نگرشی بر ساختار تحلیلی طیف پاسخ نرمال دوسویه سرعت و جابه‌جایی برای رکوردهای حوزه نزدیک

صفورا مرشد شکرچی[1]، افشین مشکوه الدینی[1*]، علی معصومی[1]
١- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

تاریخ دریافت: ١٤٠٠/٠٥/٣٠ تاریخ پذیرش: ١٤٠٠/١١/١٧

چکیده

طیف طرح ساختگاه در آیین‌نامه‌های مختلف بر مبنای طیف‌های میانگین پاسخ نرمال سیستم تک درجه آزادی بدست می‌آید که پارامترهای گوناگونی نیز در این خصوص تاثیرگذار هستند. این مطالعه با هدف بررسی طیف‌های پاسخ شبه سرعت، جابجایی نرمال و همچنین نرمال دوسویه متناظر با رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیشرو، بر مبنای پریود غالب و گام پرش پلکانی انرژی انجام شده است. روندسازی تحلیلی بر پایه مبانی طیف پاسخ شبه شتاب استوار می‌باشد. بدین منظور تعداد ١٨ شتاب‌نگاشت دو مولفه‌ای انتخاب گردیده است. با توجه به اهمیت دامنه انرژی جنبشی و پارامترهای حداکثر سرعت و شتاب زمین، شتاب‌نگاشت‌ها دسته‌بندی شده و تاثیر هر پارامتر بر طیف‌های پاسخ شبه سرعت، جابجایی نرمال، نرمال دوسویه ارزیابی شده است. طیف پاسخ نرمال NRS از نسبت عددی این طیف در یک پریود خاص (T) بر پارامتر طیفی بیشینه رکورد زلزله حاصل می‌شود. همچنین، با نرمال کردن محور پریود طیف پاسخ NRS با توجه به محتوای فرکانسی، طیف پاسخ نرمال دوسویه BNRS حاصل می‌شود. توضیح آن که طیف BNRS نمایش‌گر پاسخ طیفی سیستم تک درجه آزادی است که با استفاده از حل انتگرال دوهامل، به ازای نسبت عددی پریود ارتعاش سیستم بر پریود غالب زلزله (T/Tp) بدست می‌آید. بر پایه نتایج این تحقیق، ارزیابی طیف‌های پاسخ مذکور نشان داد که طیف پاسخ سرعت نرمال با معیارهای سنجش مختلف، بویژه در پریودهای بزرگ دارای تغییرات به شدت ناهمگون و با ماهیت تصادفی است. همچنین، تحلیل طیف پاسخ نرمال دوسویه با معیار پریود غالب (Tp)، مبین آن است که حساسیت محاسباتی مولفه‌های این طیف به ویژه در بازه پریودیک نزدیک به Tp افزایش دوچندان می‌یابد. نکته دیگر آن در این مقاله، مدت زمان متناظر با افزایش سریع روند آزاد شدن انرژی در انتهای بازه زمانی پالس و اسپایک‌های پردامنه سرعت، با معیار گام پرش پلکانی (T_{jump}) معرفی شده است. بر پایه مطالعات تحلیلی این پژوهش ملاحظه شد که نرمال‌کردن محور پریود طیف پاسخ با توجه به گام پرش پلکانی، سبب کاهش نسبی اثرات تغییرات پارامترهای سنجشی مختلف در ساختار طیف پاسخ جابجایی و سرعت می‌شود.

واژه‌های کلیدی: رکورد حوزه نزدیک، پریود غالب، گام پرش پلکانی، طیف پاسخ شبه سرعت، طیف پاسخ جابجایی نرمال، طیف پاسخ نرمال دوسویه

*نویسندهٔ مسئول: meshkat@khu.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

