln \frac{R_b \sqrt{1 + \left(\frac{\omega R_a}{c_s \beta}\right)^2}}{R_a \sqrt{1 + \left(\frac{\omega R_b}{c_s \beta}\right)^2}} \right)^2 \quad (27)$$

$$\begin{aligned} E[|S_R(\omega, R)|^2] &= \left(\frac{16 \Delta\sigma_L \cdot c_s \beta}{7 \omega}\right)^2 \left[\left(\frac{R_b}{1 + \left(\frac{\omega R_b}{c_s \beta}\right)^2} - \frac{R_a}{1 + \left(\frac{\omega R_a}{c_s \beta}\right)^2} \right) + \frac{(c_s \beta)}{\omega} \left(\tan^{-1}\left(\frac{\omega R_b}{c_s \beta}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega R_a}{c_s \beta}\right) \right) \right] \frac{3R_a^3 R_b^3}{2(R_b^3 - R_a^3)} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} N &= \frac{(9 \ln^2 \alpha_2 + 2)\alpha_2^3 - \alpha_2^6 - 1}{18\alpha_2^3 \ln^2 \alpha_2} \\ &+ \sqrt{\left(\frac{(9 \ln^2 \alpha_2 + 2)\alpha_2^3 - \alpha_2^6 - 1}{18\alpha_2^3 \ln^2 \alpha_2}\right)^2 + \left(\frac{(1 - \alpha_2)(\alpha_2^2 + \alpha_2 + 1)}{3\alpha_2^3 \alpha_1^3 \ln^2 \alpha_2}\right)^2 \left(\frac{\Delta\sigma_G}{\Delta\sigma_L}\right)^2} \end{aligned} \quad (29)$$

شکل (۴) توابع چگالی احتمال اندازه زیررویدادها را برای توزیع یکنواخت و فراکتالی (بعد فراکتالی ۲ و ۳) نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود با افزایش بعد فراکتال، شانس وجود دایر کوچک‌تر بیشتر می‌شود که همین عامل منجر به بالا رفتن تعداد دایر گسیختگی می‌شود. در این مطالعه مقدار طیف چشمه برای توزیع‌های یکنواخت، فراکتالی با بعد فراکتال ۲، فراکتالی با بعد فراکتال ۳ و با فرض اندازه‌های یکسان دایر گسیختگی (مدل کلاسیک موانع ویژه) محاسبه می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که برای مدل‌سازی پدیده زلزله و محاسبه مقدار طیف چشمه، پارامترهای مورد نیاز برای انجام محاسبات برابر مقادیر زیر خواهند بود. مقدار افت تنش محلی ۱۶۱ بار، مقدار افت تنش

می‌نامند. این نوع توابع معمولاً با توابع انتقال تئوری (۲TTF) مقایسه می‌شوند که بر اساس اطلاعاتی چون ویژگی‌های فیزیکی، تعداد و عمق لایه‌های خاکی به دست می‌آیند. به صورت ساده‌تر می‌توان گفت که توابع انتقال (ETF و TTF) به صورت تابعی از فرکانس، چگونگی میرا شدن و یا تشدید امواج لرزه‌ای توسط لایه‌های خاک را نمایش می‌دهند. توابع انتقال را می‌توان به فرم رابطه (۳۳) نشان داد.

$$H(f) = \frac{U_{surface}(f)}{U_{bed\ rock}(f)} \quad (33)$$

که در رابطه اخیر $U_{surface}(f)$ سری فوریه امواج دریافت شده روی سطح زمین و نیز $U_{bed\ rock}(f)$ نیز سری فوریه امواج رسیده به سنگ‌بستر است. فرضیات معمولی که برای محاسبه (TTF) در نظر گرفته می‌شوند عبارت‌اند از:

(الف) محیط به صورت لایه‌های تقریباً ثابت در نظر گرفته می‌شود که بر روی نیم فضای غیر میرا، قرار گرفته‌اند. (ب) جبهه امواج دریافتی به فرم صفحه‌ای در نظر گرفته می‌شود (با توجه به فاصله زیاد از چشمه فرض مناسبی است). (پ) تنها مؤلفه‌های افقی عمود بر لایه‌ها (امواج SH) در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. در این مطالعه از توابع انتقال انتشار امواج خطی به همراه ماتریس هسکل-تامسون [11, 22] استفاده شده است.

