

مدل سازی پالس غالب رکوردهای نزدیک گسل ایران طی زلزله های طبس (۱۹۷۸) و بم (۲۰۰۳)

سیدروح الله حسینی واعظ (استادیار)

دانشکده ی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم

غلامرضا قدرتی امیری* (استاد)

دانشکده ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

محمد کاظم شربتدار (دانشیار)

حسین نادرپور (استادیار)

علی خیرالدین (استاد)

دانشکده ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، (پیاو ۱۳۹۳)
دوره ۲-۳، شماره ۱/۲، ص ۱۰۷-۱۱۶، (پاداشت فنی)

حرکات نزدیک گسل، شدیداً متأثر از مکانیزم گسل، راستای گسترش پاره شدگی نسبت به محل سازه، و تغییر شکل های ماندگار زمین به علت لغزش است. این پارامترها منجر به اثراتی همانند اثر راستاپذیری و اثر پرتابی (تغییر مکان دائم) می شود. در تخمین حرکات زمین در حوزه ی نزدیک به گسل فعال، باید به این مشخصه های حرکات زمین در نزدیک گسل توجه شود. در این نوشتار، جهت مدل سازی پالس غالب رکوردهای نزدیک گسل ایران طی زلزله های طبس (۱۹۷۸) و بم (۲۰۰۳) از مدل ریاضیاتی جدیدی استفاده شده است. مدل ارائه شده با کیفیت قابل قبولی بخش دوره ی تناوب بالای رکوردهای نزدیک گسل را مدل سازی می کند. پالس های مدل شده ی مؤلفه های حرکتی زلزله ی بم و طیف های پاسخ کشسان آن با رکورد واقعی مطابقت بسیار نزدیکی دارند. طیف پاسخ کشسان پالس تولید شده و رکورد واقعی نزدیک گسل زلزله ی طبس فقط در محدوده ی زمان تناوب بالا مطابقت دارد.

hoseinivaez@qom.ac.ir
ghodrati@iust.ac.ir
msharbatdar@semnan.ac.ir
naderpour@semnan.ac.ir
kheyroddin@semnan.ac.ir

واژگان کلیدی: نزدیک گسل، پالس غالب، طیف پاسخ کشسان، زمین لرزه.

۱. مقدمه

گرفت. برخلاف تلاش های اولیه، تا قبل از زلزله های نورتریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) پدیده های نزدیک گسل در میان پژوهشگران چندان مورد توجه قرار نگرفت. خسارات مهیب ایجاد شده به وسیله ی این زمین لرزه ها در مناطق پرجمعیت شهری باعث افزایش توجه مهندسان و پژوهشگران به پدیده های نزدیک گسل شد. بعد از اثرات مخرب زلزله ی نورتریج کالیفرنیا (۱۹۹۴)، توجه گسترده یی به شبیه سازی حرکات نزدیک گسل و مطالعه ی پاسخ سازه یی به حرکت پالس گونه شد. بسیاری از مهندسان و پژوهشگران شکل های موجی ساده شده ی مختلفی را برای بیان پالس های حرکت زمین که در مناطق حوزه ی نزدیک مشاهده شده بود، استفاده کرده اند.^[۱-۸] مدلی که در سال ۲۰۰۳ پیشنهاد شد،^[۸] یک مدل ساده است که تا حدی قادر به نمایش ویژگی های طیف پاسخ رکوردهای واقعی نزدیک گسل است. این مدل، یک مدل ساده شده از موجک^۷ Gabor است، به نحوی که پوش گوسی^۸ (پوش نرمال)^۸ موجک Gabor با یک تابع کسینوسی تعویض شده است و زمانی که با یک موج هارمونیک ترکیب می شود، پالس مورد نیاز را تولید می کند. در سال ۲۰۰۷، نیز در پژوهشی دیگر مدلی مشابه با استفاده از موجک Gabor ارائه شد.^[۹] برای تولید پالس حرکات نزدیک گسل مدل های دیگری نیز ارائه شده است که یا به صورت شکل های

رویدادهای لرزه یی اخیر نظیر زلزله های نورتریج^۱ کالیفرنیا (۱۹۹۴)، کوبه ی^۲ ژاپن (۱۹۹۵)، ازمیت^۳ ترکیه (۱۹۹۹) و بم^۴ ایران (۲۰۰۳)؛ اثرات مخربی بر تأسیسات زیربنایی شهرها داشته است. در همه ی زلزله های یاد شده، گسل مسبب، دقیقاً در مجاورت مراکز پر جمعیت شهری واقع شده بود. با توجه به این واقعیت که بسیاری از شهرها و کلان شهرها در حوالی گسل های فعال واقع شده اند، رسیدگی به این موضوع دارای اهمیت بالایی است.

زلزله های پارکفیلد^۵ (۱۹۶۶) و سن فرناندو^۶ کالیفرنیا (۱۹۷۱)، به عنوان دو رویداد لرزه یی برجسته در زمینه حرکات لرزه یی حوزه ی نزدیک شناخته شده اند. تحلیل های کمی مدرن از حرکات نیرومند زمین با استفاده از رکورد ایستگاه شماره ی ۲ زلزله ی پارکفیلد که در فاصله ی ۸۰ متری از شکست گسل ثبت شد و شامل پالس های نیرومند سرعت و تغییر مکان با زمان تناوب نسبتاً طولانی است، شروع شد. پس از زلزله ی سن فرناندو (۱۹۷۱)، برای اولین بار اثرات مخرب این زلزله های نزدیک گسل در سازه های انعطاف پذیر در مجاورت گسل مسبب مورد بررسی قرار

* نویسنده مسئول

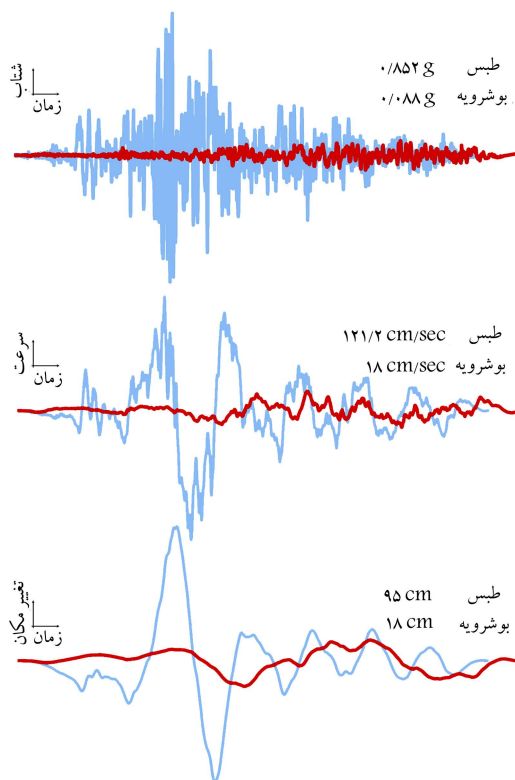
تاریخ: دریافت ۱۹/۱۳۹۱، اصلاحیه ۲۵/۴/۱۳۹۱، پذیرش ۱۶/۵/۱۳۹۱.

