

بررسی انرژی کرنشی درونی سازه در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک

حسین جهان‌خواه (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مهدی بهزاد (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

محمدعلی قناد (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

در این تحقیق انرژی ورودی به سازه در اثر زلزله‌های نزدیک گسل مورد مطالعه قرار گرفته است. رکوردهای زلزله‌ی حوزه‌ی نزدیک مشخصاتی دارند که آنها را از سایر زلزله‌ها متمایز می‌سازد. از جمله‌ی این مشخصات می‌توان به پالس‌هایی با پیوند بلند اشاره کرد که بر روی رکورد زمینه با محتوای فرکانسی بالا سوار شده‌اند. ماهیت این پالس‌ها نسبت به ماهیت رکورد زمینه از قطعیت بیشتری برخوردار است و این نکته بررسی پاسخ سازه در دو مرحله‌ی قطعی و احتمالاتی، و سپس ترکیب آنها را با یکدیگر ممکن می‌سازد. این نگرش باعث می‌شود بخشی از پاسخ که تقریباً قطعی است در فرایندهای احتمالاتی وارد نشود و در نتیجه دقت جواب‌ها افزایش یابد. با توجه به رویکرد ذکر شده پاسخ سازه به زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک محاسبه و نتایج به‌صورت طیف انرژی درونی سازه ارائه شده است. نتایج ارائه شده حاکی از آن است که در نزدیکی گسل با افزایش بزرگی زلزله میزان انرژی کرنشی درونی سازه و نیز پیوند متناظر آن افزایش می‌یابد و نتایج این محدوده بیشتر تابع مشخصات پالس است و از رکورد زمینه کم‌تر تأثیر می‌پذیرد. از سوی دیگر، هرچه فاصله از گسل زیاد می‌شود سهم نسبی رکورد زمینه افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ی که در طیف پاسخ دو ناحیه‌ی پیشینه‌ی موضعی مشاهده می‌شود. نواحی پیشینه‌ی طیف پاسخ شامل یک ناحیه‌ی نزدیک به پیوند غالب رکورد زمینه و ناحیه‌ی دیگر در محل پیوند پالس است.

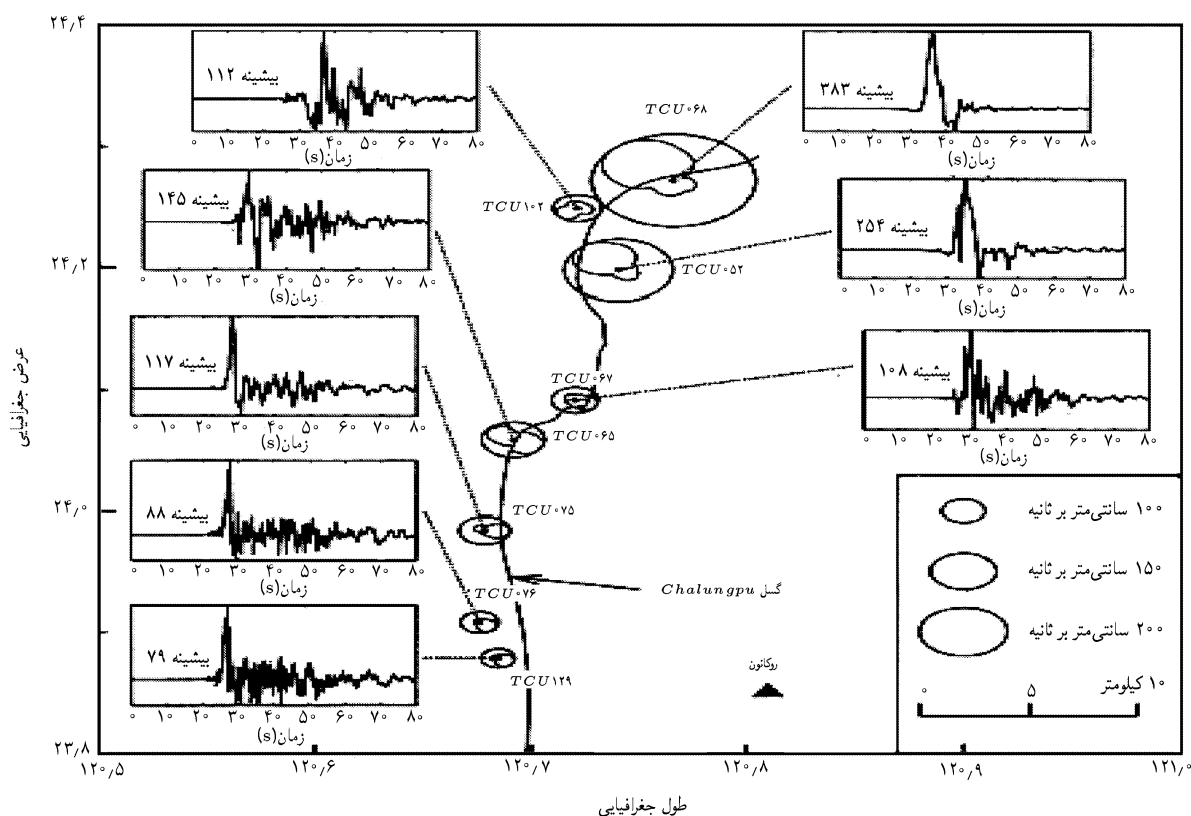
jahankhah@civil.sharif.edu
m.behzad@sharif.edu
ghannad@sharif.edu