شکل ۶. آثار ساختگاه بر امواج لرزه‌ای.

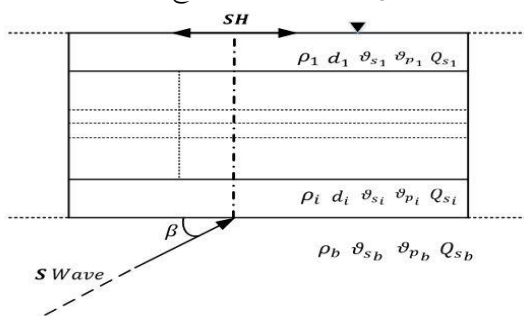


Fig. 6. Site effect on seismic waves.

مقادیر ρ ، d ، v_s ، v_p و Q_s نمایش داده شده در شکل (۶) به ترتیب مقادیر چگالی، ضخامت، سرعت امواج برشی، سرعت امواج فشاری و عامل کیفیت لایه‌های خاک است. همچنین شماره i مربوط به شماره لایه خاکی موردنظر و b مربوط به خصوصیات سنگ‌بستر می‌باشد.

فرکانس است. میرایی‌های هندسی و غیرالاستیک به ترتیب در روابط (۳۱ و ۳۲) تعریف شده‌اند.

شکل ۵. آثار مسیر انتشار امواج بر آن‌ها که به صورت ترکیب کاهش هندسی و میرایی ناشی از رفتار غیر الاستیک مصالح اعمال می‌شود.

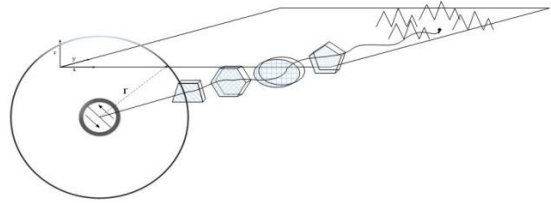


Fig. 5. Path of propagation effect as combination of geometric attenuation and inelastic damping.

$$D_g(r) = (1/r)^n \quad (31)$$

$$D_{Q'}(f, r) = \exp\left(\frac{-\pi f r}{Q'(f) * \beta}\right) \quad (32)$$

مقدار n در رابطه (۳۰) بر اساس مطالعه [7] مقدار ۱ است هم چنین در رابطه (۳۱)، $Q'(f)$ عامل کیفیت انتشار نام دارد و نشان‌دهنده مقدار میرایی ناشی از پراکندگی امواج، همچنین تبدیل انرژی جنبشی به گرما است. مقادیر بزرگ‌تر Q' نشانگر میرایی کمتر مواد است که در سنگ‌های متراکم به بیشترین میزان خود خواهد رسید.

۴-۲- اثر ساختگاه بر امواج لرزه‌ای

خواص فیزیکی و ساختار قرارگیری لایه‌های رسوبی (غیر رسوبی) خاک نزدیک به سطح (نزدیک به عمق ۳۰ متر)، تأثیر قابل توجهی روی بزرگی مؤلفه‌ها، دوره، طول رکورد و سایر ویژگی‌های امواج لرزه‌ای دارند، که در علم لرزه‌شناسی از این آثار تحت عنوان اثرات ساختگاه یاد می‌شوند. به عبارت ساده‌تر به مجموع تغییراتی که تک‌تک لایه‌های خاک سطحی بر امواج می‌گذارند، آثار ساختگاه گویند. شکل (۶) چگونگی تأثیر لایه‌های نزدیک سطح خاک روی امواج را نمایش می‌دهد. از آثار ساختگاه به عنوان تابع انتقال هم یاد می‌شود که صورت تجربی از رکوردهای زلزله موجود، به دست می‌آیند. این نوع توابع را به اختصار (ETF) یا توابع انتقال تجربی