۱- مقدمه

زلزله‌های بزرگ سبب خسارات مالی و جانی زیادی می‌شوند. بررسی دامنه پاسخ لرزه‌ای سازه و شناخت مشخصات رکوردهای حوزه نزدیک ثبت شده در هنگام زلزله‌های بزرگ همواره حایز اهمیت بوده است. مشخصات فیزیکی و طیفی رکوردهای حوزه نزدیک تحت تاثیر جهت گسلش و انتشار امواج لرزه‌ای می‌باشند. پدیدار شدن پالس‌های دامنه بزرگ و پریود بلند، مدت زمان به نسبت کوتاه جنبش نیرومند زمین، مقادیر بزرگ برای حداکثر شتاب (PGA)، حداکثر سرعت (PGV) و نیز حداکثر جابجایی زمین (PGD)، معرف ماهیت حرکات پرقدرت زمین در حوزه نزدیک گسل می‌باشند [۱]. طیف پاسخ متناظر با یک مولفه از رکورد زلزله (یا معیار لرزه شناسی) بر اساس مفهوم‌سازی تحلیلی پاسخ بیشینه یک سیستم تک درجه آزادی تحت تحریکات لرزه‌ای بدست می‌آید. نکته دیگر آن که کارایی طیف پاسخ یک سیستم تک درجه آزادی، می‌تواند به عنوان توصیفی از تقاضای لرزه‌ای یک سازه تحت تحریک زلزله و ابزاری برای دریافت بیشینه پارامترهای پاسخ دینامیکی باشد. بدین لحاظ، بر مبنای معیارهای محاسباتی و مفهوم‌سازی طیف پاسخ، با در نظر گرفتن پارامترهای موثر بر پاسخ لرزه‌ای و شرایط مختلف ساختگاه، ساختار تحلیلی یک طیف طرح بدست می‌آید [۲-٤].

با افزایش بزرگای زلزله، بر اهمیت بررسی تاثیرات مدت زمان حرکات شدید زمین با پریود بلند و نیز نمود ساختار پالس سرعت در نگاشت های مربوطه افزوده می‌شود. پالس‌های سرعت رکوردهای حوزه نزدیک می‌تواند سبب نیازهای بزرگ لرزه‌ای در رفتار سازه‌های طبقاتی بشود. حرکات نیرومند زمین حاوی اثرات پالس سرعت، در پهنای باند پریود متوسط تا بلند دارای مقادیر بزرگ‌تر منتجه از طیف پاسخ شتاب نسبت به جنبش‌های بدون پالس سرعت هستند [۵]. علاوه بر آن، این نوع حرکات نیرومند گرایش به ایجاد پاسخ غیرخطی در ارتعاشات سازه‌های چند درجه آزادی دارند. مطالعات کوهرنگی و همکاران (۲۰۱۹) با در نظرگیری طیف پاسخ و نیز مقایسه پاسخ یک سازه ۲۰ طبقه نشان داد که رکوردهای دارای پالس سرعت، معیار مناسبی جهت بررسی پارامترهای رفتار لرزه‌ای می‌باشد [٦]. تحقیقات بسیاری برای تعیین و تشخیص حوزه زمانی پالس سرعت در رکوردهای حاوی اثرات جهت‌داری پیشرو با استفاده از روش‌های مختلف انجام شده است. مبنای تحلیلی این روش‌ها، بر پایه ارزیابی طیف‌های پاسخ و همچنین طیف دامنه فوریه می‌باشد. یکی از دقیق‌ترین روش‌های محاسبه پالس سرعت، استفاده از پریود متناظر با بیشینه مقدار طیفی ترکیب تحلیلی دو طیف پاسخ سرعت و جابجایی با میرایی ۵ درصد است. نگرش‌های هم‌پایه برای ساخت و پردازش طیف پاسخ شبه شتاب نیز در همین راستا مطرح می‌شود [۷].

استفاده از طیف‌های پاسخ در طراحی و تحلیل پاسخ سازه، روشی مرسوم در آیین‌نامه‌های و استانداردهای این زمینه می‌باشد. ضریب حوزه نزدیک در آیین‌نامه UBC97، با افزایش مقادیر طیفی در تمامی پریودها، ساده‌ترین و اولین رویکرد برای در نظر گرفتن اثرات جنبش‌های زمین پالس‌گونه بوده است. افزایش مقادیر طیفی در نزدیکی پریود متناظر با پالس سرعت در طیف پاسخ شتاب رکوردهای پالس‌گونه نمودی از اثرات زمان کوتاه آزادسازی انرژی جنبشی و محتوای فرکانسی پالس سرعت این رکوردها است [۸]. در رویکرد ارائه شده توسط دینگ و همکاران (۲۰۲۰)، محتوای فرکانسی متناظر با بیشینه مقدار طیف پاسخ سرعت و شتاب جهت شناسایی مشخصات رکوردهای حوزه نزدیک و تاثیر آن بر طیف طرح بررسی شده است [۹]. در روش طراحی بر مبنای نیرو[۱] از طیف پاسخ شتاب به عنوان طیف طرح در روند

[۱] Force-Based Design Method

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

ارزیابی و تحلیل سازه‌ها استفاده می‌شود. با معرفی روش طراحی بر مبنای جابجایی[۱] نیز طیف پاسخ متناظر جابجایی به عنوان ابزاری کارآمد در ارزیابی رفتار سازه‌ها معرفی شده است [۱و۸].