واژگان کلیدی: زلزله، گسل، انرژی کرنشی، سازه.

مقدمه

آوردن پاسخ سازه در برابر چنین زلزله‌هایی می‌تواند مسئله را به دو بخش رکورد پالس و رکورد زمینه تفکیک کرد. اگرچه در هر دو بخش پارامترهای تصادفی وجود دارد، برای رکورد پالس با توجه به بزرگی زلزله مشخصات معینی ارائه شده است که براساس آن می‌توان با دقت مناسبی رکورد پالس را قطعی فرض کرد و پاسخ سازه را برای آن به دست آورد.^[۱] از طرفی رکورد زمینه ماهیتی تصادفی دارد و می‌توان پاسخ سازه در قبال آن را به‌صورت تصادفی مورد ارزیابی قرار داد. در نهایت می‌توان با جمع آثار حاصل از این دو رکورد نتیجه را به‌صورت پاسخ نهایی سازه به زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک مورد توجه قرار داد. حسن این روش آن است که در این فرایند دلیل عمده‌ی فاصله میان پاسخ حاصل و جواب واقعی تنها تصادفی بودن رکورد زمینه است و بخش عمده‌ی جواب که مربوط به پاسخ به رکورد پالس است تقریب کمی دارد. این در حالی است که چنانچه با کل رکورد، شامل رکوردهای زمینه و پالس، به‌صورت تصادفی برخورد شود تقریب زیادی وارد مسئله می‌شود. در ادامه به توضیح نحوه‌ی برخورد با هر یک از رکوردهای زمینه و پالس می‌پردازیم. پارامتر مورد بررسی در این تحقیق، به‌عنوان پاسخ سازه انرژی کرنشی درونی سازه است.

انرژی کرنشی درون سازه از جمله پارامترهایی است که به‌عنوان شاخص خرابی سازه‌ها در پژوهش‌های متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفته است.^[۱] در این تحقیق انرژی ورودی به سازه در اثر زلزله‌های نزدیک گسل مورد مطالعه قرار گرفته است. مشخصات زلزله‌های نزدیک گسل از نظر محتوای فرکانسی و دامنه با زلزله‌های حوزه‌ی دور متفاوت‌اند.^[۱، ۲] از مشخصه‌های این زمین‌لرزه‌ها آن است که در مؤلفه‌ی افقی آنها، که عمود بر امتداد گسل است، عموماً یک تا چهار پالس سرعت^[۳] با دامنه‌ی قابل توجه دیده می‌شود که بر روی یک رکورد زمینه سوار شده‌اند. در شکل ۱ نمونه‌ی از این رکوردها نشان داده شده است.^[۳] این پالس‌ها که در اغلب موارد ۲ عدد بوده و تشکیل یک چرخه کامل را می‌دهند در بر دارنده‌ی عمده‌ی انرژی رکورد هستند. نکته‌ی قابل توجه این که سازوکار تولید پالس و سازوکار تولید رکورد زمینه با هم متفاوت است و از نظر آماری نسبت به هم مستقل‌اند؛ زیرا پالس‌های سرعت در جهت انتشار گسل و به‌دلیل نزدیکی سرعت انتشار موج و سرعت ایجاد گسل ایجاد می‌شود؛ در حالی که رکورد زمینه پاسخ خاک به تحریک اعمال شده در سنگ بستر بوده و نمادی از اثر چشمه‌ی لرزه‌زا، مسیر انتشار موج و محتوای فرکانسی خاک محل با فرکانس‌های متفاوت و متعدد است. بنابراین برای به دست