موجی ساده شده و یا با استفاده از موجک‌های متداول پالس موردنظر تولید شده است. [۱۶-۱۰]

در این نوشتار، جهت مدل‌سازی پالس غالب رکوردهای نزدیک گسل ایران طی زلزله‌های طیس (۱۹۷۸) و بم (۲۰۰۳) از مدل ریاضیاتی جدیدی، که نویسندگان این نوشتار ارائه کرده‌اند، استفاده شده است؛ که قابلیت تولید بخشی از رکورد با زمان تناوب بالا (پالس) را داراست. این مدل در عین سادگی می‌تواند این بخش از رکورد واقعی نزدیک گسل را با دقت بسیار بالایی مدل‌سازی کند.

۲. خصوصیات حرکات نزدیک گسل

با افزایش اطلاعات رکوردهای ثبت شده طی دهه‌های گذشته مشخص شده است که حرکات زمین در مجاورت گسل‌های فعال تا فاصله‌ی ۱۵ کیلومتری از گسل می‌توانند به طور قابل توجهی با حرکاتی که دورتر از گسل ثبت می‌شوند، تفاوت داشته باشند. این حرکات می‌توانند شامل پالس‌های بزرگ سرعت و تغییرمکان باشند که پتانسیل تخریب‌سازیهی قابل توجهی دارند. در شکل ۱، مؤلفه‌های عمود بر گسل تاریخچه‌ی زمانی شتاب، سرعت و تغییرمکان ثبت شده در دو ایستگاه طیس و بوشرویه به ترتیب با نزدیک‌ترین فاصله تا گسل ۲/۰۵ و ۲۸/۷۹ کیلومتر طی زلزله‌ی طیس (۱۹۷۸) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، یک پالس نیرومند با زمان تناوب طولانی در رکورد تاریخچه‌ی زمانی سرعت ایستگاه طیس وجود دارد که این رکورد را از رکورد ثبت شده در ایستگاه بوشرویه متمایز می‌کند. همچنین



شکل ۱. مقایسه‌ی مؤلفه‌های عمود بر گسل ثبت شده در دو ایستگاه طیس و بوشرویه به ترتیب با نزدیک‌ترین فاصله تا گسل به میزان ۲/۰۵ و ۲۸/۷۹ کیلومتر طی زمین‌لرزه‌ی طیس (۱۹۷۸).

توجه به این شکل، تفاوت چشم‌گیری در بیشینه‌ی شتاب، سرعت، و تغییرمکان این رکوردها نیز مشاهده می‌شود.

حرکات نزدیک گسل توسط یک پالس نیرومند با زمان تناوب طولانی در رکورد تاریخچه‌ی زمانی سرعت مشخص می‌شوند. با اینکه چنین پالس‌هایی، گونه‌ی از ویژگی‌های حرکات نزدیک گسل هستند، ولی یک مشخصه‌ی عمومی نزدیک گسل نیستند. [۱۷] حتی تاکنون، این حرکات همیشه با یک اثر یکسان ایجاد نشده‌اند. در ادامه، برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های حرکات نزدیک گسل مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱.۲. اثر راستاپذیری^۹

با توجه به موقعیت سایت نسبت به گسل و راستای انتشار پاره‌شدگی در امتداد گسل، سه نوع مختلف از اثرات راستاپذیری را می‌توان مشاهده کرد، که در ادامه هر کدام از آن‌ها توضیح داده شده است.

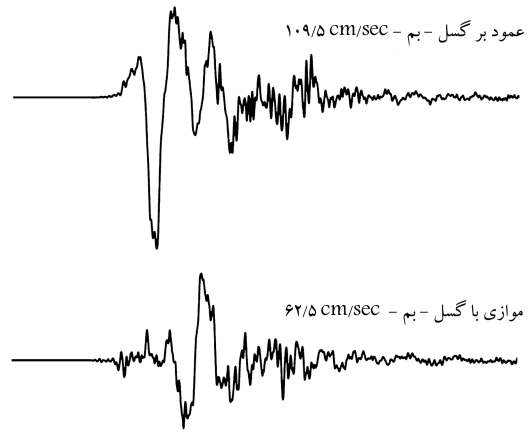
۱.۱.۲. راستاپذیری پیش‌رونده^{۱۰}

زلزله یک جابجایی برشی است که از یک نقطه روی گسل شروع می‌شود و با سرعتی تقریباً برابر با سرعت موج برشی گسترش می‌یابد. وقتی این قبیل پاره‌شدگی از کانون عمقی انتشار پیدا می‌کند، با انباشته شدن موج‌های برشی که به سمت جلویی پاره‌شدگی حرکت می‌کنند، یک پیشانی موج برشی^{۱۱} شکل می‌گیرد. اگر سایت در یک انتهای گسل واقع شده باشد و پاره‌شدگی در انتهای دیگر گسل شروع شود و به سمت سایت حرکت کند، ورود پیشانی موج به صورت یک پالس بزرگ در شروع رکورد دیده می‌شود. این پدیده وقتی مشخص تر می‌شود که راستای لغزش روی صفحه‌ی گسل هم به سمت سایت باشد. [۱۸] هرچه زاویه‌ی بین راستای انتشار پاره‌شدگی و راستای امواجی که از گسل به سمت سایت حرکت می‌کنند کمتر باشد، اثر راستاپذیری پیش‌رونده بیشتر می‌شود. به‌طور کلی اثر راستاپذیری در مناطقی که پاره‌شدگی به موازات بردار لغزش انتشار می‌یابد، بیشینه می‌شود. اگر لغزش در یک انتهای گسل جایی که سایت قرار گرفته است، متمرکز شود؛ حتی اگر این شرایط هندسی ارضاء شود، راستاپذیری پیش‌رونده وجود ندارد. برخلاف گسل‌های راستا لغز^{۱۲} که از پدیده‌ی راستاپذیری پیش‌رونده توقع می‌رود، دور از کانون عمقی متمرکز می‌شوند؛ در مورد گسل‌های شیب لغز^{۱۳}، این اثرات بیشتر در بالای شیب نسبت به کانون عمقی متمرکز می‌شوند.

الگوی تشعشی جابجایی برشی (گسلش) روی صفحه‌ی گسل باعث می‌شود که پالس شدید در راستایی که عمود بر صفحه گسل است، متمایل شود و به همین دلیل بیشینه‌ی سرعت حرکت عمود بر گسل بسیار بزرگ‌تر از مؤلفه‌ی موازی با گسل است. شکل ۲، تفاوت‌های موجود در رکورد سرعت مؤلفه‌های عمود بر گسل و موازی با گسل، که طی زلزله‌ی بم (۲۰۰۳) در ایستگاه BAM ثبت شده است، را نشان می‌دهد. اختلاف قابل توجهی بین بیشینه‌ی سرعت زمین در هر دو مؤلفه وجود دارد و بیشینه‌ی سرعت زمین در مؤلفه‌ی عمود بر گسل بیشتر است.

در مورد گسل‌های راستا لغز، معمولاً مؤلفه‌ی عمود بر گسل^{۱۴} با مؤلفه عمود بر راستای گسل^{۱۵} یکی هستند. در مورد گسل‌های شیب لغز با زاویه‌ی شیب زیاد، مؤلفه‌ی عمود بر گسل هم می‌تواند با مؤلفه‌ی عمود بر راستای گسل بیان شود. وقتی زاویه‌ی شیب کم است، مؤلفه‌ی عمود بر گسل ممکن است به صورت مناسبی به وسیله‌ی مؤلفه‌ی قائم حرکت زمین بیان شود. در برخی موارد، پالس راستاپذیری شدید

باشند، می توان اثرهای: فرادایره‌یی،^{۱۹} موج SP،^{۲۰} گسل سطحی یا در عمق^{۲۱} و نوع گسیختگی^{۲۲} را نیز نام برد.



