

اصلاح مدل حائل‌های ویژه برای مدل‌سازی گسلش با استفاده از توابع زمانی جدید حاصل از موقعیت ایستگاه‌های دریافت امواج لرزه‌ای

محمدهادی رضایی^۱ و ناصر خاجی^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. استاد، گروه مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت: ۹۶/۲/۳، پذیرش نهایی: ۹۶/۱۱/۱۷)

چکیده

ارتباط تنگاتنگ طراحی سازه‌ها در برابر زلزله با شناخت خصوصیات لرزه‌ای محل ساختگاه و برآورد زلزله طراحی در ساختگاه مورد نظر، دانش مهندسی را بر آن داشته تا گام در عرصه شناخت زلزله و عوامل ایجاد کننده آن گذارد و دانش لرزه‌شناسی را با دیدگاه‌ها و نیازهای مهندسی همگام سازد. بی‌شک رسیدن به پیش‌بینی قابل‌اطمینان از حرکات زمین، ناشی از وقوع زلزله در یک ساختگاه مشخص، بدون داشتن شناخت صحیح از سازوکار 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. مدل حائل‌های ویژه که از مشهورترین مدل‌های شبیه‌سازی زلزله است، گسل را به‌عنوان مجموعه‌ای از ترک‌های دایره‌ای در نظر می‌گیرد. گسیختگی به‌صورت افت تنش‌های موضعی در این ترک‌ها فرض می‌شود و توقف‌ها و شروع‌های مکرر گسیختگی، عامل اصلی تولید امواج فرکانس بالا در این مدل است. استفاده از دواپر یکسان و نیز استفاده از توابع چگالی احتمال با توزیع یکنواخت که به‌منظور ساده‌سازی‌های اولیه در مدل اولیه استفاده شده است، با خاصیت ذاتی زلزله مبنی بر تصادفی بودن این رخداد مغایرت دارد. از این‌رو، در این مطالعه سعی شده با پیشنهاد روش جدید استخراج توابع چگالی احتمال رسید امواج لرزه‌ای، توابع زمانی متناسب با موقعیت هر ایستگاه تولید شود. روند به دست آمدن توابع چگالی احتمال یاد شده مبتنی بر هندسه گسل و نیز موقعیت مکانی ایستگاه‌های گیرنده امواج می‌باشد که باعث می‌شود طیف‌های چشمه به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر شوند.

واژه‌های کلیدی: گسلش، مدل سینماتیکی زلزله، مدل حائل ویژه، طیف چشمه زلزله، توابع زمانی.

۱. مقدمه

مدل حائل‌های ویژه که برای اولین بار توسط اکی (۱۹۶۷) معرفی شد، زلزله را فرم چشمه‌ای محدود در نظر می‌گیرد. چشمه مذکور توسط گسل لرزه‌ای که شامل تعدادی زیررویداد دایروی است، توصیف می‌شود (پاپاجورجیو و اکی، ۱۹۸۳ a و ۱۹۸۳ b؛ پاپاجورجیو، ۱۹۸۸). با توجه به خصوصیت‌های موجود در مدل حائل‌های ویژه که هر دو ابعاد مهم و ضروری برای تولید فرکانس‌های گوشه (بعد چشمه لرزه‌زا و بعد گسیختگی) در شبیه‌سازی چشمه گسل را در نظر می‌گیرد، این مدل به‌سرعت به مدلی قابل‌اعتماد برای شبیه‌سازی چشمه‌های لرزه‌ای تبدیل شده است؛ به‌طوری‌که مدل مزبور برای زلزله‌های به وقوع پیوسته در رژیم‌های زمین‌ساختی متنوعی در دنیا، کالیبره شده است (به‌عنوان نمونه هالدورسون و پاپاجورجیو، ۲۰۰۵؛ زعفرانی و همکاران، ۲۰۰۸؛ سقراط و همکاران، ۲۰۱۲؛ کورک و همکاران، ۲۰۱۶).

بنابراین به‌طور ساده می‌توان گفت که مدل حائل‌های ویژه صفحه گسل را به‌صورت تعداد زیادی گسیختگی مستقل در نظر می‌گیرد که توسط حائل‌های غیرقابل شکست از هم جدا شده‌اند (پاپاجورجیو، ۲۰۰۳). همان‌طور که گسیختگی جلو می‌رود و سطح گسل را می‌پوشاند، سیگنال‌هایی از گسیختگی‌های محلی ارسال می‌شوند. ایستگاهی در فاصله به‌اندازه کافی دور، این سیگنال‌ها را به دلیل تصادفی بودن محل گسیختگی و همچنین تصادفی بودن زمان گسیختگی، به‌صورت ترکیبی دریافت می‌کند. به‌بیان‌دیگر، در مدل حائل‌های ویژه، گسیختگی‌ها به شکل تعدادی دایره (به شعاع ρ_0) در گسل مستطیلی (به طول L

اندازه زیرویدها استفاده شد. استفاده از چنین توابع چگالی احتمالی، طیف‌های حاصل از مدل‌سازی را به دامنه فوریه حاصل از رکوردهای زلزله شبیه‌تر می‌ساخت.

در اولین انواع مدل حائل‌های ویژه (پاپاجورجیو و اکی، ۱۹۸۳a و ۱۹۸۳b) جهت تسهیل محاسبات، توابع چگالی احتمال زمان رسید امواج لرزه‌ای به‌طور یکنواخت در نظر گرفته شده است. در نظر گرفتن چنین فرضی بدین معنا می‌باشد که هندسه گسل و همچنین موقعیت ایستگاه‌های دریافت‌کننده امواج تأثیری در رسیدن امواج لرزه‌ای به ایستگاه‌های یاد شده ندارند و در نتایج به‌دست آمده تأثیر این پارامترها دیده نمی‌شود. در این مطالعه سعی شده است که با تقسیم‌بندی گسل به نواحی با فاصله یکسان از ایستگاه‌های دریافت‌کننده امواج، توابع چگالی احتمالی زمان رسید امواج، با توجه به هندسه گسل و موقعیت ایستگاه‌ها استخراج شده و به تبع آن، توابع زمانی متناسب با پارامترهای یاد شده به دست آید تا نتایج تحلیلی به‌دست آمده با واقعیت زلزله همخوانی بیشتری داشته باشد. در انتها نیز نتایج به‌دست آمده از این روش با زلزله لاکوئیلا در ایتالیا مقایسه شدند تا کارآیی اصلاحات انجام شده بررسی شوند.

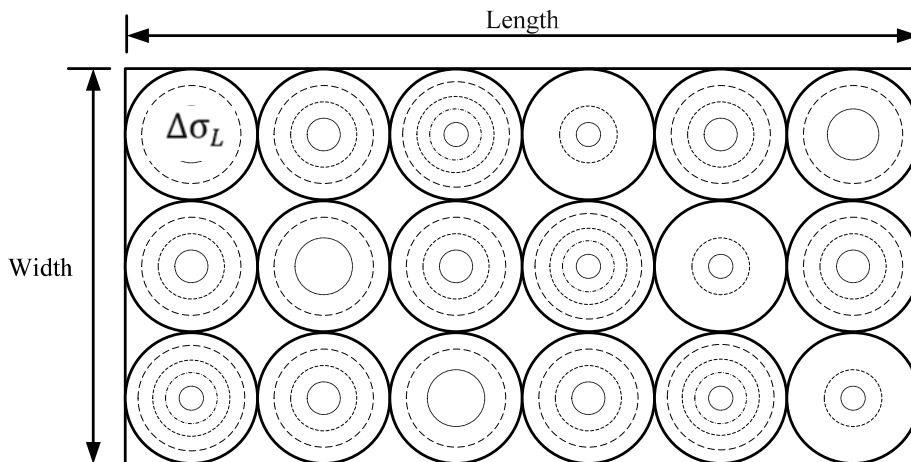
و عرض W) قرار دارند و فرآیند گسیختگی به صورت افت تنش $(\Delta\sigma_L)$ اعمال می‌شود. محققین دیگری مانند هالدورسون و پاپاجورجیو (۲۰۰۵)، مدل حائل‌های ویژه را اصلاح نمودند. شکل ۱ نمای کلی مدل حائل‌های ویژه را نمایش می‌دهد. پس از اصلاحات انجام گرفته بر روی مدل (با معرفی ζ به‌عنوان پارامتر مربوط به پیچیدگی چشمه در فرکانس‌های بالا)، مقادیر طیف شتاب چشمه زلزله با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد.

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

در این رابطه f فرکانس، N تعداد دوایر گسیختگی، T_0 زمان کلی گسلش، $\tilde{M}_{oi}(f)$ طیف جابه‌جایی چشمه برای هر دایره و ζ نیز به‌عنوان پارامتر پیچیدگی چشمه در فرکانس‌های بالا از رابطه (۲) به دست می‌آید:

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

که در آن $s_m = -0.12$ و $M_{cr} = 6.35$ می‌باشد. از مطالعات دیگر می‌توان به هالدورسون و پاپاجورجیو (۲۰۱۲) اشاره نمود که در آن برای اولین بار از توابع چگالی احتمال متنوعی برای زمان رسید امواج و همچنین



شکل ۱. شمای کلی مدل حائل‌های ویژه.