شکل ۱. نمونه‌یی از رکوردهای مربوط به حوزه‌ی نزدیک از زلزله‌ی تایوان ۱۹۹۹. [۳]

پریود پالس

دومین پارامتر رکورد پالسی پریود پالس است. نکته‌ی قابل توجه آن است که برخلاف رکوردهای زلزله که عمدتاً محتوای فرکانسی بالا دارند (پریود غالب کم‌تر از ۲ ثانیه) پریود پالس‌های رکوردهای حوزه‌ی نزدیک تا ۵ ثانیه نیز مشاهده می‌شود. در مورد پریود پالس نیز رابطه‌ی ۳ و ۴ ارائه شده است. [۳]

$$\log(T_p) = -3.7^0 + 0.5M \quad (3)$$

$$\log(T_p) = -1.776 + 0.31M \quad (4)$$

که در آنها T_p پریود پالس برحسب ثانیه و M بزرگی زلزله برحسب امواج سطحی است.

تعداد پالس

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی تعداد پالس‌ها [۳] در اغلب زمین‌لرزه‌ها ۲ پالس مشاهده شده که در این تحقیق مبنای تحلیل قرار می‌گیرد. بنابراین رکورد پالسی مورد استفاده در این مطالعه شامل دو پالس یا یک چرخه‌ی کامل است. با توجه به توضیحات ارائه شده مشخصات رکورد پالسی سرعت و شتاب زلزله حوزه‌ی نزدیک با فرض $\omega_a = 2\pi/T_p$ عبارت است از:

$$P_{pulse, velocity} = \begin{cases} PHV \sin(2\pi t/T_p) & 0 < t < T_p \\ 0 & t > T_p \end{cases} \quad (5)$$

پاسخ به رکورد پالسی

برای به دست آوردن پاسخ به رکورد پالسی ابتدا پارامترهای مربوط به پالس‌های زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک که محققین مختلف ارائه کرده‌اند مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق عبارت‌اند از: دامنه‌ی پالس، پریود پالس و تعداد پالس‌ها که پس از معرفی آنها پاسخ سازه تحت رکورد مربوطه ارائه می‌شود.

دامنه‌ی پالس

اولین پارامتر مشخص‌کننده رکورد پالسی دامنه است. رابطه‌های ۱ و ۲ از معنود روابطی هستند که تاکنون در زمینه‌ی برآورد دامنه‌ی پالس در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک ارائه شده است. [۳]

$$\ln(PHV) = -2.31 + 1.15M - 0.5 \ln(r), \quad (cm/sec), \quad 3 < r < 10 km, \quad (1)$$

$$\ln(PHV) = -5.11 + 1.59M - 0.5 \ln(r), \quad (cm/sec), \quad 3 < r < 10 km, \quad (2)$$

در این روابط PHV سرعت بیشینه در پالس سرعت، M بزرگی زلزله برحسب امواج سطحی، و r فاصله از گسل برحسب کیلومتر است. برای فواصل کم‌تر از ۳ کیلومتر تا گسل مقدار دامنه‌ی پالس ثابت فرض می‌شود.