شکل ۲. اختلاف در رکورد سرعت مؤلفه‌های عمود و موازی با گسل ایستگاه BAM طی زلزله‌ی بم (۲۰۰۳).

۳. مدل سازی پالس غالب رکوردهای نزدیک گسل

حرکات نزدیک گسل مصنوعی معمولاً از طریق ترکیب یک پالس سرعت وابسته^{۲۳} با زمان تناوب بالا و موج لرزه‌یی مستقل^{۲۴} بسامد بالا شبیه‌سازی می‌شوند. از این رو مدل سازی پالس غالب رکوردهای واقعی نزدیک گسل، از این لحاظ که در ترکیب با این مؤلفه‌ی مستقل می‌تواند بیانگر رکورد واقعی باشد، اهمیت زیادی دارد.

نویسندگان این نوشتار، برای تولید بخشی از رکورد، که دارای زمان تناوب بالاست (پالس)، مدلی پیشنهاد داده‌اند که در عین سادگی می‌تواند این بخش از رکورد واقعی نزدیک گسل را با دقت مناسبی مدل‌سازی کند. در مدل پیشنهادشده‌ی تابع پوش نرمال موجک Gabor (رابطه‌ی ۱)،^[۲۲] با یک تابع درجه‌ی ۲ جایگزین شده است. جایگزینی تابع پوش برای مدل‌کردن پالس سرعت حرکات نزدیک گسل و رسیدن به مؤلفه‌های دیگر (شتاب و سرعت)، از آن جهت انجام گرفته است که وجود تابع توانی در موجک Gabor (پوش نرمال) باعث می‌شود جواب انتگرال دارای فرم بسته‌یی نباشد. تابع پوش چند جمله‌یی درجه‌ی دوم به نحوی با تابع پوش نرمال موجک Gabor تطابق داده شده است که این دو پوش تا حدود ۹۰٪ بر هم منطبق می‌شوند. مدل پیشنهادشده به وسیله‌ی دامنه، بسامد، تعداد سیکل‌ها و فاز پالس پارامتر بندی شده است. این مدل با استفاده از رابطه‌ی ۲ بیان شده است:

$$f(t) = A \times e^{-\left(\frac{\gamma f_p}{\gamma}\right)^2 t^2} \times \cos(2\pi f_p t + \nu) \quad (1)$$

$$\begin{cases} \text{for } (t_0 - \frac{\gamma}{f_p}) \leq t \leq (t_0 + \frac{\gamma}{f_p}), & v(t) = -A \times \left(\frac{\gamma f_p}{\gamma}\right)^2 \\ & \times \left((t - t_0)^2 - \left(\frac{\gamma}{f_p}\right)^2 \right) \\ & \times \cos(2\pi f_p t + \nu), \gamma \geq \frac{1}{4} \\ \text{Otherwise,} & v(t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

در این رابطه، A کنترل‌کننده‌ی دامنه‌ی پالس، f_p بسامد، ν اختلاف فاز، γ معرف خصوصیت نوسانی (تعداد سیکل‌ها) و t_0 بیانگر مرکز پنجره‌ی زمانی یا همان زمان متناظر با نقطه‌ی بیشینه‌ی پوش است. همچنین زمان شروع پالس با $(t_0 - \frac{\gamma}{f_p})$ و زمان پایان آن نیز با $(t_0 + \frac{\gamma}{f_p})$ کنترل می‌شود. محدودیت $\gamma \geq \frac{1}{4}$ از این جهت اعمال شده است که زمان تناوب پنجره‌ی زمانی رابطه‌ی ۲ یعنی $\left(\frac{\gamma}{f_p}\right)^2 \times \left((t - t_0)^2 - \left(\frac{\gamma}{f_p}\right)^2 \right)$ باید از زمان تناوب بخش هارمونیک معادله یعنی $\cos(2\pi f_p t + \nu)$ بیشتر باشد (رابطه‌ی ۳):

$$2 \times \left(\frac{\gamma}{2f_p} + \frac{\gamma}{2f_p} \right) \geq \frac{1}{f_p} \rightarrow \gamma \geq \frac{1}{4} \quad (3)$$

در شکل ۳، اثر تغییر مقدار γ در رابطه‌ی ارائه‌شده در مقایسه با رکورد سرعت عمود بر گسل ثبت‌شده در ایستگاه BAM طی زلزله‌ی بم (۲۰۰۳) با ثابت در نظر گرفتن سایر مقادیر ($t_0 = 5.9^\circ \text{ sec}$ ، $f_p = 0.55 \text{ Hz}$ ، $\nu = 2.71 \text{ rad}$) و $A = 95$ نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش مقدار گاما، مدت زمان پالس و تعداد سیکل‌های نوسانی در رکورد سرعت افزایش می‌یابد؛

ممکن است در امتدادی به غیر از امتداد عمود بر گسل اتفاق بیفتد. این شرایط وقتی اتفاق می‌افتد که جهت موازی گسل (که معمولاً براساس جهت راستای یک صفحه‌ی گسل ایده‌آل معرفی می‌شود) با جهت گسل واقعی به‌طور موضعی بر هم منطبق نشوند. ناهمگونی بخشی که امواج برشی از طریق آن حرکت می‌کنند، ممکن است باعث ایجاد چرخش در امتداد راستای مشاهده‌شده‌ی پالس‌ها شود.^[۱۹]

۲.۱.۲. راستاپذیری پس‌رونده^{۱۶}

در هنگام زلزله، همه‌ی محدوده‌های نزدیک گسل اثرات راستاپذیری پس‌رونده را تجربه نمی‌کنند. زمانی که امتداد انتشار پاره‌شدگی از سایت دور شود، حرکات زمین در محل سایت با مدت زمان طولانی و دامنه‌ی کوتاه است. به چنین پدیده‌یی، راستاپذیری پس‌رونده گفته می‌شود. محققان در سال ۱۹۹۷، شرایطی که منجر به راستاپذیری پس‌رونده و پس‌رونده می‌شود، را مشخص کردند.^[۲۰]