می‌توان نوشت:

$$E(|S(\omega)|^2) = E\left[\left(\sum_{j=1}^N S_j(\omega, R_j)e^{-i\omega T_j}\right) * \left(\sum_{k=1}^N S_k(\omega, R_k)e^{i\omega T_k}\right)\right] = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N E[S_j(\omega, R_j) * S_k^*(\omega, R_k) * e^{-i\omega T_j} * e^{i\omega T_k}] \quad (8)$$

با فرض مستقل بودن وقوع هر یک از زیررویداد، رابطه (۸) را به فرم ساده‌تر رابطه (۹) بازنویسی می‌نماییم.

$$E(|S(\omega)|^2) = \sum_{j=1}^N E\left[|S(\omega, R_j)|^2\right] + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1, k \neq j}^N E\left[e^{-i\omega T_j}\right] E\left[e^{i\omega T_k}\right] E[S_j(\omega, R_j) * S_k^*(\omega, R_k)] \quad (9)$$

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

$$E\left[e^{-i\omega T_j}\right] = \int_{-\infty}^{\infty} f_{T_i}(t_j) * e^{-i\omega t_j} dt_j \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، T_j زمان رسید موج لرزه‌ای و $f_{T_i}(t_j)$ تابع چگالی احتمال زمان رسید امواج لرزه‌ای می‌باشد. اگر فرض کنیم تابع چگالی احتمال رسیدن امواج برای زیررویداد (تمام دایره‌های گسیختگی) توزیع یکسان داشته باشد، رابطه (۹) به فرم رابطه (۱۱) قابل بازنویسی می‌باشد.

$$E(|S(\omega)|^2) = N * E\left[|S_R(\omega, R)|^2\right] + N * (N-1) \left(\int_{-\infty}^{\infty} f_{T_i}(t_j) * e^{-i\omega t_j} dt_j\right)^2 * \{E[S_R(\omega, R)]\}^2 \quad (11)$$

در این مطالعه، $\left(\int_{-\infty}^{\infty} f_{T_i}(t_j) * e^{-i\omega t_j} dt_j\right)^2$ را تابع زمانی طیف چشمه می‌نامیم. همان‌طور که در رابطه (۱۱) مشاهده می‌شود برای رسیدن مقدار مورد انتظار طیف چشمه به تابع چگالی احتمال زمان رسید امواج جهت محاسبه تابع زمانی مذکور، به تابع چگالی احتمال توزیع دواير زیررویداد و همچنین تعداد و اندازه دواير نیازمندیم. در این مطالعه تابع چگالی احتمال توزیع، تعداد و اندازه دواير از مقاله هالدورسون و پاپاجورجیو (۲۰۱۲) استخراج شده که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود.

۲. روش پژوهش

در صورتی که زلزله را مجموعه‌ای از گسیختگی‌های دایروی شکل در نظر بگیریم، طیف چشمه از مجموع طیف‌های هر یک از این گسیختگی‌ها به دست خواهد آمد (هالدورسون و پاپاجورجیو، ۲۰۱۲). 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 ω فرکانس زاویه‌ای، R_j شعاع گسیختگی z و T_j زمان رسید موج لرزه‌ای برای گسیختگی z می‌باشد. $(0 < T_j < T_0)$ و S_j نیز طیف هر یک از زیررویدادها 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 بوده و از رابطه (۵) قابل محاسبه می‌باشد.

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

که در این رابطه، $\Delta\sigma_L$ مقدار افت تنش محلی و R نیز شعاع دواير به‌عنوان زیر رویداد می‌باشد. همچنین f_2 نیز فرکانس گوشه می‌باشد. فرکانس گوشه را می‌توان از رابطه (۶) به دست آورد.

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

در رابطه (۶)، مقدار β سرعت انتشار امواج برشی و c_s نیز تابع وابسته به مقدار نسبت ϑ/β می‌باشد (ϑ سرعت انتشار گسیختگی می‌باشد) که بر اساس نتایج مطالعات اکی و ریچاردز (۱۹۸۰) به صورت $(1.72 \leq c_s \leq 1.85 \text{ for } 0.7 \leq \vartheta/\beta \leq 0.9)$ می‌باشد. مقدار مورد انتظار (یا میانگین) رابطه (۳) برابر رابطه (۷) خواهد بود.

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

۳. اندازه گیری و محاسبه

مقادیر R_b و R_a به شکل زیر تعریف می شوند:

$$R_b = \alpha_1 * R_c \quad \text{and} \quad R_a = \alpha_2 * R_b = \alpha_1 * \alpha_2 * R_c \quad (12)$$

در این مطالعه مقادیر توابع $E[|S_R(\omega, R)|^2]$ و $E[S_R(\omega, R)]$ جهت محاسبه مقدار مورد انتظار طیف چشمه با فرض توزیع فرکتالی (با بعد فرکتالی = 2 and 3) اندازه زیرویدادها به دست آمده اند (جهت مطالعه بیشتر به هالدورسون و پاپاجورجیو (۲۰۱۲) مراجعه نمایید).

برای $D = 2$ خواهیم داشت:

۱-۳. تابع چگالی احتمال زیرویداد

هالدورسون و پاپاجورجیو (۲۰۱۲) با معرفی پارامترهای α_1 و α_2 و اعمال آنها در روابط مربوط به طیف چشمه زلزله، قید مربوط به یک اندازه بودن دوائر زیرویداد را آزاد نمودند و برای اولین بار در مدل حائل های ویژه از دوایری با شعاع متغیر استفاده کردند. اعمال این تغییر با توجه به تصادفی بودن ذات زلزله، طیف خروجی را به طیف واقعی زلزله نزدیک تر می نماید. در مطالعه مذکور شعاع دوائر گسیختگی بین مقادیر R_b و R_a تغییر می نماید. در صورتی که R_c شعاع دایره معادل گسل فرض شود،

$$\{E[S_R(\omega, R)]\}^2 = \left(\frac{16 \Delta\sigma_L}{7} * \frac{c_s\beta}{\omega} * \frac{2R_a^D R_b^D}{R_b^D - R_a^D}\right)^2 \left(\tan^{-1}\left(\frac{\omega R_b}{c_s\beta}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega R_a}{c_s\beta}\right)\right)^2 \quad (13)$$

$$E[|S_R(\omega, R)|^2] = \left(\frac{16 \Delta\sigma_L}{7} * \frac{c_s\beta}{\omega}\right)^2 * \frac{R_a^D R_b^D}{R_b^D - R_a^D} * \left[\frac{R_a^D - R_b^D}{\left(1 + \left(\frac{\omega R_b}{c_s\beta}\right)^2\right)\left(1 + \left(\frac{\omega R_a}{c_s\beta}\right)^2\right)} + \frac{(c_s\beta)^2}{\omega^2} \ln\left(\frac{1 + \left(\frac{\omega R_b}{c_s\beta}\right)^2}{1 + \left(\frac{\omega R_a}{c_s\beta}\right)^2}\right)\right] \quad (14)$$

$$N = -\frac{1}{16}(\alpha_2^2 + 4\alpha_2 + 1)\frac{(1-\alpha_2)^2}{\alpha_2^2} + \sqrt{(\alpha_2^2 + 4\alpha_2 + 1)^2 \frac{(1-\alpha_2)^4}{256 \alpha_2^4} + \left(\frac{1+\alpha_2}{2\alpha_1^3 \alpha_2^2}\right)^2 \left(\frac{\Delta\sigma_G}{\Delta\sigma_L}\right)^2} \quad (15)$$

برای $D = 3$ خواهیم داشت:

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

$$E[|S_R(\omega, R)|^2] = \left(\frac{16 \Delta\sigma_L}{7} * \frac{c_s\beta}{\omega}\right)^2 * \left[-\left(\frac{R_b}{1 + \left(\frac{\omega R_b}{c_s\beta}\right)^2} - \frac{R_a}{1 + \left(\frac{\omega R_a}{c_s\beta}\right)^2}\right) + \frac{c_s\beta}{\omega} * \left(\tan^{-1}\left(\frac{\omega R_b}{c_s\beta}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\omega R_a}{c_s\beta}\right)\right)\right] * \frac{3R_a^D R_b^D}{2 * (R_b^D - R_a^D)} \quad (17)$$

$$N = \frac{(9 \ln^2 \alpha_2 + 2)\alpha_2^3 - \alpha_2^5 - 1}{18\alpha_2^3 \ln^2 \alpha_2} + \sqrt{\left(\frac{(9 \ln^2 \alpha_2 + 2)\alpha_2^3 - \alpha_2^5 - 1}{18\alpha_2^3 \ln^2 \alpha_2}\right)^2 + \left(\frac{(1-\alpha_2)(\alpha_2^2 + \alpha_2 + 1)}{3\alpha_2^3 \alpha_1^3 \ln^2 \alpha_2}\right)^2 \left(\frac{\Delta\sigma_G}{\Delta\sigma_L}\right)^2} \quad (18)$$

در روابط اخیر $\Delta\sigma_G$ مقدار افت تنش کلی می باشد.

۲-۳. تابع چگالی احتمال زمان رسید امواج

تا قبل از مطالعه هالدورسون و پاپاجورجیو (۲۰۱۲)، توابع چگالی احتمال زمان رسید امواج لرزه‌ای به صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شد. به عبارت دیگر، امواج لرزه‌ای گسیل شده از تمامی نقاط گسل، شانس برابری برای رسیدن هم‌زمان به محل ایستگاه دریافت کننده امواج را داشته‌اند. تابع چگالی احتمال به فرم رابطه (۱۹) خواهد بود:

$$f_T(t) = \frac{1}{T_0}, \quad t \in [0, T_0] \quad (19)$$

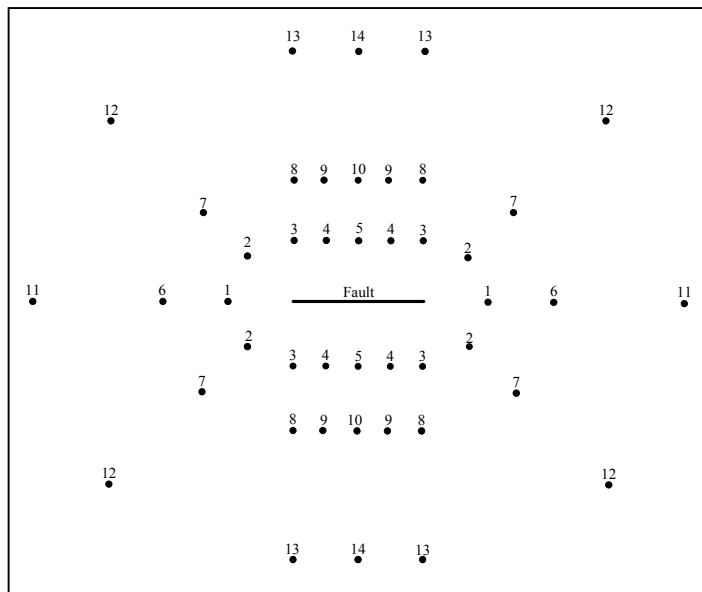
که در این صورت، تابع زمان طیف چشمه به فرم رابطه (۲۰) به دست می‌آید:

$$\left(\int_{-\infty}^{\infty} f_{T_i}(t_j) * e^{-i\omega t_j} dt_j \right)^2 = \frac{\left(\sin \frac{\omega * T_0}{2} \right)^2}{\frac{\omega * T_0^2}{2}} \quad (20)$$