بدین ترتیب با توجه به پاسخ به دست آمده مربوط به رکورد پالسی می‌توان انرژی درونی سازه بر واحد جرم را چنین نوشت:

$$e_{pulse}/m = \rho/5(k/m)x_{pulse}^2 \quad (15)$$

که در آن e_{pulse}/m انرژی کرنشی درون سازه، بر واحد جرم ناشی از رکورد پالسی است. نمونه‌یی از پاسخ جابه‌جایی سازه به تحریک پالسی در شکل ۲ ارائه شده است.

پاسخ سازه به رکورد زمینه

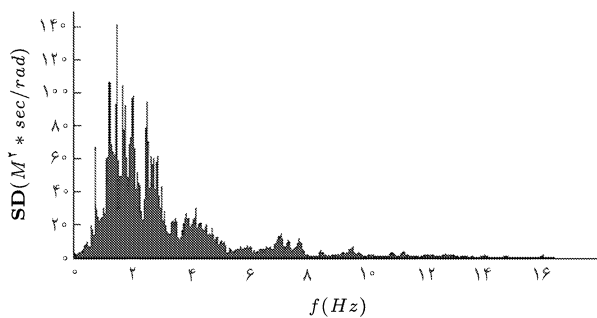
برای به دست آوردن این بخش از پاسخ ابتدا ۷ رکورد خاک سخت ثبت شده در هفت ایستگاه مربوط به زلزله‌های معروف آمریکای شمالی و تایوان انتخاب شده است که مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است. سپس چگالی طیفی هر یک از رکوردهای مذکور محاسبه و نسبت به مجذور بیشینه‌ی شتاب زمین نرمال شده است:

$$\left\{ \begin{array}{l} SD_1 \rightarrow \div (PGA_1)^2 \rightarrow SD_1^* \\ \vdots \\ SD_n \rightarrow \div (PGA_n)^2 \rightarrow SD_n^* \end{array} \right. \quad (16)$$

آنگاه با میانگین‌گیری روی طیف‌های SD_i^* طیف میانگین برای خاک‌های سخت حاصل شده است. در پایان، میانگین طیف‌های SD_i^* در ضریبی که معادل با مجذور میانگین بیشینه‌های شتاب رکوردهای مورد استفاده است ضرب شده است.

$$\overline{SD}_{avg} = Ave.(SD_1^*, \dots, SD_n^*) \times (PGA_{Ave.})^2 \quad (17)$$

بنابراین طیف اخیر را می‌توان به‌عنوان طیف SD_i میانگین برای رکوردهای خاک سخت در نظر گرفت (شکل ۳). از آنجا که طیف میانگین به دست آمده مربوط به رکوردهای زلزله‌ی نسبتاً قوی است برای تبدیل طیف مذکور به طیف متناظر رکورد زمینه ضریبی برابر ۰/۳ برای بیشینه شتاب زمین فرض می‌شود. این امر موجب می‌شود که طیف مذکور در ضریب ۰/۹ ضرب شود. توجه شود که این مقدار با توجه به رکورد سایت TCU068 از زلزله‌ی تایوان (شکل ۱) در نظر گرفته شده که در میان سایر سایت‌ها بیشترین اثر پالس سرعت و کم‌ترین اثر رکورد زمینه را نشان می‌دهد. بنابراین نتایج حاصل از این فرض را می‌توان به‌عنوان کران پایینی برای سهم رکورد زمینه از کل رکورد در انرژی کرنشی درونی سازه دانست. چنانچه مقادیر بیشتری برای نسبت بیشینه‌ی شتاب رکورد زمینه نسبت به رکورد اصلی مد نظر باشد



شکل ۳. طیف میانگین spectral density برای ۷ رکورد خاک سخت.

$$P_{pulse,acceleration} = \begin{cases} PHV\omega_a \cos(\omega_a t) & 0 < t < T_v \\ 0 & t > T_v \end{cases} \quad (6)$$

روابط سرعت و شتاب فوق برحسب سانتی‌متر بر ثانیه و سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است. با توجه به تحریک فوق می‌توان معادله‌ی حاکم بر سیستم را به‌صورت رابطه‌ی ۷ در نظر گرفت.

$$\ddot{x}_{pulse} + 2\xi\omega_a\dot{x}_{pulse} + \omega_a^2 x_{pulse} = -PHV\omega_a \cos(\omega_a t) \quad (7)$$