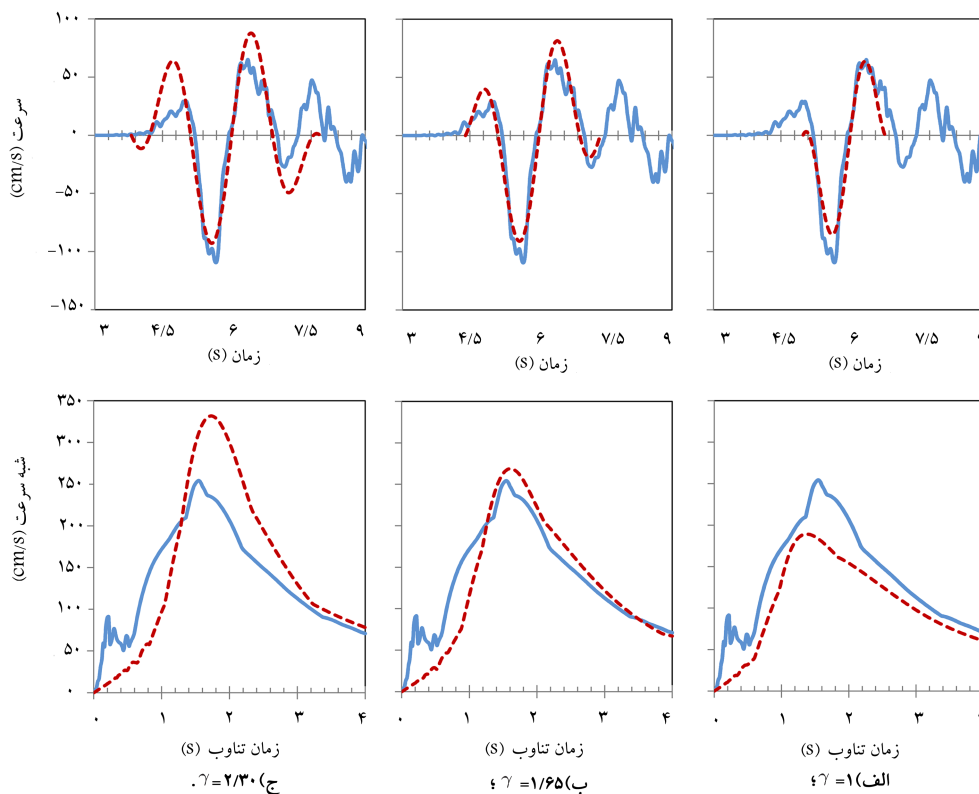
۳.۱.۲. راستاپذیری خنثی^{۱۷}

این اثرات در سایت‌هایی مشاهده شده است که خارج از دو سمت سطح پاره‌شدگی گسل واقع شده‌اند، زمانی که انتشار پاره‌شدگی نه به‌طور غالب به سمت سایت باشد و نه از آن دور شود.

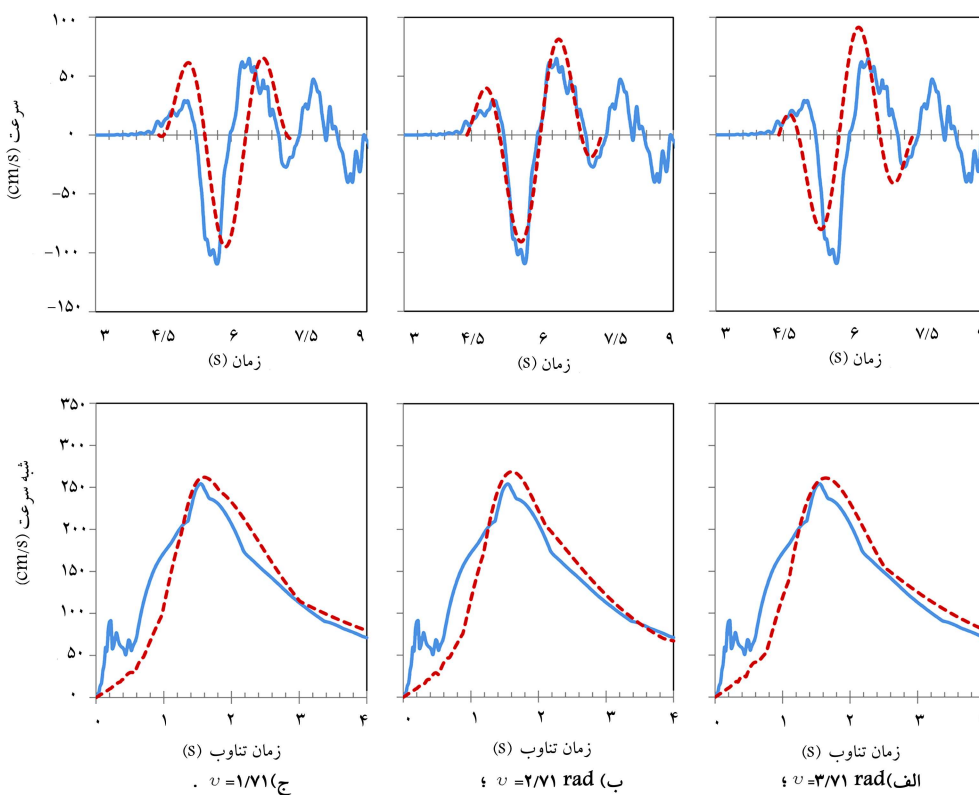
۲.۲. اثر پرتابی^{۱۸}

اثرات پرتابی نتیجه‌ی تغییرشکل‌های تکتونیکی ماندگار زمین در محل سایت در اثر زلزله هستند.^[۲۱] این قبیل اثرات را می‌توان به‌صورت یک تغییرمکان پله‌یی و پالس سرعت یک طرفه مشخص کرد. در مورد گسل‌های راستا لغز، این اثرات به مؤلفه‌ی موازی با امتداد گسل متمایل شده است، در حالی که در گسل‌های شیب لغز، آن‌ها به راستای عمود بر امتداد گسل متمایل شده‌اند. این قبیل اثرات زمانی قابل توجه می‌شود که تغییرشکل‌های تکتونیکی بیش از حدی به علت لغزش بزرگ روی صفحه گسل رخ دهد. اثرات حرکت پرتابی حرکات زمین در عملکرد ساختمان‌ها، در مقایسه با اثرات راستاپذیری پس‌رونده، کمتر مورد بررسی و توجه قرار گرفته است. زلزله‌های اخیر در تابوان و ترکیه، نقش تغییرشکل‌های ماندگار زمین به علت گسیختگی سطحی در عملکرد ساختمان‌ها و شریان‌های حیاتی، که گسل فعال را قطع می‌کنند و یا نزدیک به آن هستند، را پررنگ کرد.

از اثرات مهم دیگر حرکات نزدیک گسل که می‌توانند در پالس سرعت مؤثر



شکل ۳. تأثیر تغییرات مقدار γ بر پالس سرعت و طیف پاسخ کشسان مربوط ($A = 95$ و $\nu = 2/71 \text{ rad}$, $f_p = 0/55 \text{ Hz}$, $t_0 = 5/90 \text{ sec}$).



شکل ۴. تأثیر مقدار اختلاف فاز (ν) بر پالس سرعت و طیف پاسخ کشسان مربوط ($A = 95$ و $\gamma = 1/65$, $f_p = 0/55 \text{ Hz}$, $t_0 = 5/90 \text{ sec}$).

for $(t_0 + \frac{\gamma}{\sqrt{f_p}}) < t$

$$d(t) = -A \left(\frac{\sqrt{f_p}}{\gamma} \right)^2 \times \frac{1}{(\sqrt{2\pi f_p})^2} \left(\left(-\frac{1}{\pi f_p} \right) \sin(\sqrt{2\pi f_p} t_0 + \pi\gamma + \nu) \right) + \text{constant} \quad (ج ۵)$$

روابط ارائه شده برای مؤلفه‌ی سرعت، شتاب و تغییرمکان در مقابل روابط ارائه شده در سال ۲۰۰۳^[۸] دارای فرم ساده‌تری هستند؛ به علاوه، وجود عبارات $\gamma + 1$ و $\gamma - 1$ در مخرج رابطه‌ی تغییرمکان این نویسندگان^[۸] موجب می‌شود که از $\gamma = 1$ در این روابط نتوان استفاده کرد. این محدودیت از مدل‌سازی پالس‌هایی که به صورت کامل تک‌سویه هستند (مثل اثرات حرکات پرتابی)، جلوگیری می‌کند. این محدودیت در رابطه‌ی نویسندگان این نوشتار وجود ندارد و این رابطه، قابلیت مدل‌سازی این‌گونه پالس‌ها را نیز دارد. همچنین مدل ارائه شده در پژوهشی در سال ۲۰۰۷^[۹] دارای فرم بسته‌ی نیست؛^[۹] در حالی که مدل پیشنهادی این مزیت را دارد، که با فرم بسته‌ی ریاضیاتی سایر مؤلفه‌های حرکتی را نیز مدل‌سازی کند.