۳- زلزله لاکوئیا

برای اعتبار سنجی نتایج به دست آمده از شبه‌سازی گسل، نتایج حاصله با زلزله لاکوئیا مقایسه شده‌اند. زلزله لاکوئیا که در ۶ آپریل ۲۰۰۹ در کشور ایتالیا روی داد، منجر به خسارات فراوان جانی و مالی در ناحیه ابروزو واقع در قسمت مرکزی این کشور شده است. بزرگی این زلزله مقدار ۶٫۳ و شدت تخریب آن مقدار ۶ در مقیاس مرکالی تخمین زده شده است. صفحه گسل ایجادکننده زلزله طبق [12] با زاویه عمقی ۴۳ درجه نسبت به خط افق و در عمق ۳ کیلومتری سطح زمین قرار گرفته و در راستای طولی به مقدار ۱۴ کیلومتر و در راستای عرضی به میزان ۹/۵ کیلومتر گسترده شده است. برای بررسی رکوردهای زلزله ۴ ایستگاه ثبت لرزه‌ای در اطراف گسل انتخاب شده‌اند که نام، موقعیت و مشخصات رکوردهای ثبت شده در جدول (۱) نمایش داده شده است.

جدول ۱ نام و موقعیت ایستگاه‌های ثبت لرزه‌ای انتخاب شده

نام ایستگاه‌ها	موقعیت ایستگاه‌ها	ارتفاع	فاصله (کیلومتر)	PGV (m/s)	PGA (m/s ²)
Antrodoco	42.418N 13.078E	568	23	0.025	0.255
Avezzano	42.027N 13.425E	746	37	0.112	0.67
Carsoli	42.10N 13.088E	700	33.5	0.022	0.186
Chieti	42.369N 14.147E	109	65	0.078	0.294

لازم به ذکر است که برای یافتن بیشینه مؤلفه افقی شتاب ثبت شده، مؤلفه‌های افقی ثبت شده در تمامی جهات با یکدیگر جمع شده‌اند و جهتی که در آن مقدار شتاب بیشینه مقدار خود است. شکل (۷) چگونگی یافتن شتاب بیشینه از طریق جمع مؤلفه‌های افقی شتاب در راستاهای متفاوت را نمایش می‌دهد. در این مطالعه مقدار $Q'(f)$ که در رابطه (۳۲) آمده است، بر اساس مطالعات [3-7] و مطابق رابطه (۳۴) که متناسب با منطقه لاکوئیا ایتالیا معرفی شده است، استفاده خواهد شد.

$$Q'(f) = 78 f^{0.96} \quad (34)$$

شکل ۷. یافتن مقدار و برای شتاب بیشینه از روی مؤلفه‌های عمودی

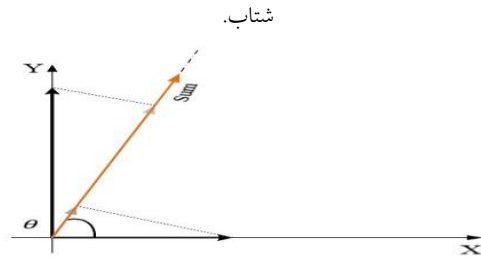


Fig. 7. Calculating sum of acceleration in all direction to find the direction of max acceleration Induced in the specific site.

۴- نتایج

در این مطالعه با استفاده از مدل موانع ویژه که از مشهورترین مدل‌های سینماتیکی شبه‌سازی چشمه لرزه زا است، به شبه‌سازی زلزله لاکوئیا ایتالیا پرداخته شد. برای مقایسه نتایج حاصل از شبه‌سازی با زلزله واقعی، تعداد ۴ ایستگاه اطراف گسل در نظر گرفته شدند که موقعیت و فواصل آن‌ها از گسل در جدول (۱) نمایش داده شده است.

تابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه‌ای برای تمام ایستگاه‌های مطالعه شده با توزیع یکنواخت در نظر گرفته شد. برای مقایسه تأثیر نوع تابع چگالی احتمال اندازه زیررویدادها روی طیف چشمه لرزه‌زا، ۴ آرایش متفاوت از اندازه ترک‌های دایروی در نظر گرفته شده است. آرایش اولیه با دایروی همسان صورت گرفته که تحت عنوان توزیع کلاسیک از آن یاد می‌شود، همچنین توابع چگالی احتمال اندازه با توزیع یکنواخت و فراکتالی (با بعد فراکتالی ۲ و ۳) نیز برای شبه‌سازی گسل به کار گرفته شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۴) نمایش داده شده است، در توزیع‌های غیریکنواخت فراکتالی احتمال وجود دایر با شعاع کوچک‌تر (نزدیک به شعاع مینیمم) بسیار بیشتر از وجود دایر بزرگ‌تر (نزدیک به شعاع ماکزیمم) است و این تمایز با بیشتر شدن عدد بعد فراکتال بیشتر می‌شود. این پدیده با احتمال افزایش تعداد دایر در صورت استفاده از توزیع فراکتالی خود را نشان می‌دهد و می‌تواند باعث افزایش مقدار طیف در فرکانس‌های بالا شود. همان‌گونه که ذکر شد، برای قابل مقایسه شدن نتایج حاصل از شبه‌سازی با نتایج واقعی، مدل مورد استفاده علاوه بر طیف چشمه لرزه‌زا باید شامل آثار مسیر انتشار و همچنین تأثیر ساختگاه بر امواج لرزه‌ای باشد. از این رو در این مطالعه

در این شکل مقدار دامنه طیف فوریه شتاب به ازای توابع چگالی احتمال اندازه زیررویداد ها با توزیع های کلاسیک (دوایر با اندازه یکسان)، یکنواخت و فراکتالی (بعد فراکتال ۲ و ۳) همچنین زلزله واقعی نمایش داده شده در جدول (۱) نمایش داده شده است. شکل (۸ الف) مربوط به مقادیر ذکر شده برای ایستگاه Antrodoco، شکل (۸ ب) برای ایستگاه Avezzano، شکل (۸ پ) برای ایستگاه Carsoli و شکل (۸ ت) برای ایستگاه Chieti می باشند. در ادامه نیز شکل (۹) مشابه با شکل (۸) درصد اختلاف نتایج بدست آمده از شبیه سازی با زلزله لاکوئیلیا را نمایش می دهد.

برای در نظر گرفتن تأثیر مسیر بر امواج شکل (۵) از روابط متناسب با ساختار زیرزمینی ناحیه بررسی شده (ناحیه آبروزو در مرکز ایتالیا) استفاده شد. اثر ساختگاه بر امواج لرزه ای نیز به کمک مدل سازی لایه های خاک نزدیک به سطح در تمامی ایستگاه های بررسی شده، به صورت ضرب ماتریس انتقال هر لایه در لایه بالای خود در نظر گرفته شده است. در نهایت با ترکیب مقدار طیف چشمه به دست آمده از مدل موانع ویژه با تأثیر مسیر و ساختگاه، نتایج حاصل از شبیه سازی زلزله با نتایج زلزله واقعی مقایسه شده اند. شکل (۸) مقایسه میان نتایج شبیه سازی و زلزله را نمایش می دهد.

شکل ۸ مقایسه طیف دامنه فوریه شتاب زلزله لاکوئیلیا ایتالیا با مقادیر حاصله از شبیه سازی گسل به کمک مدل موانع ویژه. منحنی های خط مشکی مقدار طیف دامنه فوریه زلزله مذکور، منحنی نقطه-خط (-) طیف شتاب مدل موانع ویژه با توزیع فراکتال با بعد ۲، خط چین (-) طیف شتاب مدل موانع ویژه با توزیع فراکتال با بعد ۳، نقطه چین (..) طیف شتاب مدل موانع ویژه کلاسیک را نمایش می دهند. همچنین شکل های (الف) نتایج مربوط به ایستگاه Antrodoco، (ب) نتایج مربوط به ایستگاه Avezzano، (پ) نتایج مربوط به ایستگاه Carsoli و (ت) نتایج مربوط به ایستگاه Chieti را نمایش می دهند