اکنون با در نظر گرفتن جواب عمومی به‌صورت:

$$x_c = (A \cos(\omega_D t) + B \sin(\omega_D t))e^{-\xi\omega_a t} \quad (8)$$

و جواب خصوصی به‌صورت:

$$x_p = (G_1 \cos(\omega_D t) + G_2 \sin(\omega_D t)) \quad (9)$$

و نیز با این فرضیات که:

$$\beta = \omega_a/\omega_D, \omega_D = \omega_a\sqrt{1-\xi^2}, \omega_a = 2\pi/T_v, \xi = 0.05$$

می‌توان پاسخ سازه را در دو بخش عمومی و خصوصی، و در نهایت پاسخ کلی به‌صورت رابطه‌ی ۱۰ محاسبه کرد:

$$\begin{aligned} -G_1\omega_a^2 + 2\xi\omega_a\omega_D G_2 + \omega_a^2 G_1 &= P\omega_a \\ -G_2\omega_a^2 + 2\xi\omega_a\omega_D G_1 + \omega_a^2 G_2 &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$G_1(1-\beta^2) + G_2(2\xi\beta) = -P\beta/\omega_a$$

$$G_2(1-\beta^2) - G_1(2\xi\beta) = 0$$

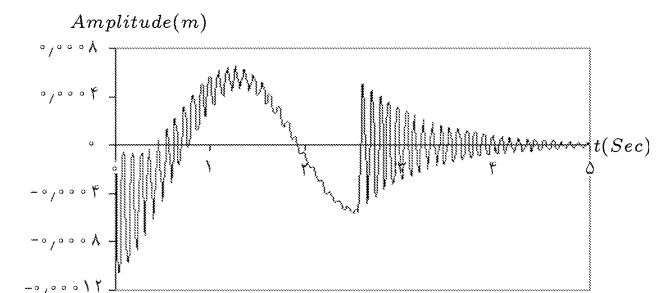
$$\begin{cases} G_1 = \frac{-P\beta/\omega_a(1-\beta^2)}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} & \gamma = \frac{-P\beta/\omega_a}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \\ G_2 = \frac{-P\beta/\omega_a(2\xi\beta)}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} & P = PHV \end{cases} \quad (11)$$

$$x_p = \gamma((1-\beta^2)\cos(\omega_a t) + 2\xi\beta\sin(\omega_a t)) \quad (12)$$

$$x_{pulse}(0) = \dot{x}_{pulse}(0) = 0$$

$$\rightarrow \begin{cases} A = -\gamma(1-\beta^2) \\ B = (\xi\omega_a A - 2\gamma\xi\beta\omega_a)/\omega_D \end{cases} \quad (13)$$

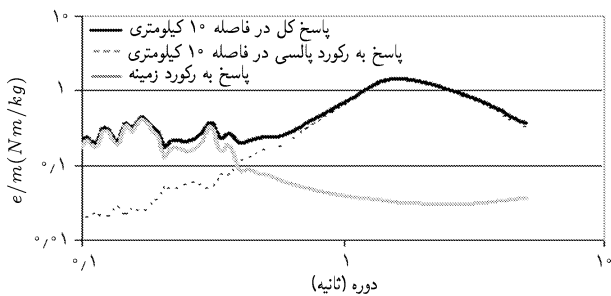
$$x_{pulse} = x_c + x_p \quad (14)$$



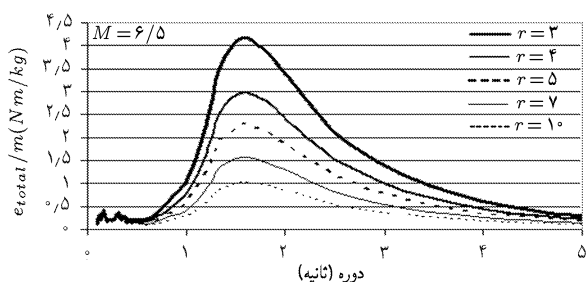
شکل ۴. نمونه‌یی از پاسخ سازه به رکورد پالسی که در آن پریود سازه تقریباً ۰/۸ ثانیه بوده است.