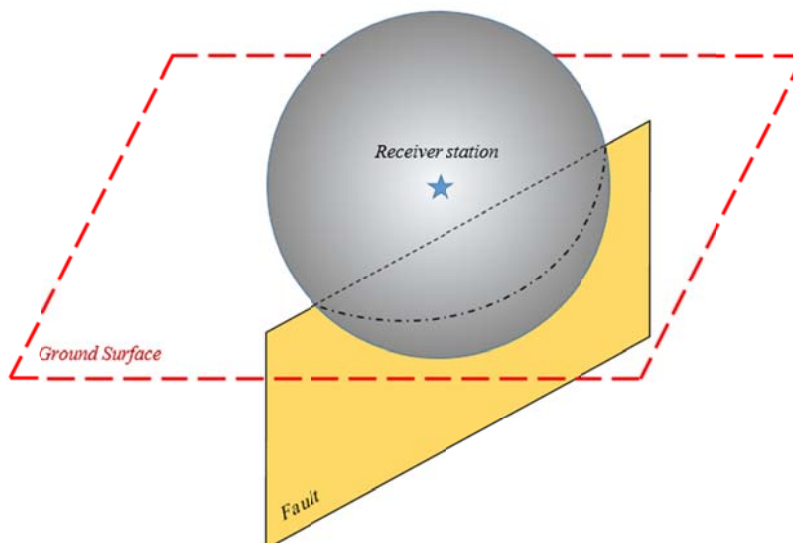
استفاده از تابع چگالی احتمال یکنواخت به این معنی است که هندسه گسل زیرزمین و موقعیت ایستگاه نسبت به گسل وارد محاسبات نشده است؛ بنابراین رابطه فوق برای ایستگاه‌های مختلف در موقعیت‌های گوناگون نسبت به گسل طیف‌های یکسانی به دست خواهد داد.

برای اولین بار در این مطالعه، توابع چگالی احتمال زمان رسید امواج لرزه‌ای با فرض اینکه احتمال رسیدن سریع‌تر

امواج لرزه‌ای از نقاط نزدیک گسل به ایستگاه، بیشتر از نقاط دورتر گسل نسبت به ایستگاه می‌باشد، به دست آمده‌اند. بر این اساس ۱۴ نقطه به‌عنوان ایستگاه‌های بررسی امواج لرزه‌ای روی سطح زمین در نظر گرفته شده است (شکل ۲). شکل مزبور موقعیت نقاط در نظر گرفته روی سطح نسبت به گسل را نمایش می‌دهد. نقاط ۱ تا ۵ در فاصله ۱۵ کیلومتری، نقاط ۶ تا ۱۰ در فاصله ۳۰ کیلومتری، و بالاخره نقاط ۱۱ تا ۱۴ در فاصله ۶۰ کیلومتری از صفحه گسل انتخاب شده‌اند. برای داشتن تابع چگالی احتمال زمان رسید امواج بر اساس فرض مذکور، نیاز است گسل به قطعاتی بر اساس فاصله نسبت به ایستگاه تقسیم‌بندی شود. برای این منظور، به مرکزیت هر یک از ایستگاه‌ها کره‌های با شعاع مختلف رسم می‌شود و محل تقاطع کره و صفحه گسل روی گسل ترسیم می‌شود. شکل ۳ نحوه تقسیم‌بندی گسل بر اساس فاصله تا ایستگاه را به کمک رسم کره‌های هم‌مرکز روی ایستگاه مورد نظر، نمایش می‌دهد. ناحیه بین منحنی‌های موجود روی صفحه گسل، فاصله یکسان از ایستگاه مورد نظر خواهند داشت. شکل ۴ ناحیه مشخص A_S بین دو منحنی روی گسل با فاصله یکسان از ایستگاه را نمایش می‌دهد.



شکل ۲. موقعیت ۱۴ ایستگاه مورد بررسی روی پلان که در آن گسل نیز نشان داده شده است.



شکل ۳. نحوه تقسیم‌بندی گسل بر اساس فاصله نسبت به ایستگاه به کمک کره‌های هم‌مرکز روی ایستگاه.

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 = r_i^2 \quad (22)$$

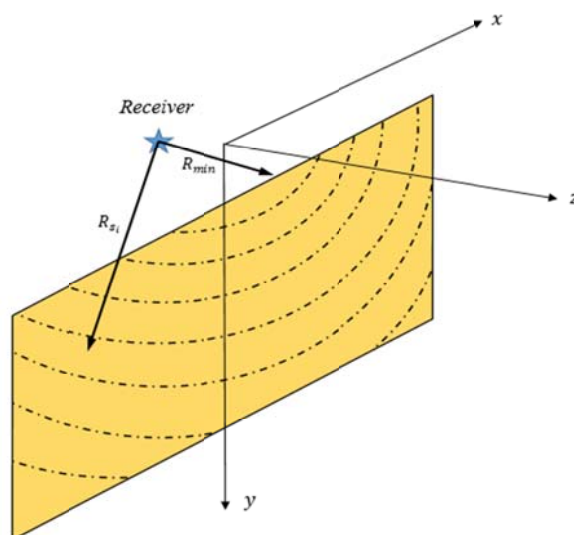
که (a, b, c) مختصات مرکز و r_i نیز شعاع کره‌های فرضی می‌باشند. معادله منحنی‌های ناشی از برخورد صفحه گسل و کره‌های یادشده که در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند، از رابطه زیر قابل محاسبه خواهند بود:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r_i^2 - c^2 \quad (23)$$

برای داشتن مقدار مساحت ناحیه بین نمودارهای مذکور که از برخورد صفحه گسل با کره‌های فرضی به وجود آمده‌اند، صفحه گسل به ابعاد $L \times W$ را در عمق H در نظر می‌گیریم. دستگاه مختصات نیز در شکل ۴ نمایش داده شده است. معادله صفحه گسل به فرم رابطه (۲۱) خواهد بود:

$$z = 0, \quad -\frac{L}{2} < x < \frac{L}{2}, \quad H < y < H + W \quad (21)$$

معادله کره‌های یاد شده نیز به فرم رابطه (۲۲) خواهند بود:



شکل ۴. نحوه تقسیم‌بندی گسل بر اساس فاصله نسبت به ایستگاه به کمک کره‌های هم‌مرکز روی ایستگاه.

$$y = H + W, \quad z = 0 \quad (۲۸)$$

اگر $(\frac{L}{2} < \sqrt{r_1^2 - c^2 - (H + W - b)^2} + a)$ یا $(-\frac{L}{2} > -\sqrt{r_1^2 - c^2 - (H + W - b)^2} + a)$ باشد، کره بزرگ‌تر از آن است که گسل را قطع نماید و نقاط تلاقی یافت نخواهند شد.

برای محاسبه مساحت بین اولین منحنی و سطح بالایی گسل، می‌توان از رابطه زیر کمک گرفت:

$$A_i = \int_{Ll}^{Rl} \int_{Bl}^{Tl} dy dx \quad (۲۹)$$

که در رابطه (۳۷)، Bl ، Rl ، Ll و Tl به ترتیب محدوده‌های چپ، راست، پایین و بالای انتگرال‌گیری هستند. مقادیر این محدوده‌ها بسته به حالات ذکر شده، ممکن است به فرم رابطه‌های زیر انتخاب شوند.

$$Ll = -\frac{L}{2} \quad یا \quad Ll = -\sqrt{r_1^2 - c^2 - (H - b)^2} + a \quad (۳۰)$$

$$Rl = \frac{L}{2} \quad یا \quad Rl = \sqrt{r_1^2 - c^2 - (H - b)^2} + a \quad (۳۱)$$

$$Bl = H \quad (۳۲)$$

در صورت عدم وجود تقاطع با ضلع پایین گسل، محدوده پایین انتگرال به فرم رابطه (۳۳) خواهد بود. در صورت وجود تقاطع، انتگرال‌گیری باید بسته به محل تقاطع، در دو قسمت محاسبه شود که محدوده پایین هر کدام در رابطه (۳۴) آمده است.

$$Tl = \sqrt{r_1^2 - c^2 - (x - a)^2} + b \quad (۳۳)$$

$$Tl = \sqrt{r_1^2 - c^2 - (x - a)^2} + b \quad یا \quad Tl = W + H \quad (۳۴)$$

برای محاسبه مساحت بین سایر منحنی‌ها می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود.

$$A_{s_i} = A_i - \sum_{j=1}^{i-1} A_{s_j} \quad ; \quad i = 2, 3, 4, \dots \quad \text{و برای} \quad (۳۵)$$

$$i = 1, A_{s_1} = A_1$$

با توجه به محدوده‌های ذکر شده، مقدار انتگرال در تمامی شرایط محاسبه می‌شود که نتایج آن به فرم روابط زیر خلاصه می‌شود.

قبل از ادامه محاسبات مربوط به یافتن مساحت بین منحنی‌های مذکور، محدوده‌های انتگرال‌گیری مشخص می‌شوند. از این رو، محل تقاطع i امین کره با ضلع بالایی مستطیل از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$(x - a)^2 + (H - b)^2 = r_i^2 - c^2 \quad (۲۴)$$

با حل معادله رابطه فوق، دو نقطه به عنوان جواب به دست خواهند آمد که پاسخ‌ها به فرم رابطه زیر می‌باشند.

$$x = \pm \sqrt{r_i^2 - c^2 - (H - b)^2} + a, \quad y = H, \quad z = 0 \quad (۲۵)$$

در صورتی که $(\frac{L}{2} < \sqrt{r_i^2 - c^2 - (H - b)^2} + a)$ یا $(-\frac{L}{2} > -\sqrt{r_i^2 - c^2 - (H - b)^2} + a)$ باشند، کره مذکور ضلع بالایی مستطیل را قطع نکرده و شرایط تقاطع با سایر اضلاع چک می‌شوند.