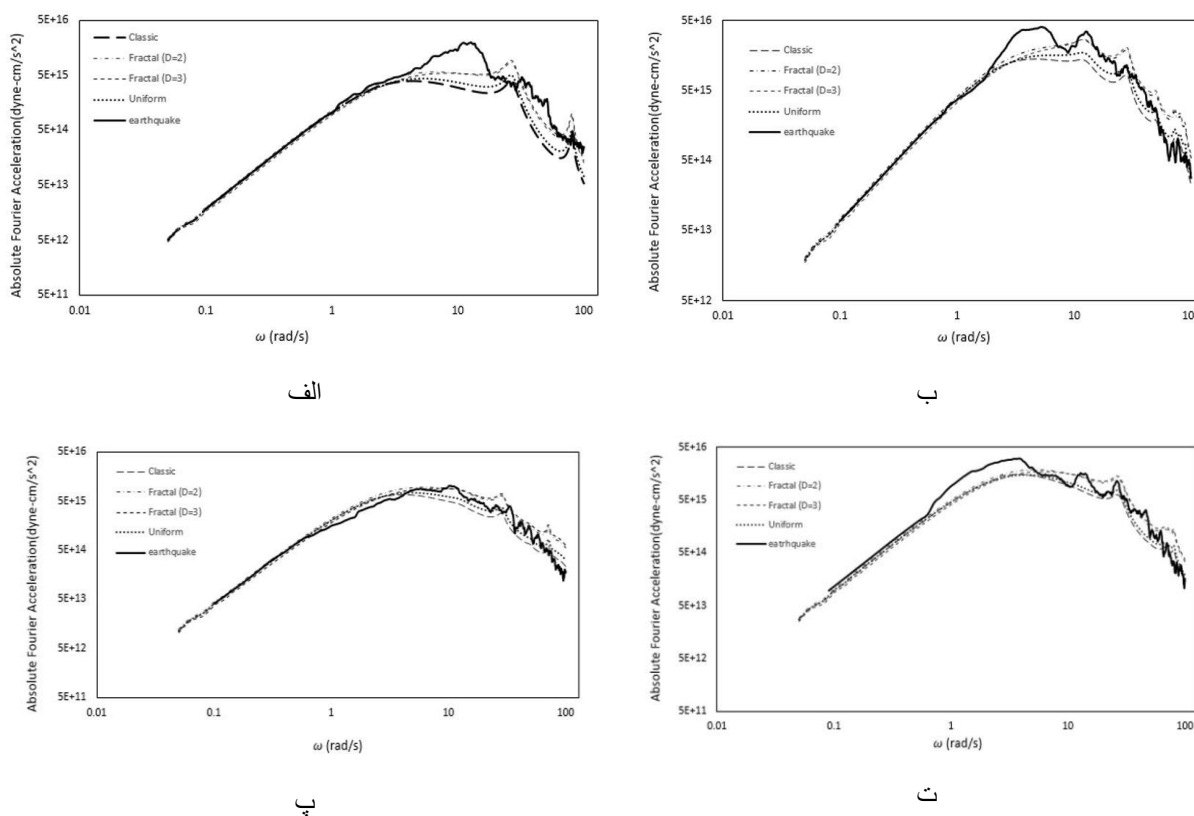


Fig. 8. comparing Fourier amplitude of earthquake acceleration with result of simulating fault by specific barrier model. solid line represents Fourier amplitude of L'aquila Earthquake also dot-dashed line (-.), dashed line (- -), dot line (..) and long dashed line (- - -) represent Fourier amplitude of SBM fractal (D=2), fractal (D=3), uniform and classic distribution of sub-event size. Figure (a) station Antrodoco, Figure (b) station Avezzano, Figure (c) station Carsoli, Figure (d) station Chieti

شکل ۹. میزان اختلاف طیف دامنه فوریه شتاب زلزله لاکوئینا ایتالیا با مقادیر حاصله از شبیه‌سازی گسل به کمک مدل موانع ویژه. منحنی‌های خط مشکی مقدار اختلاف با طیف شتاب مدل موانع ویژه با توزیع یکنواخت، منحنی نقطه-خط (-.)، طیف شتاب مدل موانع ویژه با توزیع فراکتال با بعد ۲، نقطه‌چین (..) طیف شتاب مدل موانع ویژه با توزیع فراکتال با بعد ۳ و خط‌چین (- -) طیف شتاب مدل موانع ویژه با توزیع کلاسیک را نمایش می‌دهند. همچنین شکل‌های (الف) نتایج مربوط به ایستگاه Antrodoco، (ب) نتایج مربوط به ایستگاه Avezzano، (پ) نتایج مربوط به ایستگاه Carsoli و (ت) نتایج مربوط به ایستگاه Chieti را نمایش می‌دهند.