به منظور بررسی ساختار و ماهیت طیف‌های طرح و همچنین ضرایب کاهندگی متناظر با ماهیت رکوردهای حوزه نزدیک از نرمال‌سازی محور افقی طیف‌های پاسخ استفاده می‌شود [۱۰]. بر پایه مطالعه ژو و ژی (۲۰۰٤)، مفهوم طیف پاسخ نرمال دوسویه (با معیارسازی پاسخ شبه شتاب) با توجه به کاهش تاثیرات عدم قطعیت پارامترهای لرزه‌ای بر ساختار تحلیلی این طیف مطرح گردید. مطالعات ایشان با تمرکز بر تحلیل رکوردهای زلزله چای چای[۲] ۱۹۹۹ تایوان نشان داد که شرایط خاک ساختگاه، فاصله رو مرکز زلزله و اثرات میرایی تاثیر چندانی بر طیف پاسخ شبه شتاب نرمال دوسویه با معیار پریود غالب ندارند [۱۱]. هم راستا با موضوعات فوق، ساختار تحلیلی طیف پاسخ نرمال دوسویه به ویژه برای زلزله‌های حوزه نزدیک از دیدگاه‌های مختلف مطالعه شده است [۱۲-۱٤].

نمود عمومی نتایج حاصل از پژوهش‌های یاد شده، لزوم انجام مطالعات جامع‌تر بر پایه ویژگی‌های رکوردهای نیرومند حاوی اثرات جهت‌داری پیشرو را ضروری می‌نماید. در این مقاله، به منظور بررسی ساختار تحلیلی طیف پاسخ نرمال[۳] (NRS) و نرمال دوسویه[٤] (BNRS) متناظر با جابجایی و سرعت (با معیارسازی پاسخ شبه شتاب) برای رکوردهای حوزه نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیش‌رو، از شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده دو زلزله بزرگ کالیفرنیای جنوبی با نام نورتریج ۱۹۹٤ و امپریال‌ولی ۱۹۷۹ میلادی و دو رخداد لرزه‌ای طبس ۱۹۷۸، بم ۲۰۰۳ در ایران استفاده شده است. همچنین، با توجه به ماهیت رکوردهای حوزه نزدیک از نسبت‌های انرژی دو مولفه افقی، حداکثر شتاب (PGA) و حداکثر سرعت (PGV) نگاشت زلزله جهت بررسی تاثیرات آنها بر طیف‌های پاسخ استفاده شد.

۲- طیف پاسخ

تبیین موضوعی و گسترش کاربردی طیف پاسخ زلزله بر پایه مطالعات بیوت[٥] و هاسنر[٦] صورت گرفته است. طیف پاسخ، یک ابزار تحلیلی کارامد برای توصیف دامنه تغییرات پاسخ بیشینه سیستم تک درجه آزادی تحت اثر شتاب‌نگاشت ناشی از تحریک زلزله می‌باشد [۱٥]. پاسخ حداکثر شتاب یک سیستم تک درجه آزادی میرا Sa با فرکانس زاویه‌ای ω یا پریود طبیعی T از رابطه (۱) بدست می‌آید، (رابطه ۱ با نماد جایگزین A(T)) [۱۱]:

$$A(T)=\omega'\left|\ddot{x}(\tau)e^{-\xi\omega(t-\tau)}\left[\left(1-\frac{\xi^2}{1-\xi^2}\right)\sin\omega'(t-\tau)+\frac{2\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\cos\omega'(t-\tau)\right]d\tau\right|_{max} \qquad (۱)$$

فرکانس زاویه‌ای میرای سیستم برابر با $\omega'=\omega\sqrt{1-\xi^2}$ است. ξ ضریب میرایی و ω فرکانس زاویه‌ای سیستم است که دارای رابطه $\omega=2\pi f=2\pi/T$ با پریود می‌باشد. معادله دیفرانسیل حرکت یک سیستم تک درجه آزادی با استفاده از انتگرال پارامتریک دوهامل یا روش انتگرال‌گیری عددی بر حسب جابجایی حل می‌شود [۱٦]. طیف‌های پاسخ شبه شتاب و شبه سرعت با توجه به روابط هم‌پایه $PSa=\omega^2Sd$ و $PSv=\omega Sd$ به ازای T برای هر نسبت میرایی ξ ترسیم