جدول ۱. مشخصات رکورد‌های مورد استفاده در فرایند آماری. [۱۲، ۱۳]

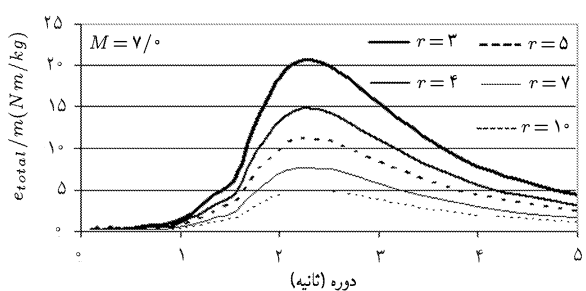
نام سایت	نوع خاک	تاریخ رخداد زلزله	فاصله تا گسل (km)	بزرگا	شتاب (g)
San Francisco-Golden Gate Park [۲۱]	Siliceous Sandstone	San Francisco, March 22, 1975	۱۱	۵٫۳ (M _L)	۰٫۰۹
San Francisco-Golden Gate Park [۲۱]	Siliceous Sandstone	San Francisco, March 22, 1975	۱۱	۵٫۳ (M _L)	۰٫۱۱
CHY035 [۲]	Soft Rock	CHICHI۱۹۹۹	۷	۷٫۲ (M _θ)	۰٫۲۵
CHY041 [۲]	Soft Rock	CHICHI۱۹۹۹	۱۵	۷٫۲ (M _θ)	۰٫۶۴
CHY086 [۲]	Soft Rock	CHICHI۱۹۹۹	۲۰	۷٫۲ (M _θ)	۰٫۲
Big Bear Lake, CA-Fire Station [۲۱]	Stiff Soil	Big Bear City 2003	۸	۵٫۴ (M _L)	۰٫۱۳
Big Bear Lake, CA-Fire Station [۲۱]	Stiff Soil	Big Bear City 2003	۸	۵٫۴ (M _L)	۰٫۲۵



شکل ۴. مقایسه طیف‌های پاسخ انرژی درونی سازه به رکورد زمینه، رکورد پالسی و رکورد مجموع برای فاصله ۱۰ کیلومتر از گسل و $M = ۶٫۵$.



شکل ۵. طیف پاسخ انرژی درونی سازه به صورت ترکیبی از پاسخ به پالس و پاسخ به رکورد زمینه برای $M = ۶٫۵$ و فواصل متفاوت از گسل برحسب کیلومتر.



شکل ۶. طیف پاسخ انرژی درونی سازه به صورت ترکیبی از پاسخ به پالس و پاسخ به رکورد زمینه برای $M = ۷٫۰$ و فواصل متفاوت از گسل برحسب کیلومتر.

در شکل ۴ طیف پاسخ انرژی درونی سازه به رکورد زمینه، رکورد پالسی و رکورد مجموع برای فاصله ۱۰ کیلومتر از گسل و $M = ۶٫۵$ ترسیم شده است. چنان که دیده می‌شود پاسخ به رکورد مجموع در پیوندهای کوتاه با رکورد زمینه و در پیوندهای بلند با رکورد پالسی کنترل می‌شود. در شکل ۵ طیف پاسخ انرژی درونی

به جای $۰٫۰۹$ باید مجذور ضریب مد نظر در طیف ضرب شود. بنابراین داریم:

$$SD_{\omega_{ground}} = \overline{SD}_{\omega_{ground}} \times (0.3^2) \quad (۱۸)$$

در روابط فوق $SD_{\omega_{ground}}$, $\overline{SD}_{\omega_{ground}}$, SD_{ω}^* , SD_{ω} به ترتیب عبارتند از: چگالی طیفی هریک از رکورد‌های مورد استفاده، چگالی طیفی به‌هم‌جار، متوسط چگالی طیفی و چگالی طیفی رکورد زمینه.