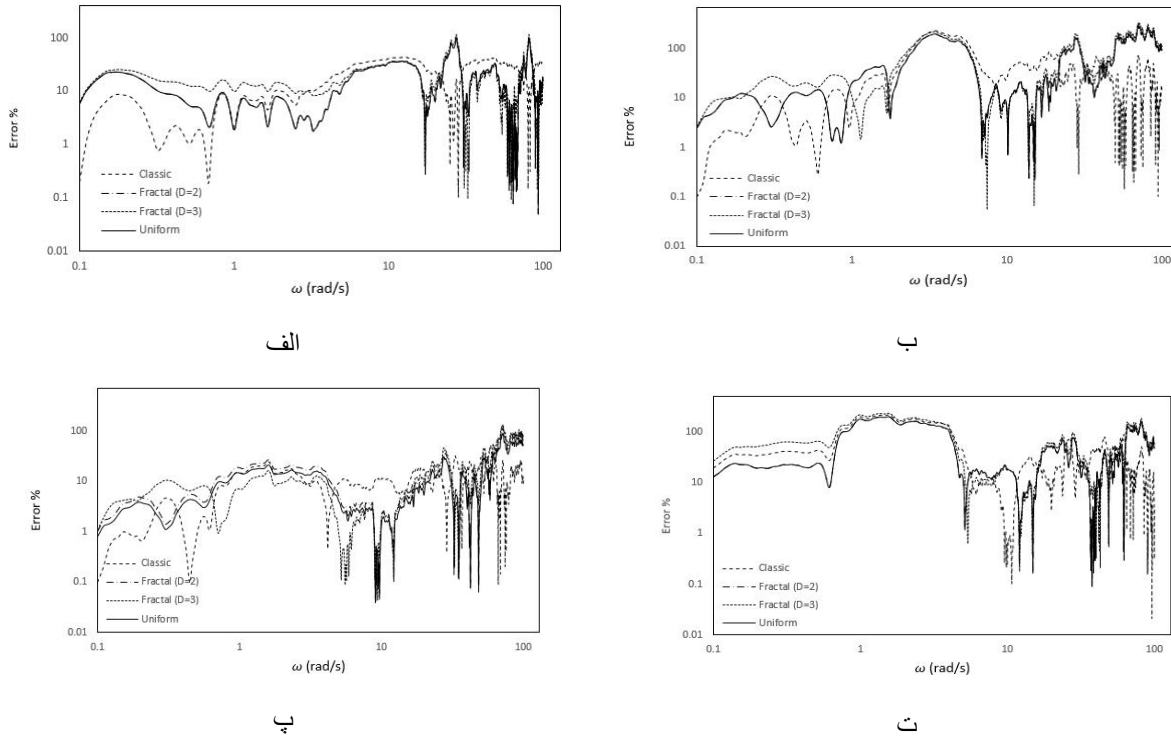


Fig. 9. Percentage of Error between Fourier amplitude of L'Aquila earthquake acceleration with result of simulating fault by specific barrier model. solid line, dot-dashed line (-.), dot line (..) and dashed line (- -) regarding SBM with classic, fractal (D=2), fractal (D=3) and uniform distribution of sub-event size respectively. Figure (a) station Antrodoco, Figure (b) station Avezzano, Figure (c) station Carsoli, Figure (d) station Chieti