[۱] Displacement-Based Design Method

[۲] Chi Chi 1999

[۳] Normalized Response Spectra (NRS)

[٤] Bi-Normalized Response Spectrum (BNRS)

[٥] Biot

[٦] Housner

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

می‌گردند. نکته دیگر آن که در پاره‌ای موارد، نسبت شتاب طیفی به شتاب حداکثر زمین (ضریب بازتاب شتاب) به عنوان تابعی از فرکانس یا پریود رسم شده و این نمودار نیز طیف پاسخ نرمال (NRS) نامیده می‌شود [۲] که از ارزیابی محاسباتی رابطه (۲) بدست می‌آید، (رابطه ۲ با نماد جایگزین (N_A(T) [۱۱]:

$$N_A(T) = \frac{\omega'}{PGA}\left|\ddot{x}(\tau)e^{-\xi\omega(t-\tau)}\left[\left(1-\frac{\xi^2}{1-\xi^2}\right)\sin\omega'(t-\tau)+\frac{2\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\cos\omega'(t-\tau)\right]d\tau\right|_{max} \qquad (۲)$$

با حذف تاثیرات فرکانس‌های نویز[۱] در حرکات مختلف زمین، طیف پاسخ منظم و هموارتری منتج می‌شود. محاسبه بیشینه مقدار طیف پاسخ شتاب و پریود متناظر با آن، دارای اهمیت بسزایی است. نکته مهم در این خصوص، مفهوم‌سازی و تبیین روابط محاسباتی طیف پاسخ با توجه به محتوای فرکانسی رکوردهای مختلف می‌باشد [۱۷]. همچنین از سوی دیگر، ثابت شده که نمودارهای طیف پاسخ نرمال دارای ویژگی‌های مشابه در محدوده نزدیک به پریود غالب[۲] (T_p) تحریکات لرزه‌ای مختلف هستند. همانند بررسی دامنه تاثیرات پریود غالب برای هر طیف پاسخ نرمال، طیف پاسخ نرمال دوسویه (BNRS) نیز با تاثیرپذیری از پریود مذکور محاسبه می‌شود. طیف BNRS از نرمال‌سازی محور پریود طیف پاسخ نرمال با معیار پریود غالب در گام فرمول‌سازی ساختار اصلی طیف مذکور بدست می‌آید، (رابطه ۳ با نماد جایگزین (BN_A(T) [۱۱]:

(۳)

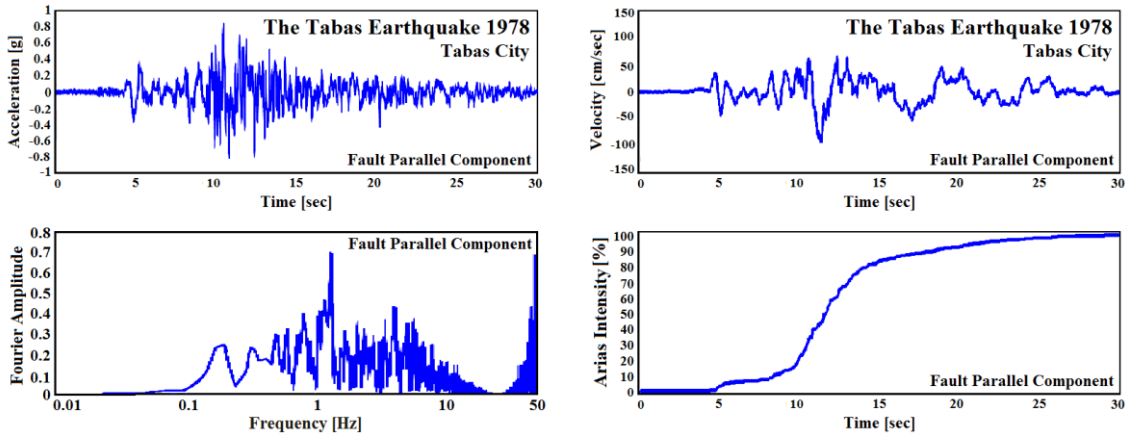
$$BN_A(T) = \frac{(\omega' T_P)}{PGA}\left|\ddot{x}(\tau)e^{-\xi(\omega T_P)(t-\tau)}\left[\left(1-\frac{\xi^2}{1-\xi^2}\right)\sin(\omega' T_P)(t-\tau)+\frac{2\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\cos(\omega' T_P)(t-\tau)\right]d\tau\right|_{max}$$