در این نوشتار، جهت مدل‌سازی پالس غالب از رکوردهای نزدیک گسل ایران طی زلزله‌های طیس (۱۹۷۸) و بم (۲۰۰۳) ارائه شده در جدول ۱ استفاده شده است. از خصوصیات این دو زلزله، پالس بزرگی است که به علت اثر راستاپذیری در رکورد عمود بر گسل آن‌ها ایجاد شده است. با مقایسه‌ی این دو رکورد عمود بر گسل سرعت مشخص می‌شود که با اینکه مقدار بیشینه‌ی سرعت این دو رکورد تقریباً نزدیک هم هستند، ولی مدت زمان پالس ایجاد شده در رکورد طیس بیشتر است؛ به عبارتی، پالس رکورد نزدیک گسل طیس دارای زمان تناوب بیشتری است، که علت این اختلاف در بزرگای گشتاوری زلزله‌ی طیس است.

با توجه به پارامترهای ورودی مشخص شده در جدول ۲، برای هر یک از این رکوردها مدل پالس شتاب، سرعت، و تغییرمکان بر اساس روابط ارائه شده در شکل ۸ به همراه طیف پاسخ کشسان مربوط با میرایی ۵٪ نمایش داده شده است. پارامتر بسامد (f_p) به گونه‌ی مشخص شده است که نقطه‌ی بیشینه‌ی طیف پاسخ کشسان شبه سرعت رکوردهای واقعی و پالس تولید شده در یک زمان تناوب در مجاورت همدیگر قرار بگیرند. پارامترهای فاز و مرکز پنجره‌ی زمانی به نحوی مشخص شدند که نقطه‌ی بیشینه‌ی دامنه‌ی پالس با بیشینه‌ی دامنه‌ی رکورد سرعت در پنجره‌ی زمانی مطابقت داشته باشند. همچنین پارامتر A که کنترل‌کننده‌ی دامنه است؛ با در نظر گرفتن دامنه‌ی رکورد واقعی سرعت و مقدار بیشینه‌ی طیف پاسخ کشسان آن انتخاب شده است. مقدار γ نیز با توجه به اینکه علاوه بر تأثیر مستقیم در مدت زمان پالس و تعداد سیکل‌ها می‌تواند در دامنه‌ی طیف پاسخ نیز تأثیر بگذارد؛ مشخص شده است.

با توجه به شکل ۸ مشخص می‌شود که مدل ارائه شده، پالس رکوردهای نزدیک گسل زلزله‌ی بم را با دقت بسیار بالایی مدل کرده است، به نحوی که تطابق بین طیف پاسخ کشسان رکورد واقعی و مدل ارائه شده بسیار خوب است، در حالی که مدل تولید شده برای رکورد نزدیک گسل زلزله‌ی طیس با اینکه پالس مدل شده مطابقت نزدیکی با رکورد واقعی سرعت دارد، ولی تطابق ایجاد شده در طیف پاسخ کشسان رکورد واقعی و پالس مدل شده فقط در محدوده‌ی زمان تناوب بالا قابل قبول است. مدت زمان طولانی پالس در رکورد طیس باعث می‌شود که تطابق در طیف پاسخ کشسان فقط در محدوده‌ی زمان تناوب بالا اتفاق بیفتد. همان‌طور که مشخص شد،

همچنین این افزایش مقدار باعث می‌شود که بیشینه‌ی مقدار طیف پاسخ کشسان شبه سرعت (درصد میرایی ۵) نیز افزایش یابد. تغییر مقدار اختلاف فاز در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق این شکل مشخص می‌شود که تغییر زاویه‌ی فاز فقط در شکل پالس تأثیرگذار است، در حالی که تأثیر خاصی در طیف پاسخ کشسان نمی‌گذارد. این حالت برای تغییرات مرکز پنجره‌ی زمانی نیز تفاق می‌افتد، با این تفاوت که با تغییرات این پارامتر محل شروع و پایان پالس نیز (بدون تغییر مدت زمان پالس) جابجا می‌شود (شکل ۵). در شکل ۶، برای درک بهتر تأثیر تغییر مقدار بسامد، با توجه به اینکه تغییرات فاز تأثیری در طیف پاسخ ندارد؛ تغییرات مقدار بسامد به همراه تغییر فاز نشان داده شده است. تا اینکه این تغییر فاز، نقطه‌ی بیشینه‌ی دامنه‌ی پالس را در پنجره‌ی زمانی ثابت نگه دارد. مطابق این شکل، تغییر مقدار بسامد تأثیری در دامنه‌ی پالس و طیف پاسخ کشسان مربوطه نمی‌گذارد. در حالی که افزایش مقدار آن باعث کاهش مدت زمان پالس می‌شود و در مقابل کاهش آن باعث افزایش مدت زمان پالس. همچنین باید توجه کرد که تغییرات بسامد، نقطه‌ی بیشینه‌ی منحنی طیف پاسخ کشسان را به موازات محور زمان تناوب جابجا می‌کند. شکل ۷، اثر تغییر مقدار دامنه را در پالس سرعت و طیف مربوط نشان می‌دهد. مطابق این شکل، پارامتر A فقط در دامنه‌ی پالس اثر می‌گذارد و افزایش آن، دامنه‌ی پالس و طیف پاسخ کشسان آن را افزایش می‌دهد.

با توجه به رابطه‌ی ۲، دیگر مؤلفه‌های حرکتی زمین، شامل شتاب (رابطه‌ی ۴) و تغییرمکان به صورت رابطه‌ی ۵الف تا ۵ج به دست می‌آیند:

$$a(t) = \frac{\partial}{\partial t}(v(t)) \begin{cases} \text{for } (t_0 - \frac{\gamma}{\sqrt{f_p}}) \leq t \leq (t_0 + \frac{\gamma}{\sqrt{f_p}}), & a(t) = -A \left(\frac{\sqrt{f_p}}{\gamma} \right)^2 \left(-\sqrt{2\pi f_p} \left((t - t_0)^2 - \left(\frac{\gamma}{\sqrt{f_p}} \right)^2 \right) \sin(\sqrt{2\pi f_p} t + \nu) - \sqrt{2} (t_0 - t) \cos(\sqrt{2\pi f_p} t + \nu) \right), \\ \text{Otherwise,} & a(t) = 0 \end{cases} \quad (۴)$$

$$d(t) = \int v(t) dt \quad \text{for } (t_0 - \frac{\gamma}{\sqrt{f_p}}) \leq t \leq (t_0 + \frac{\gamma}{\sqrt{f_p}})$$