به‌طور مشابه، در صورت وجود تقاطع بین کره فرضی و ضلع چپ سطح گسل، نقطه برخورد از رابطه (۲۶) به دست خواهد آمد. همچنین در صورت تقاطع با ضلع راست سطح گسل، نقطه برخورد از رابطه (۲۷) به دست خواهد آمد.

$$y = \sqrt{r_i^2 - c^2 - \left(\frac{L}{2} + a\right)^2} + b, \quad x = -\frac{L}{2}, \quad z = 0 \quad (۲۶)$$

$$y = \sqrt{r_i^2 - c^2 - \left(\frac{L}{2} - a\right)^2} + b, \quad x = \frac{L}{2}, \quad z = 0 \quad (۲۷)$$

وبازهم در صورتی که $(H + W < \sqrt{r_i^2 - c^2 - \left(\frac{L}{2} - a\right)^2} + b)$ یا $(H + W < \sqrt{r_i^2 - c^2 - \left(\frac{L}{2} + a\right)^2} + b)$ باشد، کره مورد بررسی اضلاع چپ یا راست مستطیل را قطع نمی‌کند. در این حالت، تقاطع با ضلع پایینی صفحه گسل بررسی می‌شود. در صورت وجود تقاطع بین کره فرضی و ضلع پایینی صفحه گسل، نقاط برخورد از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشند.

$$x = \pm \sqrt{r_i^2 - c^2 - (H + W - b)^2} + a,$$

حالت اول:

$$Ll = -\frac{L}{2}, Rl = \frac{L}{2}, Dl = H, Ul = \sqrt{r_1^2 - c^2 - (x-a)^2} + b,$$

$$A_i = bL - HL + \frac{1}{8}\Gamma_1(L-2a) + \frac{1}{2}(r_i^2 - c^2) \left(\tan^{-1} \left(\frac{(L-2a)(\Gamma_1 + \Gamma_2)}{\Gamma_1\Gamma_2 - (L-2a)^2} \right) + \kappa_1\pi \right) + \frac{1}{8}\Gamma_2(L+2a) \quad (36)$$

در صورتی که $\frac{(L-2a)^2}{\Gamma_1\Gamma_2} < 1$ باشد، $\kappa_1 = 0$ و در غیر این صورت، $\kappa_1 = 1$ خواهد بود.

حالت دوم:

$$Ll = -\frac{L}{2}, Rl = \sqrt{r_1^2 - c^2 - (H-b)^2} + a, Dl = H, Ul = \sqrt{r_1^2 - c^2 - (x-a)^2} + b,$$

$$A_i = \frac{1}{2}bL - \frac{1}{2}HL + ba - Ha + \frac{1}{2}\Gamma_3[\text{sgn}(H-b)H - \text{sgn}(H-b)b + 2b - 2H] + \frac{1}{2}(r_i^2 - c^2)$$

$$\left(\tan^{-1} \left(\frac{\Gamma_2\Gamma_3\text{sgn}(H-b) + (H-b)(L+2a)}{\Gamma_2(H-b) - \Gamma_3(L+2a)\text{sgn}(H-b)} \right) + \kappa_2\pi \right) + \frac{1}{8}\Gamma_2(L+2a) \quad (37)$$

در صورتی که $\frac{\Gamma_3(L+2a)\text{sgn}(H-b)}{\Gamma_2(H-b)} < 1$ باشد، $\kappa_1 = 0$ و در غیر این صورت، $\kappa_1 = 1$ خواهد بود.

حالت سوم:

$$Ll = -\sqrt{r_1^2 - c^2 - (H-b)^2} + a, Rl = \sqrt{r_1^2 - c^2 - (H-b)^2} + a, Dl = H,$$

$$Ul = \sqrt{r_1^2 - c^2 - (x-a)^2} + b,$$

$$A_i = \Gamma_3[\text{sgn}(H-b)H - \text{sgn}(H-b)b + 2b - 2H] + (r_i^2 - c^2)\tan^{-1} \left(\frac{\Gamma_3\text{sgn}(H-b)}{(H-b)} \right) \quad (38)$$

حالت چهارم:

$$Ll = -\sqrt{r_1^2 - c^2 - (H-b)^2} + a, Rl = \frac{L}{2}, Dl = H, Ul = \sqrt{r_1^2 - c^2 - (x-a)^2} + b,$$

$$A_i = \frac{1}{2}bL - \frac{1}{2}HL + ba - Ha + \frac{1}{8}\Gamma_1(L-2a) + \frac{1}{2}(r_i^2 - c^2) \left(\tan^{-1} \left(\frac{\Gamma_1\Gamma_3\text{sgn}(H-b) + (H-b)(L+2a)}{\Gamma_1(H-b) - \Gamma_3(L+2a)\text{sgn}(H-b)} \right) + \kappa_3\pi \right) +$$

$$\frac{1}{2}\Gamma_3[\text{sgn}(H-b)H - \text{sgn}(H-b)b + 2b - 2H] \quad (39)$$

مدت زمان لازم جهت رسیدن امواج لرزه‌ای به ایستگاه مورد نظر می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t_{s_i} = \left(\frac{R_{s_i}}{\vartheta_s} - \frac{R_{min}}{\vartheta_s} \right) \quad (43)$$

که در این رابطه، R_{s_i} شعاع i امین کره، R_{min} کوتاه‌ترین فاصله بین صفحه گسل و ایستگاه مورد نظر و ϑ_s سرعت انتشار لرزه‌ای می‌باشد. مقادیر R_{min} و R_{s_i} در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند. بر همین اساس، شکل ۵ توابع چگالی احتمال زمان رسید امواج لرزه‌ای، در هر یک از ایستگاه‌های نمایش داده شده در شکل (۲)، را نمایش می‌دهد.

در صورتی که $\frac{\Gamma_3(L+2a)\text{sgn}(H-b)}{\Gamma_1(H-b)} < 1$ باشد، $\kappa_1 = 0$ و در غیر این صورت، $\kappa_1 = 1$ خواهد بود.

در روابط اخیر مقادیر Γ_1 ، Γ_2 و Γ_3 از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\Gamma_1 = \sqrt{-L^2 + 4La - 4a^2 - 4c^2 + 4r_i^2} \quad (40)$$

$$\Gamma_2 = \sqrt{-L^2 - 4La - 4a^2 - 4c^2 + 4r_i^2} \quad (41)$$

$$\Gamma_3 = \sqrt{-H^2 + 2Hb - b^2 - c^2 + r_i^2} \quad (42)$$

با داشتن مقدار مساحت بین منحنی‌های مذکور می‌توان به محاسبه نسبت $\frac{A_s}{A}$ پرداخت که نشان‌دهنده‌ی احتمال رسیدن امواج لرزه‌ای بین زمان‌های t_{s_i} و $t_{s_{i+1}}$ می‌باشد (A مساحت کل گسل است). در رابطه اخیر،

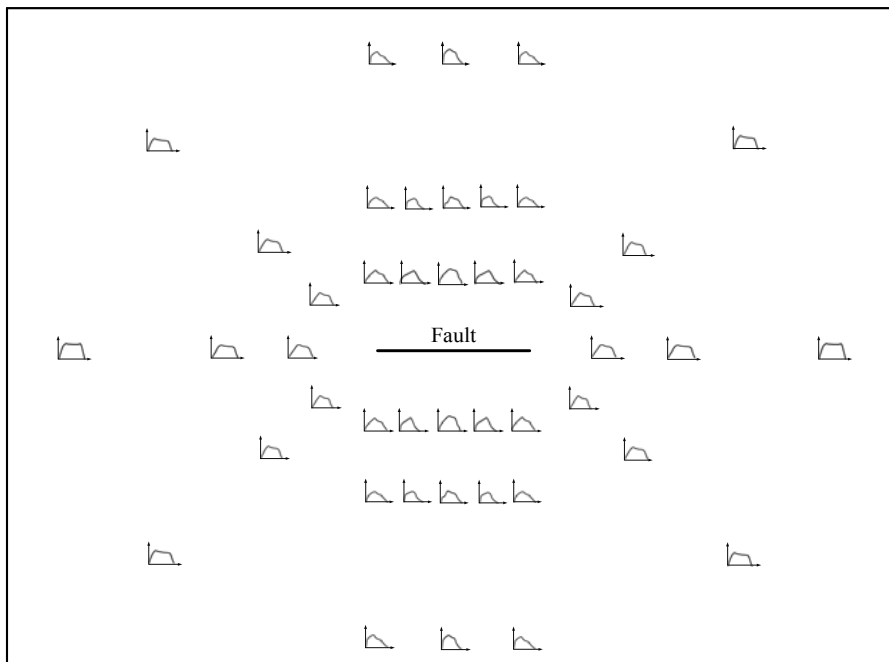
۴. نتایج و بحث

در این مطالعه، به بررسی و اعمال اصلاحات قابل‌توجهی در مدل حائل‌های ویژه در راستای به واقعیت نزدیک‌تر شدن نتایج طیف چشمه لرزه‌زا، پرداخته شده است، در همین راستا، طیف‌های چشمه جدیدی بر اساس توابع زمانی جدید برگرفته شده از هندسه گسل و موقعیت قرار گرفتن ایستگاه‌های دریافت‌کننده امواج، ارائه شده است. به بیان دیگر، با توجه به موقعیت ایستگاه‌های مختلف روی سطح زمین نسبت به گسل موجود، توابع چگالی احتمال زمان رسید امواج لرزه‌ای جدید ارائه شده است تا با تولید توابع زمانی جدید، طیف‌های چشمه به‌دست‌آمده با واقعیت موجود سازگاری بیشتری داشته باشند.

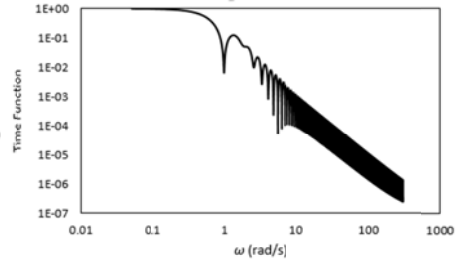
برای بررسی روش پیشنهادی در این مطالعه، یک گسل با ابعاد 10×20 کیلومتر در نظر گرفته می‌شود که در عمق ۱۵ کیلومتری سطح زمین مدفون شده است. همچنین بزرگای زلزله تولید شده $M_w = 6.4$ در نظر گرفته شده و بر اساس مقاله هالدورسون و پاپاجورجیو (۲۰۱۲)، مقادیر افت تنش محلی و کلی به ترتیب $\Delta\sigma_L = 161 \text{ bar}$ و

$\Delta\sigma_L = 30 \text{ bar}$ در نظر گرفته شده است. همچنین، سرعت انتشار امواج برشی نیز برابر $\beta = 3.5 \text{ Km/s}$ فرض شده است. شکل ۵ توابع چگالی احتمال مورد بحث را بر روی نقشه سایت نمایش می‌دهد.