نتایج عبارت فوق، دارای مقادیر بزرگتر از صفر برای نسبت شتاب طیفی به PGA ، در هر گام پارامتر بی‌بعد T/T_P می‌باشد. ماهیت رفتار لرزه‌ای زمین تحت جنبش‌های حوزه نزدیک به صورت ضربات نیرومند با گام زمانی بزرگ است. شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک حاوی ساختار پالس، انرژی جنبشی زیادی را در مدت زمان کوتاهی به سازه وارد می‌کنند. در این مطالعه، مدت زمان افزایش روند آزاد شدن انرژی جنبشی از مقدار کم به زیاد در انتهای بازه زمانی پالس سرعت و اسپایک‌های بزرگ پس از آن، با معیار گام زمانی پرش (T_{jump}) معرفی شده در نمودار تجمعی آزاد شدن انرژی جنبشی رکورد نیرومند حاوی اثرات جهت‌داری پیشرو لحاظ گردیده است. همچنین، با توجه به اهمیت این موضوع از پارامتر T_{jump} برای نرمال‌سازی محور افقی طیف نرمال استفاده شده است [۱۸].

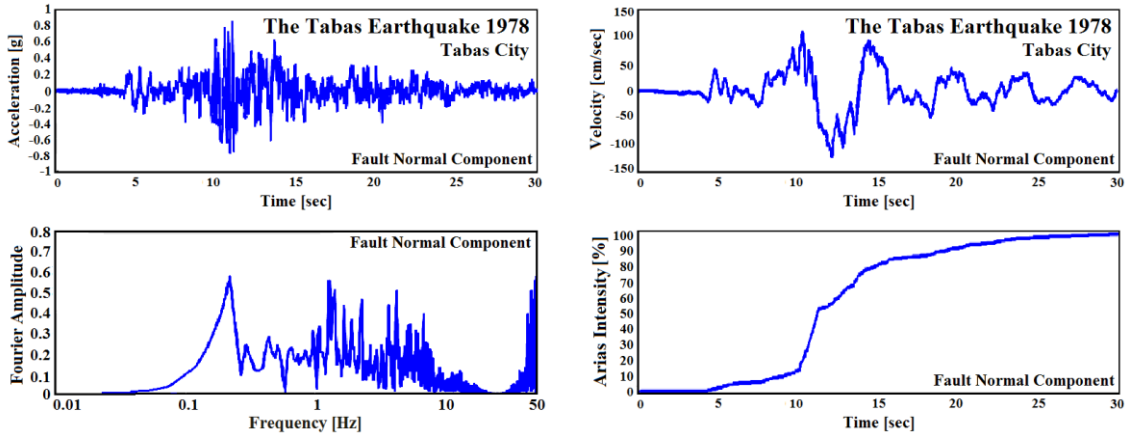
[۱] Noise Frequencies

[۲] Predominant Period

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]



(الف)



(ب)

شکل ۱- تاریخچه زمانی شتاب، سرعت، طیف فوریه و روند تجمعی آزاد شدن انرژی رکورد اصلی زلزله Tabas 1978 ، (الف) مولفه موازی نسبت به صفحه گسیختگی گسل (مولفه LN) ، (ب) مولفه عمود نسبت به صفحه گسیختگی گسل (مولفه TR)

شایان ذکر است که مولفه افقی موازی با راستای صفحه گسیختگی (شکست) گسل، با نماد LN نامیده شده و مولفه عمود بر جهت صفحه مذکور نیز با نشانه TR معرفی می‌شود. همچنین، موقعیت ثبت رکوردها تا فاصله کمتر از ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر نسبت به صفحه فوق به عنوان معیار حوزه نزدیک انتخاب شده است. مطابق با شکل (۱) در تاریخچه زمانی هر دو مولفه LN و TR از رکورد نیرومند TAB تعداد زیادی اسپایک‌های پردامنه شتاب وجود دارد. یک پالس پیوسته و بسیار بلند مدت در تاریخچه زمانی سرعت مربوطه به هر دو مولفه افقی از رکورد مذکور مشاهده می‌شود. بازه زمانی موجک اصلی در پالس بزرگ سرعت مربوط به مولفه LN از حدود محور زمانی ۷ ثانیه تا ۱۵ ثانیه ادامه دارد و ساختار مشابه برای مولفه TR نیز با ماهیت فیزیکی به طور مشخص بزرگ‌تر، در بازه زمانی ۷ تا ۱۷ ثانیه دیده می‌شود. همچنین یک تعداد اسپایک‌های سرعت با دامنه به نسبت بزرگ تا حدود ۵۰ سانتیمتر بر ثانیه نیز در چند ثانیه پیش و پس از موجک اصلی هر دو پالس بزرگ سرعت مذکور وجود دارد.