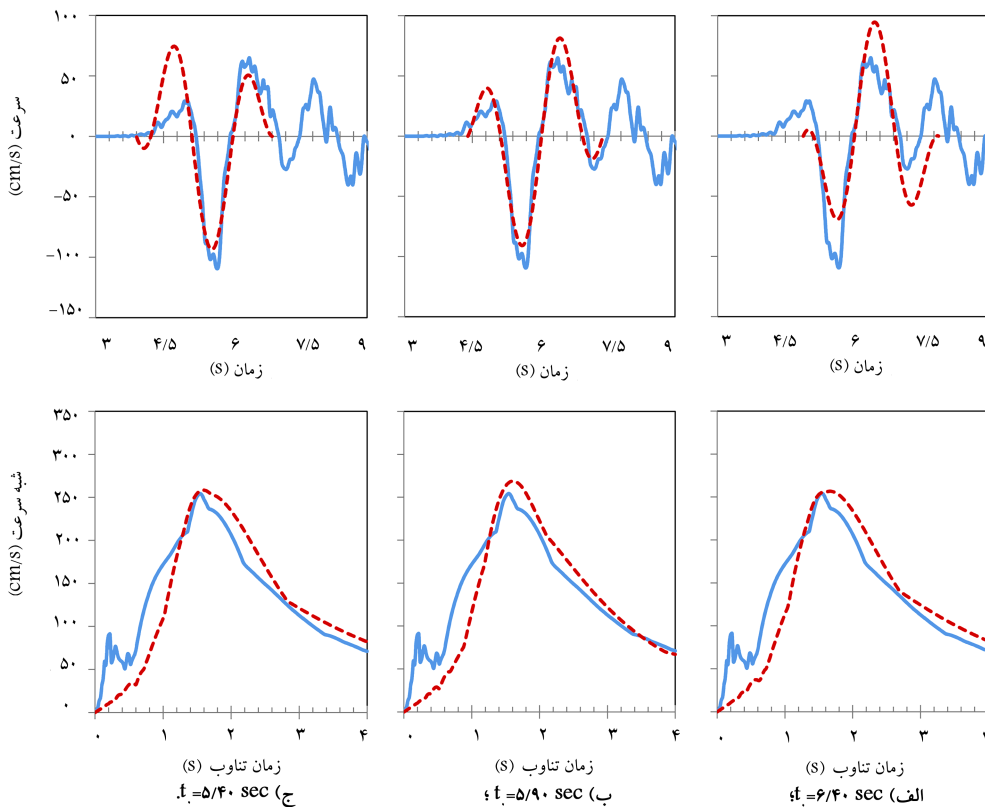
$$d(t) = -A \left(\frac{\sqrt{f_p}}{\gamma} \right)^2 \times \frac{1}{(\sqrt{2\pi f_p})^2} \left(\sqrt{2\pi f_p} \left(\left(t_0^2 - \left(\frac{\gamma}{\sqrt{f_p}} \right)^2 \right) - \sqrt{2} t_0 t + t^2 - \frac{2}{(\sqrt{2\pi f_p})^2} \right) \right) + \text{constant}$$

$$\left(\sin(\sqrt{2\pi f_p} t + \nu) - \sqrt{2} (t_0 - t) \cos(\sqrt{2\pi f_p} t + \nu) \right) \quad (۵الف)$$

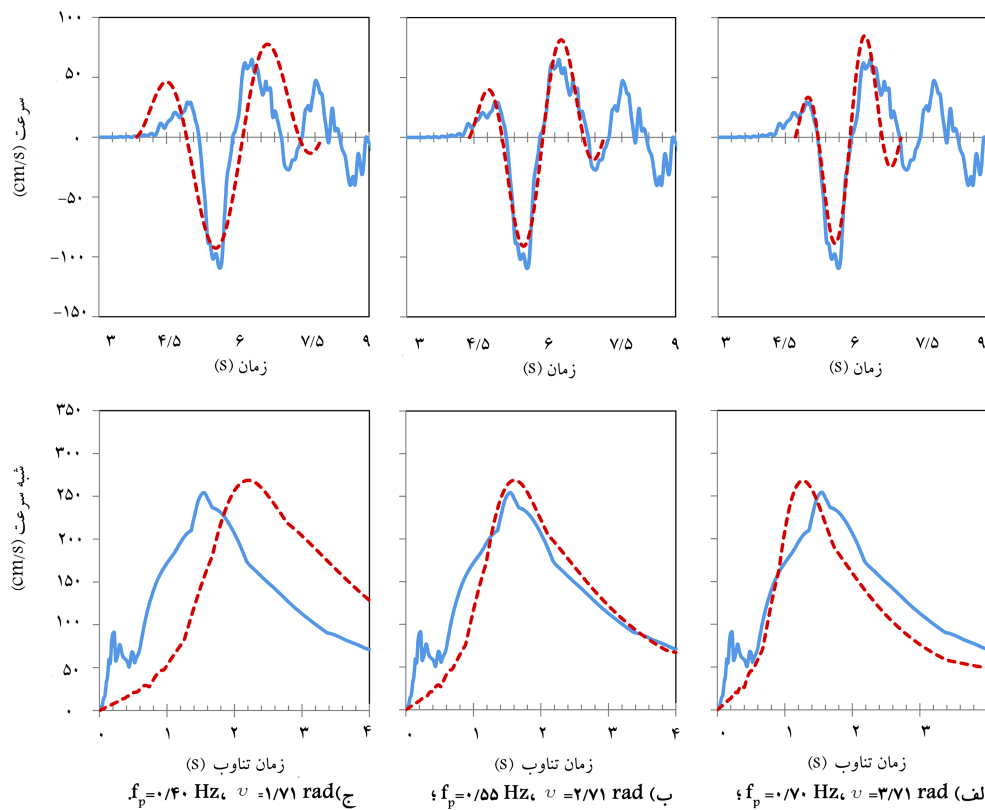
$$\text{for } t < (t_0 - \frac{\gamma}{\sqrt{f_p}})$$

$$d(t) = -A \left(\frac{\sqrt{f_p}}{\gamma} \right)^2 \times \frac{1}{(\sqrt{2\pi f_p})^2} \left(\left(-\frac{1}{\pi f_p} \right) \sin(\sqrt{2\pi f_p} t_0 - \pi\gamma + \nu) \right) + \text{constant} \quad (۵ب)$$