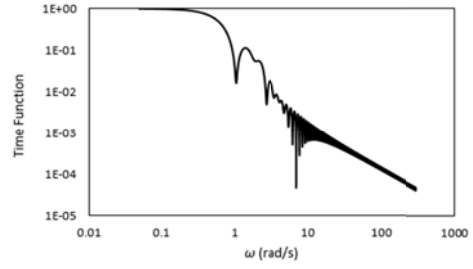
شکل ۶ توابع زمانی جدید به‌دست‌آمده بر اساس توابع چگالی احتمال غیریکنواخت پیشنهادی در این مقاله را، برای هر یک از ایستگاه‌ها به‌طور جداگانه نمایش می‌دهد. در ادامه، شکل‌های ۷ تا ۹ توابع زمانی نقاطی در فواصل یکسان از گسل، اما در راستاهای گوناگون را نمایش می‌دهند. به‌طور کلی، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت هرچه از راستای موازی با راستای اصلی گسل به سمت راستای عمود بر آن حرکت نماییم، اثر کاهندگی در فرکانس‌های بالا نیز کاهش می‌یابد. به‌عبارت‌دیگر، در نقاط موجود در راستای موازی گسل، طیف چشمه با شیب تندتری نسبت به نقاط موجود در راستای عمودی کاهش می‌یابد.



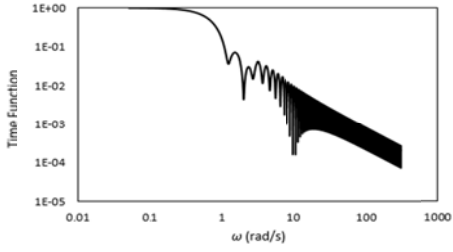
شکل ۵. توابع چگالی احتمال زمان رسید امواج لرزه‌ای متناظر با نقاط نمایش داده شده روی شکل ۲.



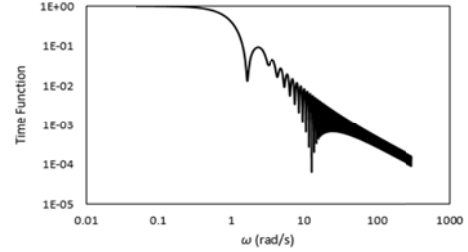
(۱)



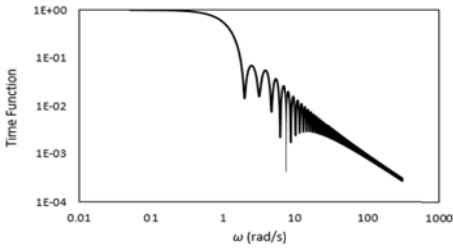
(۲)



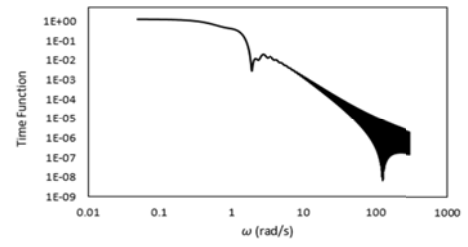
(۳)



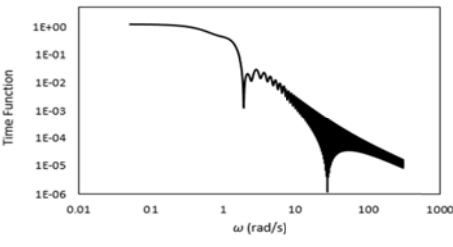
(۴)



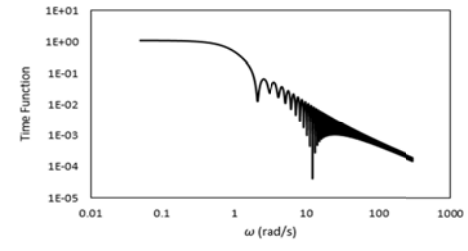
(۵)



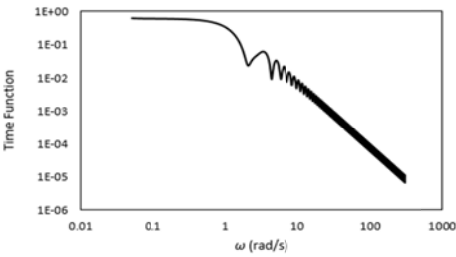
(۶)



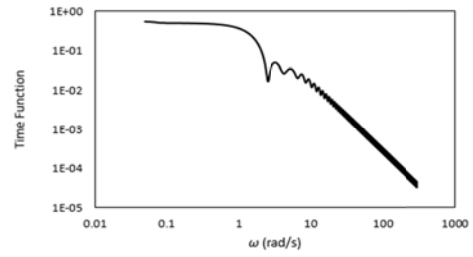
(۷)



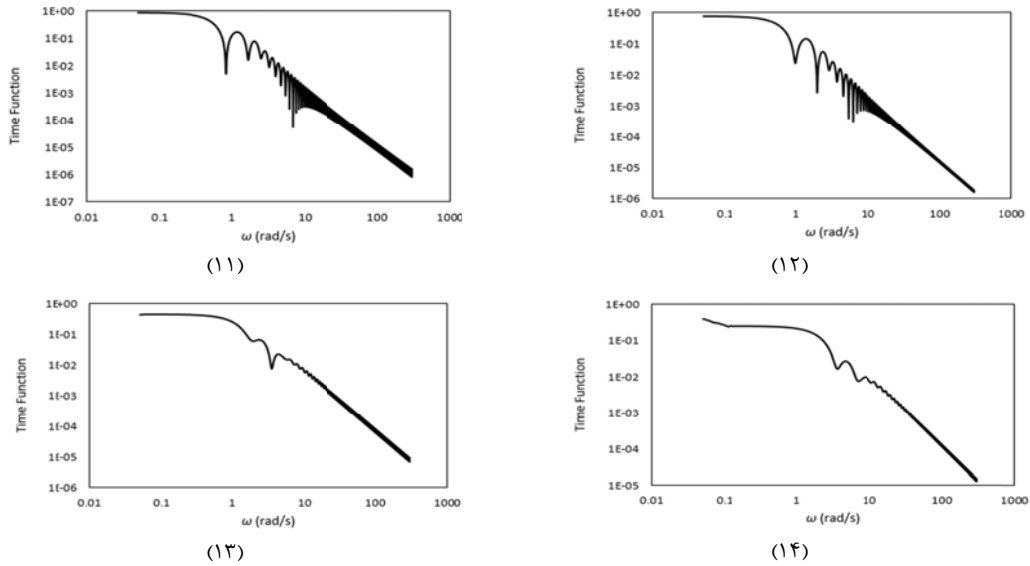
(۸)



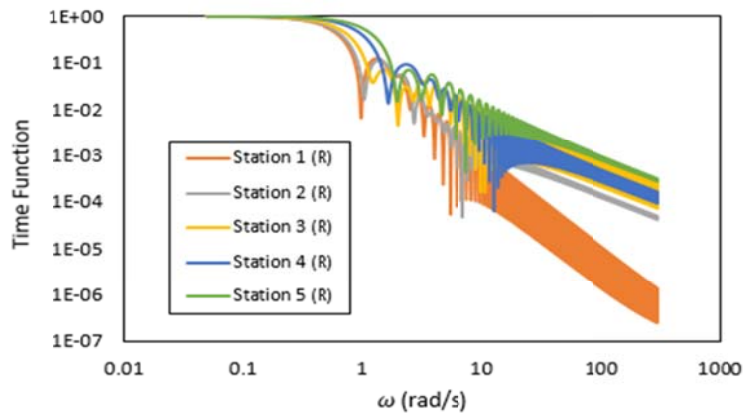
(۹)



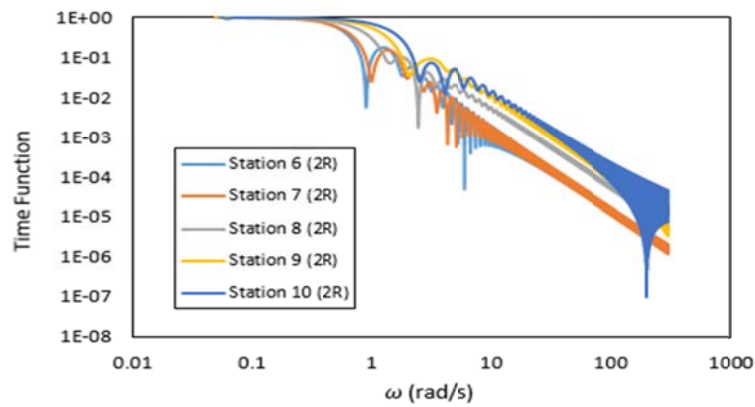
(۱۰)



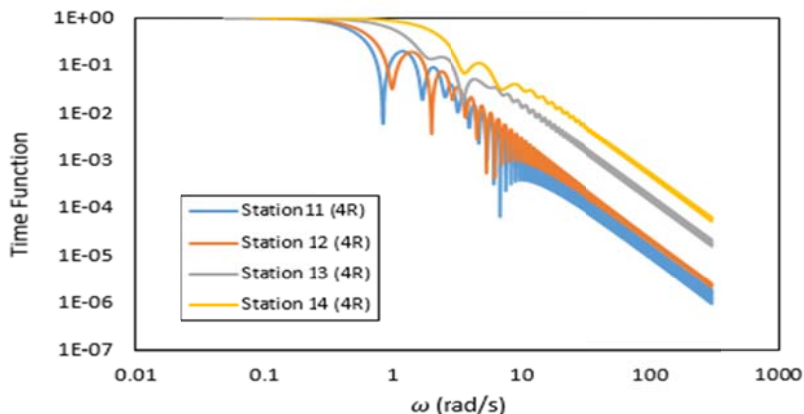
شکل ۶. توابع زمانی به‌دست‌آمده از توابع چگالی احتمال برای نقاط نشان داده شده شکل ۲ (شماره نقاط درون پراکنش و زیر هر تابع زمانی آمده است).