شکل (۱) نشان می‌دهد که تاثیرات آزاد شدن انرژی رکورد نیرومند TAB متاثر از فرایند نیرومند جهت‌داری پیشرو در طی بازه زمانی هر دو پالس سرعت بزرگ و پیوسته مذکور، می‌تواند سبب وقوع اثرات تشدید یافته انتشار امواج لرزه‌ای در ساختمان‌های با پریود بلند شده و ایجاد مکانیزم‌های گسترده غیرخطی در المان‌های سازه را در پی داشته باشد. نکته

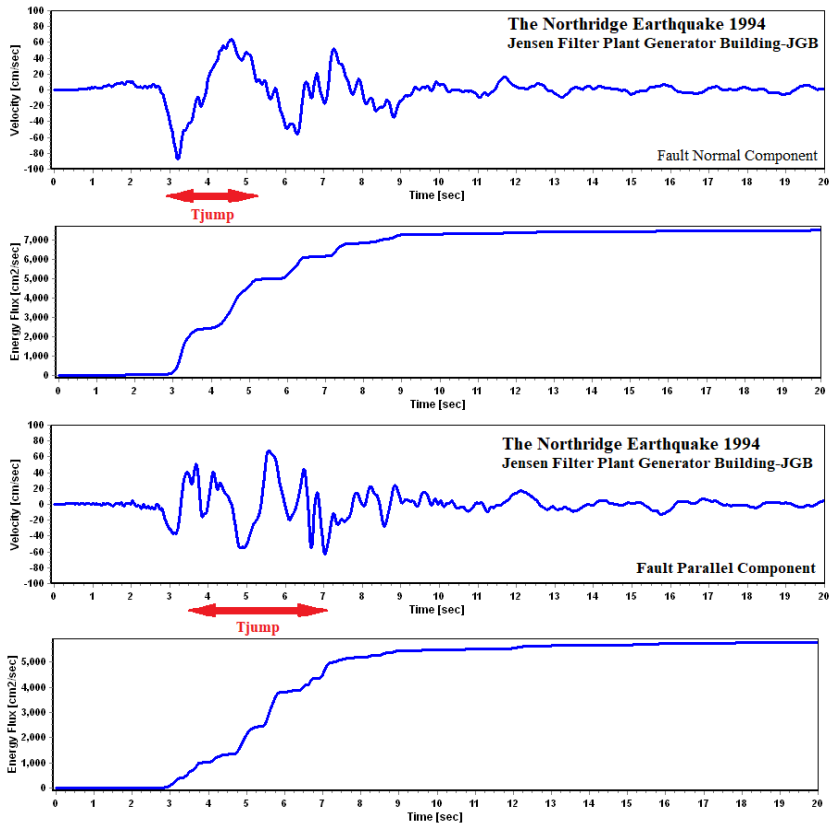
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

مهم دیگر آن است که روند تغییرات شدت آریاس برای هر دو مولفه افقی رکورد با یک شیب طولانی و همراه با یک پرش پلکانی بزرگ در محدوده پالس بزرگ سرعت اتفاق می‌افتد. این بازه زمانی با محدوده مربوط به بزرگ‌ترین و پردامنه‌ترین اسپایک‌های شتاب نیز تطابق دارد. مطابق با نمایش طیف‌های فوریه در شکل (۱)، فرکانس‌های توصیف‌کننده پالس پیوسته سرعت شامل بسامد متناظر با موجک بزرگ اصلی و مجموعه تواترهای مربوط به اسپایک‌های پردامنه، بصورت هم ارز با یک باند محدود است. بطور معمول بیشتر فرکانس‌های پرانرژی نیز در بازه ۰/۱ هرتز تا کمتر از ۵ هرتز ملاحظه می‌شوند و مجموعه آنها نمایش‌دهنده یک ساختار ترکیبی متشکل از موجک‌های سینوسی با فرکانس متفاوت می‌باشند.