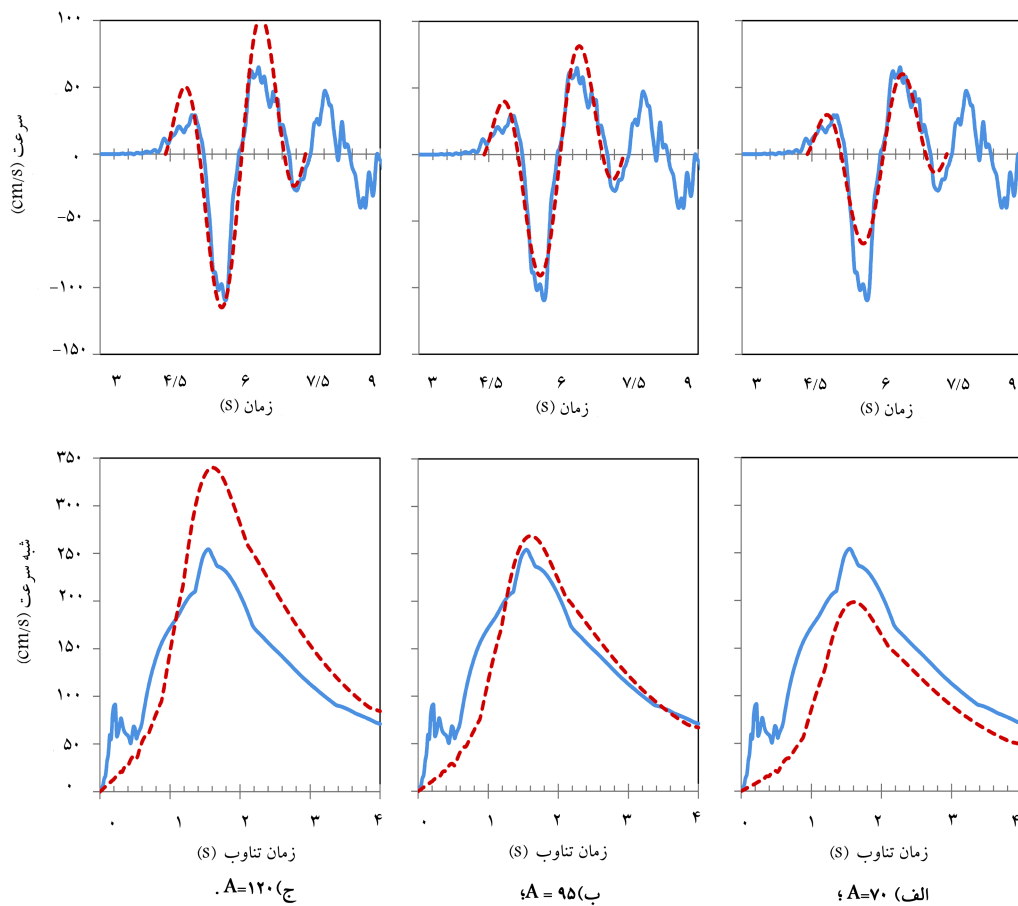
$$\left(-\frac{\gamma}{f_p} \cos(\sqrt{2\pi f_p} t_0 - \pi\gamma + \nu) \right)$$



شکل ۵. تأثیر تغییر مرکز پنجره‌ی زمانی (t_0) بر پالس سرعت و طیف پاسخ کشسان مربوط ($A = 95$ و $\gamma = 1/65$, $\nu = 2/71$ rad., $f_p = 0/55$ Hz.).



شکل ۶. تغییرات بسامد و اثر آن بر پالس سرعت و طیف پاسخ کشسان مربوط ($A = 95$ و $\gamma = 1/65$, $t_0 = 5/90$ sec.).



شکل ۷. تأثیر مقدار دامنه در پالس سرعت و طیف پاسخ کشسان مربوط ($t_0 = 5,9 \text{ sec.}$, $f_p = 0,55 \text{ Hz.}$, $\nu = 2,71 \text{ rad.}$ و $\gamma = 1,65$).

جدول ۱. خصوصیات رکوردهای زلزله.

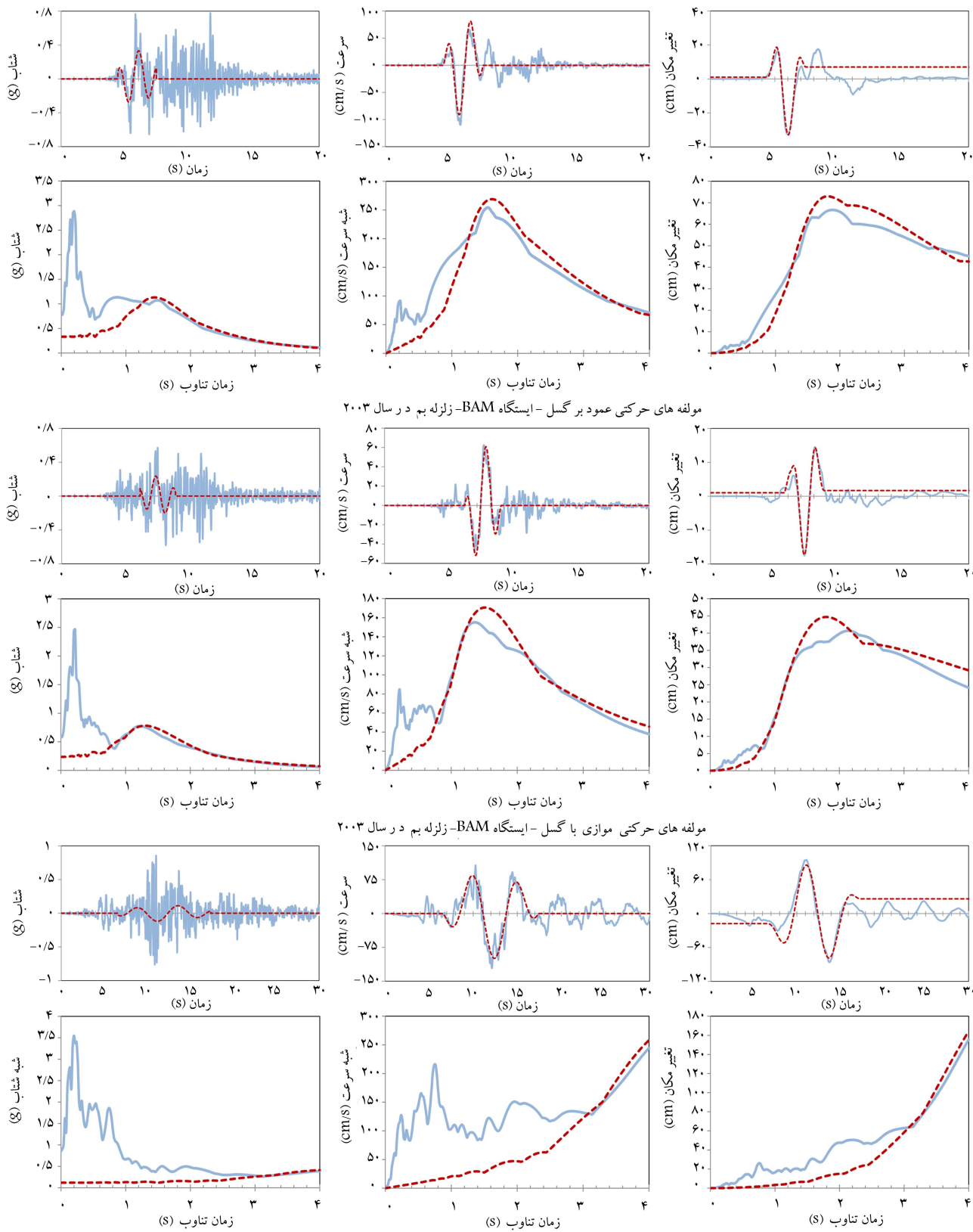
| Closest Distance * (km) | PGV | M_w | مؤلفه | ایستگاه | سال | زلزله |
|----------------------------|-------|-------|--------------|---------|------|-------|
| ۱ | ۱۰۹,۵ | ۶,۶ | عمود برگسل | BAM | ۲۰۰۳ | بم |
| ۱ | ۶۲,۵ | ۶,۶ | موازی با گسل | BAM | ۲۰۰۳ | بم |
| ۲,۰۵ | ۱۲۱,۴ | ۷,۴ | عمود برگسل | TAB | ۱۹۷۸ | طیس |

* نزدیک‌ترین فاصله از محل ثبت رکورد تا گسل.