در این روابط PGA شتاب بیشینه زمین در رکورد زمینه است. حال با توجه به طیف $SD_{\omega_{ground}}$ به دست آمده می‌توان متوسط انرژی کرنشی درونی سازه را برای رکورد زمینه چنین به دست آورد:

$$SD = |H|^{\nu} SD_{\omega_{ground}} \quad H = \sqrt{((\omega_n^* - \omega)^2 + 2\xi\omega_n^*\omega)} \quad (۱۹)$$

$$E(x_n^{\nu}) = \int_{-\infty}^{\infty} SD d\omega \quad (۲۰)$$

$$E(e_n/m) = E(0.15(k/m)x_n^{\nu}) = 0.15(k/m)E(x_n^{\nu}) = 0.15\omega_n^{\nu}E(x_n^{\nu}) \quad (۲۱)$$

در این روابط H , SD , x_n , E به ترتیب عبارتند از: تابع پاسخ سازه، چگالی طیفی پاسخ سازه، پاسخ سازه به رکورد زمینه، و امید ریاضی.

ترکیب پاسخ‌ها

با توجه به پاسخ‌های به دست آمده تحت رکورد پالسی و رکورد زمینه، اکنون می‌توان پاسخ سازه در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک را تخمین زد. محاسبات مربوط به پاسخ کلی چنین است:

$$E(e_{total}/m) = E(0.15k(x_{pulse} + x_n)^{\nu}/m) = e_{pulse}/m + E(e_n/m) + kx_{pulse}E(x_n)/m, E(x_n) = 0 \quad (۲۲)$$

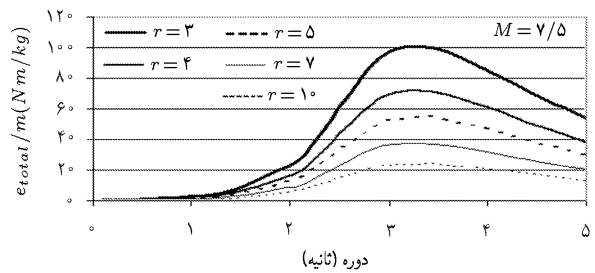
$$E(e_{total}/m) = 0.15\omega_n^{\nu}(x_{pulse}^{\nu} + E(x_n^{\nu})) \quad (۲۳)$$

با توجه به پاسخ نهایی به دست آمده، در ادامه نتایج به صورت طیف ارائه شده‌اند. بدین ترتیب که برای هر پیوند سازه در طول زمان پاسخ بیشینه انرژی درونی را که سازه تجربه می‌کند در نظر گرفته، و نموداری بر اساس پیوند سازه و بیشینه انرژی کرنشی درونی سازه رسم می‌شود. نتایج برای مقادیر $۷٫۰$ ، $۶٫۵$ ، ۷ ، $۶٫۵$ M ریشتر و ۳ ، ۴ ، ۵ ، ۷ ، ۱۰ کیلومتر ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

در تحلیل رکوردهای تصادفی مناسب‌ترین رویکرد آن است که تا حد ممکن رکورد پاسخ‌های قطعی و احتمالاتی به تفکیک به دست آیند و سپس با یکدیگر ترکیب شوند تا نتایج دقت بالاتری داشته باشند. در این تحقیق با توجه به این که رکوردهای زلزله‌ای حوزه‌ی نزدیک را می‌توان با تقریب مناسب به دو بخش رکورد پالسی قطعی و رکورد زمینه‌ی احتمالاتی تفکیک کرده پاسخ هر بخش جداگانه محاسبه شده و در ادامه با یکدیگر ترکیب شده است. نتایج حاکی از آن است که در نزدیکی گسل با افزایش بزرگی زلزله میزان انرژی کرنشی درونی سازه و نیز پیوند متناظر آن افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر سازه‌های دارای پیوند بلند که در مجاورت گسل‌اند در معرض خطرات جدی قرار دارند. هرچه فاصله از گسل زیاد می‌شود سهم رکورد زمینه افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ی که در فاصله‌ی ۱۰ کیلومتری از گسل با بزرگی ۶٫۵ ریشتر و برای سازه‌های با پیوند کوتاه، عمده انرژی درونی درونی سازه بیشتر از رکورد زمینه تأثیر می‌پذیرد تا رکورد پالسی.