شکل ۷. توابع زمانی نقاط در فاصله R از گسل در راستاهای مختلف نسبت به راستای گسل.



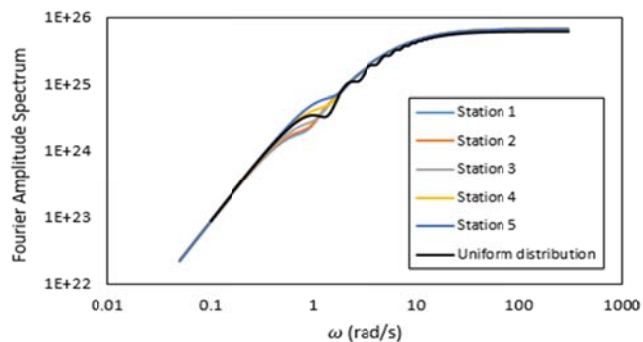
شکل ۸. توابع زمانی نقاط در فاصله $2R$ از گسل در راستاهای مختلف نسبت به راستای گسل.



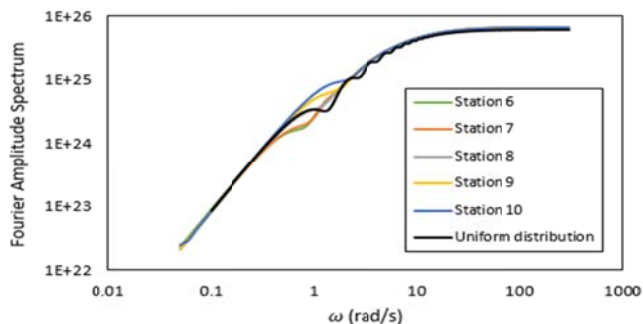
شکل ۹. توابع زمانی نقاط در فاصله $4R$ از گسل در راستاهای مختلف نسبت به راستای گسل.

مدل حائل‌های ویژه برای نقاط با فاصله یکسان از گسل با توزیع فرکتالی، این بار با $D = 3$ را نمایش می‌دهند. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵، به خوبی می‌توان تأثیر موقعیت ایستگاه‌های دریافت‌کننده و همچنین هندسه گسل را بر مقادیر طیف چشمه را، در مقایسه با مقادیر طیفی با فرض تابع چگالی احتمال یکنواخت، مشاهده نمود.

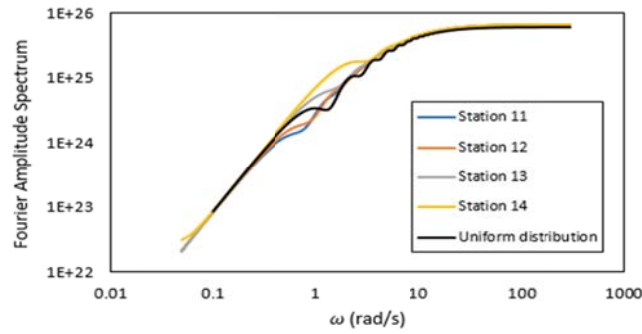
شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مقادیر طیف چشمه لرزه‌زای مدل حائل‌های ویژه برای نقاط با فاصله یکسان از گسل (به ترتیب برای مقادیر R ، $2R$ و $4R$) و با تابع چگالی احتمال اندازه زیررویداد با توزیع فرکتالی $D = 2$ را در کنار مقادیر طیف چشمه با فرض تابع چگالی احتمال یکنواخت، نمایش می‌دهند. همچنین شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نیز مقادیر طیف چشمه لرزه‌زای



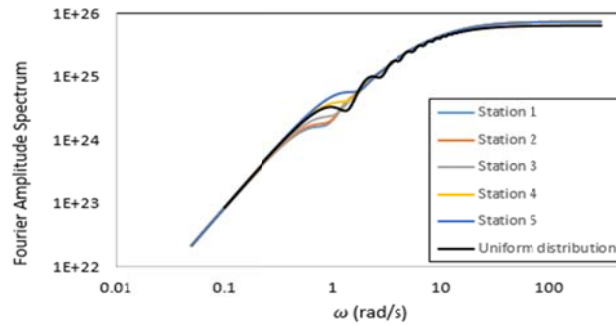
شکل ۱۰. مقایسه طیف چشمه لرزه‌زای نقاط در فاصله R از گسل و در راستاهای مختلف، با طیف با فرض تابع چگالی احتمال یکنواخت (توزیع فرکتالی زیررویداد $D = 2$).



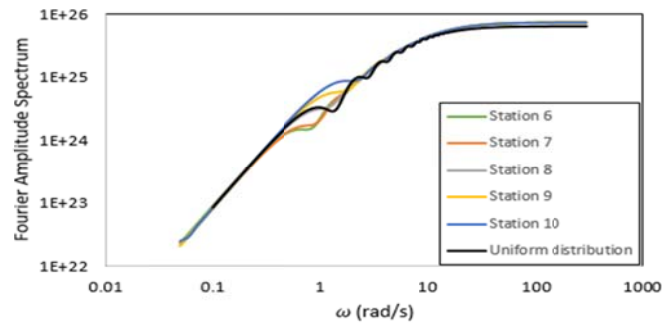
شکل ۱۱. مقایسه طیف چشمه لرزه‌زای نقاط در فاصله $2R$ از گسل و در راستاهای مختلف، با طیف با فرض تابع چگالی احتمال یکنواخت (توزیع فرکتالی زیررویداد $D = 2$).



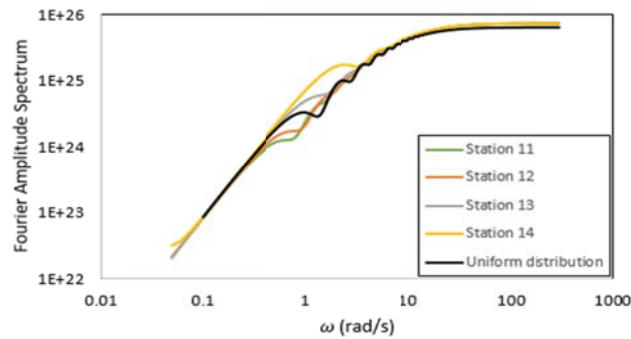
شکل ۱۲. مقایسه طیف چشمه لرزه‌زای نقاط در فاصله $4R$ از گسل و در راستاهای مختلف، با طیف با فرض تابع چگالی احتمال یکنواخت (توزیع فرکتالی زیررویداد $D = 2$).



شکل ۱۳. مقایسه طیف چشمه لرزه‌زای نقاط در فاصله R از گسل و در راستاهای مختلف، با طیف با فرض تابع چگالی احتمال یکنواخت (توزیع فرکتالی زیررویداد $D = 3$).



شکل ۱۴. مقایسه طیف چشمه لرزه‌زای نقاط در فاصله $2R$ از گسل و در راستاهای مختلف، با طیف با فرض تابع چگالی احتمال یکنواخت (توزیع فرکتالی زیررویداد $D = 3$).



شکل ۱۵. مقایسه طیف چشمه لرزه‌زای نقاط در فاصله $4R$ از گسل و در راستاهای مختلف، با طیف با فرض تابع چگالی احتمال یکنواخت (توزیع فرکتالی زیررویداد $D = 3$).

۵- اعتبارسنجی مدل

جهت اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از شبیه سازی گسل، نتایج حاصله با زلزله لاکوئیلایا مقایسه شده اند. زلزله لاکوئیلایا که در ۶ آوریل ۲۰۰۹ در ایتالیا روی داد، منجر به خسارات فراوان جانی و مالی در ناحیه ابروزو واقع در قسمت مرکزی این کشور شد. بزرگی این زلزله ۶/۳ و شدت آن به مقدار ۶ در مقیاس مرکالی تخمین زده شده است. صفحه گسل ایجادکننده زلزله 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 (جووانی و همکاران، ۱۹۹۶). جهت بررسی رکوردهای زلزله، پنج ایستگاه ثبت لرزه‌ای در اطراف گسل انتخاب شده اند که نام، موقعیت و مشخصات رکوردهای ثبت شده‌ی آنها در جدول ۱ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که جهت یافتن بیشینه مؤلفه افقی شتاب ثبت شده، مؤلفه‌های افقی ثبت شده در تمامی جهات با یکدیگر جمع شده اند و جهتی که در آن، مقدار شتاب به بیشینه مقدار خود رسیده است به عنوان جهت بیشینه انتخاب و مجموع شتاب در آن جهت، در محاسبات استفاده شده است.

۵-۱. چشمه لرزه‌زا

در این مقایسه، برای مدل سازی چشمه لرزه‌زا، از طیف چشمه مدل حائل‌های ویژه با توابع زمانی جدید استفاده شده است. طیف‌های یاد شده برای هر یک از ایستگاه‌ها به طور جداگانه محاسبه و مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که تابع چگالی احتمال اندازه دوایر گسیختگی در این مطالعه، به فرم فرکتالی با بعد فرکتالی ۲ و ۳ در نظر گرفته شده است.

۵-۲. اثر ساختگاه بر امواج لرزه‌ای

خواص فیزیکی و ساختار قرارگیری لایه‌های خاک نزدیک به سطح، تأثیر قابل توجهی بر روی خصوصیات

امواج لرزه‌ای دارند که از این آثار تحت عنوان اثرات ساختگاه یاد می‌شود. به عبارت ساده‌تر، به مجموع تغییراتی که لایه‌های خاک سطحی بر امواج می‌گذارند، اثرات ساختگاه گویند. شکل ۱۶ چگونگی تأثیر لایه‌های نزدیک سطح خاک بر روی امواج را نمایش می‌دهد. برای بیان اثرات ساختگاه از تابع انتقال استفاده می‌شود. این توابع بر دو نوع کلی تجربی و تئوری هستند: توابع انتقال تجربی به صورت تجربی از رکورد زلزله‌های موجود به دست می‌آیند، درحالی‌که توابع انتقال تئوری به کمک روابط ریاضی و بر اساس اطلاعاتی چون خصوصیات فیزیکی، تعداد و عمق لایه‌های خاکی به دست می‌آیند. به صورت ساده‌تر می‌توان گفت که توابع انتقال 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 زیر نشان داد:

$$H(f) = \frac{U_{\text{surface}}(f)}{U_{\text{bed rock}}(f)} \quad (44)$$

که در رابطه اخیر $U_{\text{surface}}(f)$ سری فوریه امواج دریافت شده بر روی سطح زمین، و $U_{\text{bed rock}}(f)$ نیز سری فوریه امواج رسیده به سنگ‌بستر می‌باشند. فرضیات معمولی که جهت محاسبه توابع انتقال تئوری در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از:

الف) محیط به صورت لایه‌های با ضخامت تقریباً ثابت در نظر گرفته می‌شود که بر روی نیم فضای غیر میرا، قرار گرفته‌اند.