جدول ۲. پارامترهای ورودی از معادله‌ی پالس‌های غالب مربوط به رکورد واقعی حرکات نزدیک گسل.

| t_0 (sec.) | f_p (Hz) | ν (rad.) | γ | A | مؤلفه | ایستگاه | سال | زلزله |
|--------------|------------|--------------|----------|--------|--------------|---------|------|-------|
| ۵,۹۰ | ۰,۵۵ | ۲,۷۱ | ۱,۶۵ | ۹۵,۰۰ | عمود برگسل | BAM | ۲۰۰۳ | بم |
| ۷,۴۵ | ۰,۶۰ | ۲,۴۴ | ۱,۶۵ | ۶۲,۴۹ | موازی با گسل | BAM | ۲۰۰۳ | بم |
| ۱۲,۰۰ | ۰,۱۹ | ۰,۸۷ | ۲,۰۵ | ۱۰۰,۰۰ | عمود برگسل | TAB | ۱۹۷۸ | طیس |

مدل ارائه شده با کیفیت قابل قبولی بخش دوری تناوب بالای رکوردهای نزدیک گسل ایران طی زلزله‌های طیس (۱۹۷۸) و بم (۲۰۰۳) را مدل‌سازی کرده است. مدل ارائه شده قادر به مدل‌سازی سایر رکوردهای نزدیک گسل نیز است، ولی با توجه به این موضوع که این نوشتار فقط رکوردهای نزدیک گسل ایران (طیس و بم) را مورد بررسی قرار داده است؛ رکوردهای دیگر در این نوشتار مورد بحث و بررسی واقع نشده‌اند.



شکل ۸. مقایسه‌ی پالس غالب مدل‌سازی‌شده‌ی مؤلفه‌های حرکتی و طیف پاسخ‌کشسان (میرایی ۵٪) مربوط (خط‌چین) با رکوردهای واقعی نزدیک گسل (خط).

۴. نتیجه گیری

دارند. مدت زمان طولانی پالس در رکورد مؤلفه‌ی سرعت عمود بر گسل زلزله‌ی طیس (۱۹۷۸) باعث می‌شود که مدل تولیدشده برای رکورد نزدیک گسل زلزله‌ی طیس با وجود اینکه پالس مدل شده مطابقت نزدیکی با رکورد واقعی سرعت دارد، ولی تطابق ایجادشده در طیف پاسخ کشسان رکورد واقعی و پالس مدل شده فقط در محدوده‌ی زمان تناوب بالا رخ می‌دهد. در نهایت، مدل ارائه شده با کیفیت قابل قبولی بخش دوره‌ی تناوب بالای رکوردهای نزدیک گسل ایران طی زلزله‌های طیس و بم را مدل سازی کرده است.

جهت مدل سازی پالس غالب حرکات نزدیک گسل از مدل ریاضیاتی جدیدی استفاده شده است. مدل ارائه شده‌ی پالس غالب موجود در رکورد مؤلفه‌های حرکتی عمود بر گسل و موازی با گسل ایستگاه BAM از زلزله‌ی بم (۲۰۰۳) را با دقت بسیار بالایی مدل سازی کرده است، به نحوی که طیف پاسخ کشسان رکورد واقعی و مدل ارائه شده در محدوده‌ی زمان تناوب‌های بالاتر از ۱ ثانیه مطابقت بسیار خوبی

پانوشته‌ها

1. Northridge
2. Kobe
3. Izmit
4. Bam
5. Parkfield
6. San Fernando
7. wavelet
8. gaussian envelope
9. directivity effect
10. forward directivity
11. shear wave front
12. strike-slip faults
13. dip-slip faults
14. fault normal
15. strike normal
16. backward directivity
17. neutral directivity
18. fling effect
19. hanging wall effect
20. surface or interface P-wave
21. surface vs. buried faulting
22. type of rupture: Shear dislocation vs. crack
23. coherent
24. incoherent

منابع (References)

1. Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W. and Wald, D.J. "Near source ground motion and its effects on flexible buildings", *Earthquake Spectra*, **11**(4), pp. 569-606 (1995).
2. Iwan, W.D. "Drift spectrum: Measure of demand for earthquake ground motions", *J. Struct. Eng., ASCE*, **123**(4), pp. 397-404 (1997).
3. Makris, N. "Rigidity-plasticity-viscosity: Can electromagnetic dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions?", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **26**, pp. 571-591 (1997).
4. Anderson, J.C., Bertero, V.V. and Bertero, R.D. "Performance improvement of long period building structures subjected to severe pulse-type ground motions", PEER Report 1999/09, University of California at Berkeley, California (1999).
5. Malhotra, P.K. "Response of buildings to near-field pulse-like ground motions", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **28**(11), pp. 1309-1326 (1999).
6. Alavi, P. and Krawinkler, H. "Effects of near-fault ground motion on building structures", CUREE-Kajima Joint Research Program Report, Richmond, California (2001).
7. Alavi, B. and Krawinkler, H. "Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions", *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, **33**(6), pp. 687-706 (2004).
8. Mavroeidis, G.P. and Papageorgiou, A.S. "A mathematical representation of near-fault ground motions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(3), pp. 1099-1131 (2003).
9. Tian, Y.J., Yang, Q.Sh. and Lu, M.Q. "Simulation method of near-fault pulse-type ground motion", *Acta Seismologica Sinica*, **20**(1), pp. 80-87 (2007).
10. Fu, Q. and Menun, Ch. "Seismic environment based simulation of near fault ground motion", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada (2004).
11. Li, X.L. and Zhu, X. "Study on equivalent velocity pulse of near fault ground motions", *Acta Seismologica Sinica*, **17**(6), pp. 697-706 (2004).
12. Makris, N. and Black, C.J. "Evaluation of peak ground velocity as a "Good" intensity measure for near-source ground motions", *J. Eng. Mech.*, **130**(9), pp. 1032-1045 (2004).
13. Xie, L., Xu, L. and Rodriguez-Marek, A. "Representation of near-fault pulse-type ground motions", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **4**(2), pp. 191-199 (2005).
14. Baker, J. "Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**(5), pp. 1486-1501 (2007).
15. Baker, J. "Identification of near-fault velocity pulses and prediction of resulting response spectra", *Proceedings of Geotechnical Earthquake Engineering and Structural Dynamics IV*, Sacramento, CA (2008).
16. Yaghmaei-Sabegh, S. "Detection of pulse-like ground motions based on continuous wavelet transform", *Journal of Seismology*, **14**(4), pp. 715-726 (2010).
17. Papageorgiou, A.S. "The character of near-source ground motions and related seismic design issues", *Proc. of the Structural Engineers World Congress*, San Francisco, California (1998).

18. Somerville, P.G. "Engineering characteristics of near fault ground motions", *SMIP97 Seminar Proceedings, Seminar on Utilization of Strong Ground Motion Data*, Pasadena, CA, pp. 9-28 (1997).
19. Mavroeidis, G.P. and Papageorgiou, A.S. "Near-source strong ground motion: characteristics and design issues", *Proc. of the Seventh U.S. National Conf. on Earthquake Engineering (7NCEE)*, Boston, Massachusetts (2008).
20. Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W. and Abrahamson, N.A. "Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity", *Seis. Res. Let.*, **68**(1), pp. 199-222 (1997).
21. Abrahamson, N.A. "Effects of rupture directivity in probabilistic seismic hazard analysis", *Proc. of the 6th International Conf. on Seismic Zonation*, Earthquake Engineering Research Institute, Palm Springs (2000).
22. Gabor, D. "Theory of communication. I. The analysis of information", *IEEE*, **93**(26), pp. 429-441 (1946).