با توزیع کلاسیک (استفاده از دوایر یکسان) به دلیل وجود کمترین تعداد دایره گسیختگی، کمترین مقدار طیفی را در فرکانس‌های بالاتر دارد که بیشتر زیر نمودار زلزله واقعی قرار می‌گیرد. طیف به‌دست‌آمده به کمک تابع یکنواخت چگالی احتمال اندازه زیررویدادها (شانس برابر تمام دوایر در بازه مجاز انتخاب) به دلیل افزایش تعداد دوایر موجود مقداری بیش از طیف کلاسیک به خود می‌گیرد. در طیف‌های به‌دست‌آمده از توابع غیریکنواخت چگالی احتمال اندازه زیررویدادها (توزیع‌های فراکتالی) به دلیل افزایش احتمال وجود دوایر ریزتر، تعداد نهایی ترک‌های گسیختگی موجود در صفحه گسل افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به افزایش مقدار طیف در فرکانس‌های بالا شود. همان‌طور که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود غیریکنواختی توزیع در توابع فراکتال با افزایش عدد بعد فراکتال افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش عدد

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

همان‌طور که پیشتر بحث شد، مدل موانع ویژه گسل را به فرم صفحه مستطیلی در نظر می‌گیرد که گسیختگی ترک‌های متعدد دایروی شکل عامل ایجاد حرکات فرکانس بالای فعالیت‌های زمین است. در این مطالعه، به کمک مدل موانع ویژه به شبیه‌سازی گسل به‌عنوان چشمه لرزه‌زا پرداخته شد و با کمک توابع متناسب آثار حرکت در طول مسیر و نیز آثار ساختگاه بر امواج لحاظ شده است. در نهایت با ادغام نتایج حاصل از بخش‌های مدل‌سازی چشمه و نیز آثار مسیر و ساختگاه، شکل (۸) دامنه طیف‌های فوریه شتاب برای هریک از ایستگاه‌های مطالعه شده و به ازای توزیع‌های متفاوت تابع چگالی احتمال اندازه زیررویدادها، نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نمایش داده شده است، همبستگی مناسبی میان نتایج وجود دارد. در این میان طیف حاصل از شبیه‌سازی

of different tectonic regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**(4), 1276-1300.

[9]. Halldorsson B. & Papageorgiou A. S. 2012 Variations of the specific barrier model—Part I: Effect of subevent size distributions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **10**(4), 1299-1319.

[10]. Halldorsson B. & Papageorgiou A. S. 2012 Variations of the specific barrier model—Part II: Effect of isochron distributions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **10**(4), 1321-1337.

[11]. Haskell N. A. 1953 The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **43**(1), 17-34.

[12]. <http://www.strongmotioncenter.org/cgi-bin/CESMD/iqrStationMap.pl> ID=LAquilaItaly-06Apr2009

[13]. Kostrov B. 1964 Selfsimilar problems of propagation of shear cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, **28**(5), 1077-1087.

[14]. Mousavi M., et al. 2007 Analysis of Iranian strong-motion data using the specific barrier model. *Journal of Geophysics and Engineering*, **4**(4), 415-428.

[15]. Papageorgiou A. S. & 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. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **73**(3), 693-722.

[16]. Papageorgiou A. S. & 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. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **73**(4), 953-978.

[17]. Papageorgiou A. S. 1988 On two characteristic frequencies of acceleration spectra: patch corner frequency and f_{max} . *Bulletin of the Seismological Society of America*, **78**(2), 509-529.

[18]. Papageorgiou A. S. 2003 The barrier model and strong ground motion. *Pure and Applied Geophysics*, **160**(3-4), 603-634.

[19]. Sato T. & Hirasawa T. 1973 Body wave spectra from propagating shear cracks. *Journal of Physics of the Earth*, **21**(4), 415-431.

[20]. Soghrat M., et al. 2012 Simulation of strong ground motion in northern Iran using the specific barrier model. *Geophysical Journal International*, **188**(2), 645-679.

[21]. Sonnemann T., et al. 2016 Towards a Hybrid Earthquake Strong-motion Simulation Model for South Iceland. *International Workshop on Earthquakes in North Iceland, Húsavík, North Iceland*, June 2016.

[22]. Thomson W. T. 1950 Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *Journal of applied Physics*, **21**(2), 89-93.

[23]. Zafarani H., et al. 2008 Calibration of the specific barrier model to Iranian plateau earthquakes and development of physically based attenuation relationships for Iran. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(7), 550-576.