۳- شتاب‌نگاشت‌های نیرومند حوزه نزدیک

رکوردهای حوزه نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیشرو توسط پارامترهای وابسته به انرژی جنبشی و دامنه تغییرات آن، حداکثر سرعت و شتاب زمین بررسی می‌شوند. در این مقاله به بررسی طیف‌های پاسخ یک مجموعه شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک حاوی پالس پیوسته سرعت و اثرات جهت‌داری پیشرو، ثبت شده از دو زلزله معروف نورثریج (۱۹۹٤) و امپریال‌ولی(۱۹۷۹) کالیفرنیا و همچنین طبس ۱۹۷۸، بم ۲۰۰۳ ایران پرداخته شده است. بر اساس مطالعه صورت گرفته در مبحث فوق، ملاحظه شد که بازه متناظر با گام زمانی پرش ایجاد شده در روند آزاد شدن انرژی رکورد، بر مبنای محاسبه تفاوت محل شروع تا پایان پرش بزرگ پلکانی در نمودار تجمعی مربوطه تعیین می‌شود. توصیف این موضوع در شکل (۲) برای رکورد حوزه نزدیک JGB از زلزله نورثریج مشهود است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]



شکل ٢- نمودار تاریخچه زمانی سرعت، روند تجمعی آزاد شدن انرژی جنبشی و نمایش گام زمانی پرش (Tjump) برای دو مولفه افقی رکورد ایستگاه JGB از زلزله نورتریج ١٩٩٤

نکته دیگر آن که به دلیل تفاوت نسبی میان سهم انرژی حمل شده توسط موجک‌های فرکانس پایین موجود در یک پالس پیوسته سرعت و نیز اسپایک‌های پردامنه پس از آن، طول گام زمانی پرش در بسیاری از موارد، کمی بیشتر از پریود بزرگ‌ترین موجک در پالس اصلی سرعت می‌باشد. داده‌های استفاده شده از پایگاه PEER[١] در ١٦ ایستگاه گرفته شده و ویژگی‌های فیزیکی آنها در جدول‌های ١ تا ٣ آورده شده است [١٩].

جدول ١ – مشخصات رکوردهای انتخابی زلزله امپریال‌ولی ١٩٧٩

Event	Station	PGA (g)		PGV (cm/s)		Energy (LN/TR)
		LN	TR	LN	TR	
Imperial Valley 1979	El Centro Array #4 - 7.05 km	0.51 0.5≤PGA<0.75	0.39 0.25≤PGA<0.5	39.44 40<PGV<85	74.82 40<PGV<85	0.24 0.25≤LN/TR<0.5
	El Centro Array #5 - 3.95 km	0.53 0.5≤PGA<0.75	0.40 0.25≤PGA<0.5	50.75 40<PGV<85	84.78 40<PGV<85	0.40 0.25≤LN/TR<0.5
	El Centro Array #6 – 1.35 km	0.39 0.25≤PGA<0.5	0.44 0.25≤PGA<0.5	63.02 40<PGV<85	84.16 40<PGV<85	0.33 0.25≤LN/TR<0.5
	El Centro Array #7 – 0.56 km	0.32 0.25≤PGA<0.5	0.49 0.25≤PGA<0.5	38.73 40<PGV<85	76.07 40<PGV<85	0.31 0.25≤LN/TR<0.5
		0.64	0.44	41.95	49.15	0.82

[١] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

	El Centro Array #8 – 3.86 km	0.5≤PGA<0.75	0.25≤PGA<0.5	40<PGV<85	40<PGV<85	0.75≤LN/TR<1
	El Centro Array #10 – 8.6 km	0.20 0.25≤PGA<0.5	0.18 0.25≤PGA<0.5	41.84 40<PGV<85	43.82 40<PGV<85	0.50 0.5≤LN/TR<0.75