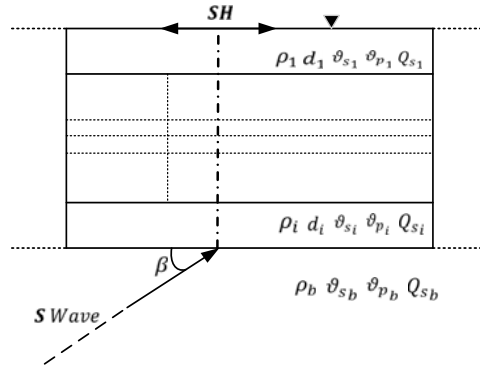
ب) جبهه امواج دریافتی به فرم صفحه‌ای در نظر گرفته می‌شود که با توجه به فاصله زیاد از چشمه، فرض مناسبی است.

پ) تنها مؤلفه‌های افقی عمود بر لایه‌ها (امواج SH) در مدل سازی در نظر گرفته می‌شوند.

در این مطالعه از توابع انتقال انتشار امواج خطی به همراه ماتریس هسکل (۱۹۵۳) و تامسون (۱۹۵۰) استفاده شده است.

جدول ۱. نام و موقعیت ایستگاه‌های ثبت لرزه‌ای انتخاب‌شده.

نام ایستگاه‌ها	موقعیت ایستگاه‌ها		ارتفاع (m)	فاصله (km)	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
Gran Sasso lab	42.46N	13.55E	1200	23	0.032	0.294



شکل ۱۶. اثرات ساختگاه بر امواج لرزه‌ای.

نمایانگر میرایی ناشی از رفتار غیر الاستیک مواد مسیر است که تابع فاصله و فرکانس f می‌باشد. میرایی‌های هندسی و غیر الاستیک به ترتیب در روابط زیر تعریف شده‌اند.

$$D_g(r) = (1/r)^n \quad (46)$$

$$D_{Q'}(f, r) = \exp\left(\frac{-\pi f r}{Q'(f) \cdot \beta}\right) \quad (47)$$

بر اساس مطالعه جوانی و همکاران (۱۹۹۶)، مقدار n در رابطه (۴۶) برابر یک می‌باشد همچنین در رابطه (۴۷)، مقدار میرایی ناشی از پراکندگی امواج، همچنین تبدیل انرژی جنبشی به گرما می‌باشد. در این مطالعه، مقدار $Q'(f)$ بر اساس مطالعه جوانی و همکاران (۱۹۹۶) به صورت رابطه (۴۸) که متناسب با منطقه لاکوتیلا در ایتالیا معرفی شده است، استفاده می‌شود.

$$Q'(f) = 78 f^{0.96} \quad (48)$$

در ادامه، شکل‌های ۱۷ تا ۲۱ نتایج این مقایسه را نمایش می‌دهند.

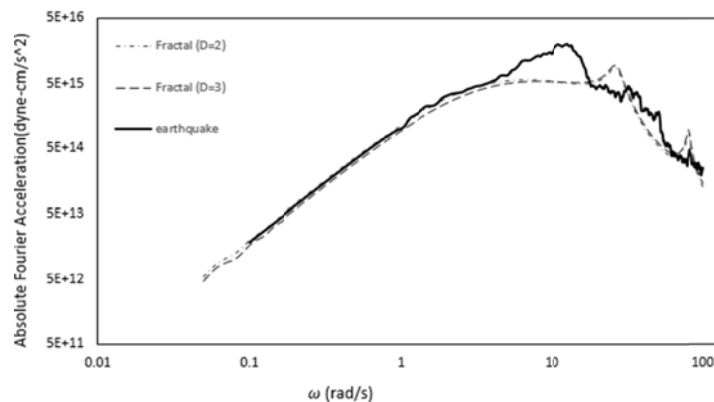
مقادیر d ، θ_s ، θ_p و Q_s نمایش داده شده در شکل ۱۶ به ترتیب مقادیر چگالی، ضخامت، سرعت امواج برشی، سرعت امواج فشاری و عامل کیفیت لایه‌های خاک می‌باشند. همچنین شماره n مربوط به شماره لایه خاکی مورد نظر و b مربوط به خصوصیات سنگ‌بستر می‌باشد.

۳-۵. اثر مسیر انتشار بر امواج لرزه‌ای

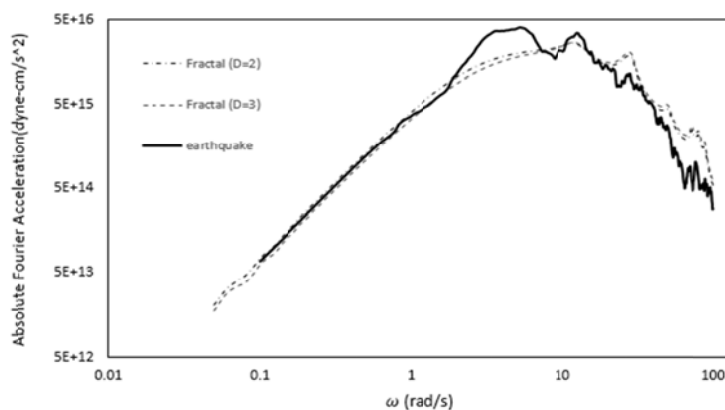
از تغییرات روی داده بر روی امواج گسیل شده از چشمه لرزه‌زا تا رسیدن به لایه‌های سطحی زمین، تحت عنوان اثرات مسیر بر روی امواج یاد می‌شود. از اثرات مسیر بر روی امواج گسیل شده می‌توان به اثرات میرایی ناشی از انتشار هندسی و همچنین اثرات ناشی از میرایی‌های غیر الاستیک اشاره نمود که معمولاً به صورت ترکیبی در نظر گرفته می‌شود. رابطه (۴۵) به طور خلاصه نحوه تأثیر میرایی‌های یاد شده بر امواج را نمایش می‌دهد.

$$P(r, f) = D_g(r) \times D_{Q'}(f, r) \quad (45)$$

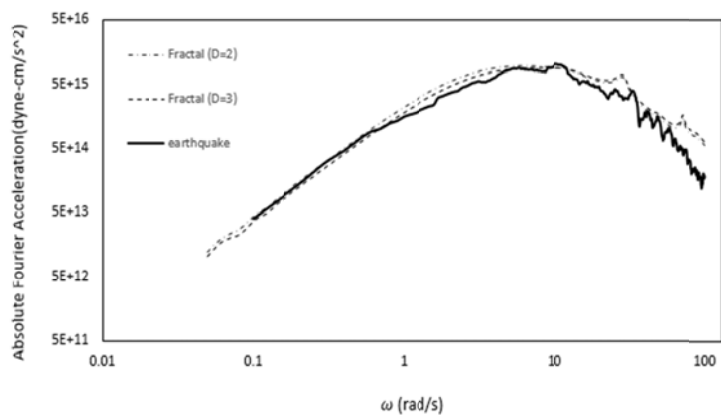
که در آن $D_g(r)$ نمایانگر میرایی هندسی (پخش هندسی) که تابع فاصله r است؛ همچنین $D_{Q'}(f, r)$



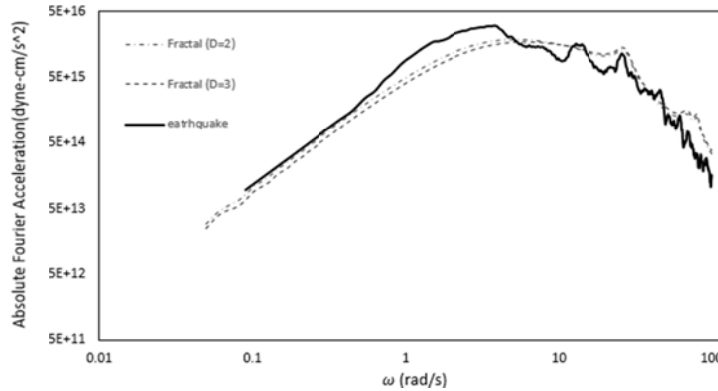
شکل ۱۷. مقایسه طیف دامنه فوریه شتاب زلزله لاکونیلا در ایتالیا با مقادیر حاصله از شبیه‌سازی گسل به کمک مدل حائل‌های ویژه. منحنی‌های خط مشکی مقدار طیف دامنه فوریه زلزله مذکور، منحنی نقطه-خط (-) طیف شتاب مدل حائل‌های ویژه با توزیع فرکتالی با بعد ۲ و منحنی خط‌چین (-) طیف شتاب مدل حائل‌های ویژه با توزیع فرکتالی با بعد ۳ در ایستگاه Antrodoco.



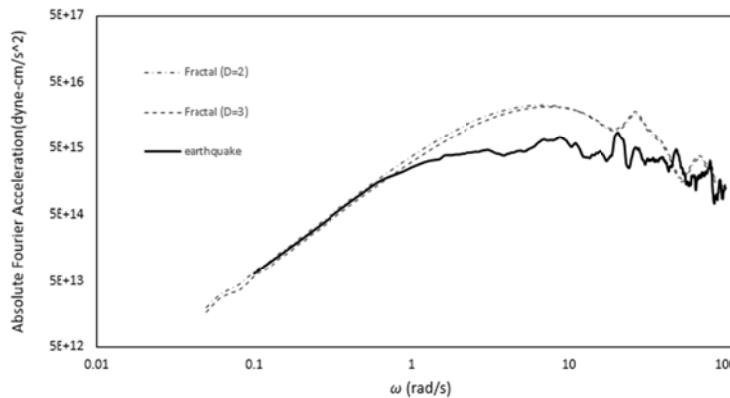
شکل ۱۸. مقایسه طیف دامنه فوریه شتاب زلزله لاکونیلا ایتالیا با مقادیر حاصله از شبیه‌سازی گسل به کمک مدل حائل‌های ویژه. منحنی‌های خط مشکی مقدار طیف دامنه فوریه زلزله مذکور، منحنی نقطه-خط (-) طیف شتاب مدل حائل‌های ویژه با توزیع فرکتالی با بعد ۲ و منحنی خط‌چین (-) طیف شتاب مدل حائل‌های ویژه با توزیع فرکتالی با بعد ۳ در ایستگاه Avezzano.