[24]. Zeng Y., et al. 1994 A composite source model for computing realistic synthetic strong ground motions. *Geophysical Research Letters*, **21**(8), 725-728.

بعد فراکتال منجر به افزایش تعداد ترک‌های گسیختگی می‌شود که به‌طور غیرمستقیم منجر به افزایش مقدار طیف در فرکانس‌های بالا می‌شود. در شکل (۹) درصد اختلاف میان نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و نتایج بدست آمده از زلزله نمایش داده شده است که این اختلاف می‌تواند ناشی از اطلاعات ناقص در مورد لایه‌های ساختگاه، استفاده از روابط تقریبی کاهندگی و نیز استفاده از مدل ساده چشمه باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود میزان اختلاف در فرکانس‌های بالا که بیشتر تحت تاثیر اندازه و توزیع دایر گسیختگی است، در توزیع‌های فراکتالی کمتر از توزیع یکنواخت و کلاسیک است.

۶- سپاسگزاری

بدین‌وسیله از زحمات پروفیسور روزا دیمایو و پروفیسور آنتونیو امولو از اعضای هیئت‌علمی دانشگاه فردریکو سکوندو شهر ناپل، که در یافتن اطلاعات مربوط روابط کاهندگی و اطلاعات ستون خاک ایستگاه‌های دریافت‌کننده لرزه مربوط به زلزله لاکوئینا به ما کمک نموده‌اند نهایت تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

References

۷- منابع

- [1]. Aki K. 1967 Scaling law of seismic spectrum. *Journal of geophysical research*, **72**(4), 1217-1231.
- [2]. Aki K. 2003 A perspective on the history of strong motion seismology. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **137**(1), 5-11.
- [3]. Bianco F., Castellano M., Del Pezzo E. & Ibanez J. M. 1999 Attenuation of short-period seismic waves at Mt Vesuvius, Italy. *Geophysical Journal International*, **138**(1), 67-76.
- [4]. Boore D. M. 2003 Simulation of ground motion using the stochastic method. *Seismic Motion, Lithospheric Structures, Earthquake and Volcanic Sources*, The Keiiti Aki Volume, Springer, 635-676.
- [5]. Brune J. N. 1970 Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, **75**(26), 4997-5009.
- [6]. Dabaghi M., et al. 2016 Stochastic model for simulation of near-fault ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **46**(6), 963-984.
- [7]. Govoni A., et al. 1996 Coda Qc evaluation using local seismic events in the Friuli area. *Atti del XV Convegno Annuale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, Roma*, 11-13.
- [8]. Halldorsson B. & Papageorgiou A. S. 2005 Calibration of the specific barrier model to earthquakes

Simulation of L'Aquila Earthquake Using Specific Barrier Model

M. H. Rezaei¹, N. Khaji^{2*}

1.Ph.D. candidate in Earthquake Eng., Faculty of Civil Eng. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2.Prof., Civil and Environmental Eng, Dept. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (Corresponding Author)

abstract

There are 3 different parameters that play the main roles in fault simulation process and they need to be accurately introduced. The mentioned parameters are seismic source specifications, wave propagation path; and seismic site effects. based on Condition of the region under study there are two different approaches to obtain Attenuation relationships. the first approach is suitable for regions with abundant records of strong ground motion like California, Japan, and Taiwan. In this approach the mathematical model can be used for developing the attenuation relationships employing regression techniques. In the case of using this approach a few parameters like magnitudes, source-to-site distances, and peak ground characteristics are required to develop attenuation relationships. 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 or (SBM) for short. The SBM 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 bank 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. In this study SBM used as source model. To make the results comparable with real earthquake (L'Aquila earthquake), the path and site effects combined with the results of source model. In order to consider path effects, a relation suitable for central region of Italy (Abruzzo) have been selected. Also, to considering site effects theoretical transfer function for linear wave propagation has been computed with the Thomson-Haskell matrix method. Finally, the result of simulation compared with Fourier amplitude of L'Aquila earthquake.

Keywords: Kinematic methods, Fault modeling, Specific barrier model, Seismic source spectrum, L'Aquila earthquake