لازم به ذکر است که برای پیوندهای نزدیک به پیوند پالس انرژی درونی سازه بیشتر متأثر از پالس است. به طور کلی می‌توان پیشنهاد کرد برای بزرگی بیش از ۷ ریشتر در مقیاس سطحی، پاسخ رکورد پالسی در برآورد انرژی درونی سازه کفایت می‌کند، ولی برای بزرگی حد فاصل ۶ و ۷ ریشتر در مقیاس سطحی و فواصل بیش از ۵ کیلومتر برای پیوندهای نزدیک پیوند پالس پاسخ پالس کافی است و برای سایر نواحی ترکیب پاسخ‌های رکورد پالسی و رکورد زمینه باید در نظر گرفته شود.



شکل ۷. طیف پاسخ انرژی درونی سازه به صورت ترکیبی از پاسخ به پالس و پاسخ به رکورد زمینه برای $M = 7/5$ و فواصل متفاوت از گسل برحسب کیلومتر.

سازه به صورت ترکیبی از پاسخ به پالس و پاسخ به رکورد زمینه برای $M = 6/5$ ریشتر و برای فواصل متفاوت از گسل، در برابر پیوند سازه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از گسل آثار رکورد پالسی کاهش می‌یابد و تأثیر رکورد زمینه با توجه به فرض دامنه‌ی ثابت برای آن بی‌تغییر باقی می‌ماند. لازم به ذکر است در صورتی که برای رکورد زمینه نیز دامنه‌ی متغیری فرض شود میزان انرژی آن تغییر خواهد کرد. در اشکال ۶ و ۷ طیف‌هایی مشابه شکل ۵ برای بزرگی‌های ۷ و ۷٫۵ ریشتر نشان داده شده است. مطابق این اشکال، با افزایش بزرگی زلزله میزان انرژی درونی رکورد پالسی با نرخ قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌یابد تا آنجا که عملاً اثر رکورد زمینه قابل اغماض خواهد بود. این نتایج نیز به فرض ثابت بودن دامنه‌ی رکورد زمینه بستگی دارند.

منابع

- Uang, C.M.; Bertero, V.V. "Evaluation of seismic energy in structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **19**, pp. 77-90 (1990).
- Huan, C.T.; Chen, S.S. "Near-field characteristics and engineering implications of the 1999 Chi-Chi earthquake", *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, **2**(1), pp. 23-41(2000).
- Stewart, J.P.; et.al, "Ground motion evaluation procedures for performance-based design" Pacific Earthquake Engineering Center (PEER), Report No. 09, (Sep. 2001).
- Somerville, P.G. "Development of an improved representation of near fault ground motions", *Proceeding of the SMIP98 Seminar on Utilization of Strong Motion Data*, Oakland, September 15, pp. 1-20 (1998).
- Somerville, P.G. "Characterization of near fault ground motions", U.S-Japan workshop on the effect of near-fault earthquake shaking, PEER200/2 (2000).
- Alavi, B.; Krawinkler, H. "Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design", *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper 2665 (2000).
- Agrawal, A.K.; He W.L. "A closed-form approximation of near-fault ground motion pulses for flexible structures", 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University Press, New York (2002).
- Mavroeidis, G.P., Papageorgiou, S.A. "A mathematical representation of near-fault ground motions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(3), PP. 1099-1131 (2003).
- Bray, D.J.; Rodriguez-Marek, A. "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, pp. 815-828 (2004).
- Mavroeidis, G.P.; Papageorgiou, S.A. "Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **33**, pp. 1023-1049 (2004).
- Xin-le, L.; Xi, Z. "Study on equivalent velocity pulse of near-fault ground motions", *ACTA Seismologica Sinica*, **17**(6), pp. 697-706 (2004).
- Miranda E. "Site-dependent strength-reduction factors", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, **12**(119), pp. 3503-3519 (1993).
- <http://peer.berkeley.edu/nga/>
- Ghahari, F.; Jahankhah, H.; Ghannad, M.A. "The effect of background records on response of structures subjected to near-fault ground motions", *Proceedings of the 13th European Conference on Earthquake Engineering* (2006).