شکل ۱۹. مقایسه طیف دامنه فوریه شتاب زلزله لاکونیلا در ایتالیا با مقادیر حاصله از شبیه‌سازی گسل به کمک مدل حائل‌های ویژه. منحنی‌های خط مشکی مقدار طیف دامنه فوریه زلزله مذکور، منحنی نقطه-خط (-) طیف شتاب مدل حائل‌های ویژه با توزیع فرکتالی با بعد ۲ و منحنی خط‌چین (-) طیف شتاب مدل حائل‌های ویژه با توزیع فرکتالی با بعد ۳ در ایستگاه Carsoli.



شکل ۲۰. مقایسه طیف دامنه فوریه شتاب زلزله لاکونیلا در ایتالیا با مقادیر حاصله از شبیه‌سازی گسل به کمک مدل حائل‌های ویژه. منحنی‌های خط مشکی مقدار طیف دامنه فوریه زلزله مذکور، منحنی نقطه-خط (-) طیف شتاب مدل حائل‌های ویژه با توزیع فرکتالی با بعد ۲ و منحنی خط‌چین (-) طیف شتاب مدل حائل‌های ویژه با توزیع فرکتالی با بعد ۳ در ایستگاه Chieti.



شکل ۲۱. مقایسه طیف دامنه فوریه شتاب زلزله لاکونیلا در ایتالیا با مقادیر حاصله از شبیه‌سازی گسل به کمک مدل حائل‌های ویژه. منحنی‌های خط مشکی مقدار طیف دامنه فوریه زلزله مذکور، منحنی نقطه-خط (-) طیف شتاب مدل حائل‌های ویژه با توزیع فرکتالی با بعد ۲ و منحنی خط‌چین (-) طیف شتاب مدل حائل‌های ویژه با توزیع فرکتالی با بعد ۳ در ایستگاه Gran Sasso lab.

۶. نتیجه‌گیری

شدند. همان‌طور که ذکر شد، در مدل اولیه تابع چگالی احتمال زمان رسید امواج توزیعی یکنواخت دارد و این بدین معنی می‌باشد که محل ایستگاه دریافت‌کننده امواج روی سطح زمین، تأثیری بر روی نحوه رسیدن امواج به محل ایستگاه ندارد. برای برطرف ساختن این نقصان، در این مطالعه توابع جدید چگالی احتمال زمان رسید امواج بر اساس هندسه گسل و موقعیت نقاط ایستگاه‌ها بر روی زمین استخراج شده که استفاده از آنها تأثیر موقعیت ایستگاه‌های دریافت امواج را بر روی طیف به‌خوبی نمایان می‌سازد. همان‌گونه که ذکر شد افزایش فاصله ایستگاه از گسل تأثیر خود را با کاهش بیشتر فرکانس‌های بالایی تابع زمان نشان می‌دهد. همچنین مشاهده شد که با حرکت

مدل حائل‌های ویژه که از مهم‌ترین مدل‌های سینماتیکی شبیه‌سازی چشمه لرزه‌زا می‌باشد، رویداد زلزله را مجموع گسیختگی‌های دایروی شکلی در نظر می‌گیرد که بر روی گسل اتفاق می‌افتند. در مدل اولیه ارائه شده، اندازه دوایر گسیختگی کاملاً یکسان و هم‌اندازه در نظر گرفته شده است؛ همچنین تابع چگالی احتمال زمان رسید امواج به‌صورت یکسان در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، سعی شده است شیوه نوینی جهت تولید طیف چشمه لرزه‌زا برای گسل‌های فعال ارائه شود. برای دستیابی به این مهم، توابع چگالی احتمال زمان رسیدن امواج لرزه‌ای و به‌تبع آن، توابع زمانی دستخوش تغییرات عمده‌ای

زمان رسید مقادیر بیشتری از انرژی لرزه‌ای به خود می‌گیرند. این پدیده در توابع زمانی به صورت افزایش اثر کاهندگی در فرکانس‌های بالایی، در ایستگاه‌های هم-راستا با گسل مشاهده می‌شود. در انتها برای جهت بررسی کارآیی اصلاحات انجام گرفته بر روی مدل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با زلزله لاکوئیلای مقایسه شدند. همان‌طور که در نتایج دیده می‌شود اصلاحات انجام گرفته مدل را قادر می‌سازد تا شکل کلی طیف زلزله در هر ایستگاه را متناسب با موقعیت آن نسبت به گسل را با تقریب مناسبی تخمین بزند.

مراجع

- Aki, K., 1967, Scaling law of seismic spectrum. *Journal of Geophysical Research*, 72, 1217–1231.
- Aki, K. and Richards, P. G., 1980, *Quantitative Seismology: Theory and Methods*, Ellis, J., Ed., San Francisco: University Science Books.
- Cork, T. G., Kim, J. H., Mavroeidis, G. P., Kim, J. K., Halldorson, B. and Papageorgiou, A. S., 2016, Effects of tectonic regime and soil conditions on the pulse period of near-fault ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80, 102–118.
- Govoni, A., Bragato, P. L. and Bressan, G., 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.
- Halldorsson, B. and Papageorgiou, A. S., 2005, Calibration of the specific barrier model to earthquakes of different tectonic regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 1276–1300.
- Halldorsson, B. and Papageorgiou, A. S., 2012, Variations of the specific barrier model—part I: effect of subevent size distributions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10, 1299–1319.
- Haskell, N. A., 1953, The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 43, 17-34.
- Papageorgiou, A. S. and Aki, K., 1983a, A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. Part I. Description of the model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73, 693–722.
- Papageorgiou, A. S. and Aki, K., 1983b, 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, 953–978.
- 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, 509–529.
- Papageorgiou, A. S., 2003, The barrier model and strong ground motion. *Pure and Applied Geophysics*, 160, 603–634.
- Soghrat, M. R., Khaji, N. and Zafarani, H., 2012, Simulation of strong ground motion in northern Iran using the specific barrier model. *Geophysical Journal International*, 188, 645–679.
- Thomson, W. T., 1950, Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *Journal of applied Physics*, 21, 89-93.
- 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 Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 550–576.

ایستگاه از راستای موازی گسل به سمت راستای عمودی گسل، اثر کاهندگی در فرکانس‌های بالایی تابع زمان کاهش می‌یابد و این در حالی است که این تأثیر در طیف چشمه لرزه‌زا در ω کوچک‌تر از $9 \left(\frac{rad}{s}\right)$ مشاهده می‌شود، و به‌ازای ω بیش از آن، موقعیت ایستگاه تأثیر چندانی در طیف چشمه نخواهد داشت. از دلایل مهم تأثیر راستای قرارگیری ایستگاه نسبت به گسل، می‌توان به کاهش یا افزایش زمان رسید امواج لرزه‌ای اشاره نمود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در راستاهای عمود بر گسل، به دلیل اینکه زمان کلی رسیدن امواج به ایستگاه دریافت‌کننده در مقایسه با ایستگاه‌های قرارگرفته در راستای اصلی گسل، کوتاه‌تر می‌باشد؛ بنابراین توابع چگالی احتمال،

Modification of specific barrier model for faulting modeling by using of new time functions based on site position and fault geometry

Rezaei, M. H.¹ and Khaji, N.^{2*}

1. Ph.D. Student, Department of Earthquake Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Earthquake Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received: 23 April 2017, Accepted: 6 Feb 2018)

Summary

A reliable physical modeling of strong ground motion is required to examine the three crucial seismic parameters: seismic source specifications, wave propagation path and seismic site effects, which are all very important in seismic source simulation. Among various seismic source specifications, a more physically based realistic source model is the specific barrier model (SBM). The SBM is specifically more suitable for regions with poor seismological data bank and/or ground motions from large earthquakes with large recurrence intervals. In order to simulate seismic ground motions from a specific earthquake source model in an efficient way, the stochastic modeling method has been widely used. 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 wave is one of the main factors of earthquake damages, the application of stochastic approach of the SBM is focused for on the far-field shear wave spectrum, in which two corner frequencies of the 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 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 by the parameters of earthquakes of different tectonic regions.

The SBM may be considered as a general idealization of the faulting process of an earthquake. For example, a uniform probability density function (PDF) of 'arrival times' is assumed in the SBM. In this paper, the effects of various PDFs of arrival times on the far-field source spectrum of the SBM are studied. For this purpose, direct simulations of ground motion records for an earthquake source, which have fractally-distributed subevent sizes, is used. So, in this research, a new non-uniform more realistic PDF of arrival times for seismic waves corresponding to the fault's geometry is derived to reach desirable time functions. To this end, the appropriate PDF of arrival time is simply computed by making various zones on the fault, based on their distance from a given receiver on the ground surface. Therefore, a large number of points on the ground surface is chosen as receiver positions, for which the PDFs of arrival time are obtained. To divide the fault to various zones with the same distance from a given receiver, several spheres of the various radius are drawn, whose centers are located on the mentioned receivers. Consequently, a group of different curves is produced by the intersection of different spheres and the fault plane. All points in the region between the semi-parallel adjacent curves are considered to have the same distance from the receiver (the center of various spheres). This means that all points surrounded by two adjacent curves have equal chance to get to the receiver position. As a result, for creating the PDF of the arrival time of seismic waves, the chance of arriving seismic wave in specific time window should be determined, based on the above mentioned simple assumption. By changing distance parameter to time parameter, the PDF of the arrival time of seismic waves may be easily obtained. Afterwards, by using the proposed time functions, the effect of site position to the fault on source spectra, as well as the effect of distance of site to the fault on time functions, are investigated.

Keywords: Faulting, Kinematic models of earthquake, specific barrier model, source spectra, time function.