جدول ۲- مشخصات رکوردهای انتخابی زلزله نورثریج ۱۹۹٤

Event	**Station**	**PGA (g)**		**PGV (cm/s)**		**Energy (LN/TR)**
		LN	**TR**	**LN**	**TR**	
Northridge 1994	**Jensen Filter Plant Administrative Building (JEN) – 5.43 km**	0.60 0.5≤PGA<0.75	0.43 0.25≤PGA<0.5	95.362 85<PGV<135	83.813 40<PGV<85	0.95 0.75≤LN/TR<1
	Jensen Filter Plant Generator Building (JGB) – 5.43 km	1.01 0.75≤PGA<1	0.54 0.5≤PGA<0.75	67.880 40<PGV<85	87.762 85<PGV<135	0.77 0.75≤LN/TR<1
	LA - Sepulveda VA Hospital (SPV) – 8.44 km	0.77 0.75≤PGA<1	0.96 0.75≤PGA<1	84.000 40<PGV<85	64.454 40<PGV<85	0.88 0.75≤LN/TR<1
	Newhall - Fire Sta (NWH) – 5.92 km	0.63 0.5≤PGA<0.75	0.68 0.5≤PGA<0.75	60.280 40<PGV<85	86.387 85<PGV<135	0.48 0.25≤LN/TR<0.5
	Newhall - W Pico Canyon Rd. (WPI) – 5.48 km	0.34 0.25≤PGA<0.5	0.45 0.25≤PGA<0.5	66.572 40<PGV<85	102.948 85<PGV<135	0.39 0.25≤LN/TR<0.5
	Pardee - SCE (PAR) – 7.46 km	0.28 0.25≤PGA<0.5	0.55 0.5≤PGA<0.75	54.905 40<PGV<85	74.800 40<PGV<85	0.71 0.5≤LN/TR<0.75
	Rinaldi Receiving Sta (RRS) – 6.5 km	0.54 0.5≤PGA<0.75	0.97 0.75≤PGA<1	67.131 40<PGV<85	135.364 85<PGV<135	0.53 0.5≤LN/TR<0.75
	Sylmar Converter Sta (SCS) – 5.35 km	0.98 0.75≤PGA<1	0.63 0.5≤PGA<0.75	83.431 40<PGV<85	112.646 85<PGV<135	0.57 0.5≤LN/TR<0.75
	Sylmar Converter Sta East (SCE) – 5.19 km	0.42 0.25≤PGA<0.5	0.96 0.75≤PGA<1	61.824 40<PGV<85	101.439 85<PGV<135	0.44 0.25≤LN/TR<0.5
	Sylmar Olive View Med FF (SYL) – 5.30 km	0.62 0.5≤PGA<0.75	0.85 0.75≤PGA<1	64.737 40<PGV<85	108.801 85<PGV<135	0.52 0.5≤LN/TR<0.75

LN: Fault Parallel Component, TR: Fault Normal Component

جدول ۳- مشخصات رکوردهای انتخابی زلزله‌های ایران

Event	**Station**	**PGA (g)**		**PGV (cm/s)**		**Energy (LN/TR)**
		LN	**TR**	**LN**	**TR**	
Tabas 1978	**Tabas (TAB)- 3.00 km**	0.82 0.75≤PGA<1	0.93 0.75≤PGA<1	99.21 85<PGV<135	111.30 85<PGV<135	0.42 0.25≤LN/TR<0.5
Bam 2003	**Bam (BAM)- 1.00 km**	0.58 0.5≤PGA<0.75	0.78 0.75≤PGA<1	62.52 40<PGV<85	109.57 85<PGV<135	0.38 0.25≤LN/TR<0.5

LN: Fault Parallel Component, TR: Fault Normal Component

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

٤- معیارهای بررسی طیف‌های پاسخ

به طور معمول در ساختار نگاشت رکوردهای ثبت شده از حرکات نیرومند زمین در حوزه نزدیک به گسل، یک پالس مشخص با پریود و دامنه بزرگ مشاهده می‌گردد و این فرآیندها، رکوردهای پالس‌گونه نامیده می‌شوند. شایان ذکر است که رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک ثبت شده در یک ایستگاه لرزه نگاری تحت جهات مختلف نسبت به صفحه گسیختگی گسل، نمایش دهنده اثرات متفاوتی از فرایند جهت‌داری و پالس‌های پیوسته هستند. نکته دیگر آن که مدت زمان افزایش انرژی جنبشی از مقدار کم به زیاد با عنوان "گام زمانی پرش" در روند آزاد شدن انرژی سنجیده شده و متناظر با محدوده زمانی پالس بزرگ سرعت و اسپایک‌های پردامنه دو سوی آن است. در این خصوص، نسبت انرژی جنبشی مولفه افقی موازی با صفحه شکست گسل (مولفه LN) به مولفه عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR) در کل زمان شتاب‌نگاشت را می‌توان به عنوان یک معیار مناسب برای دسته‌بندی میزان و اندازه قدرت رکوردهای حوزه نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیشرو در نظر گرفت. بر اساس طبقه‌بندی صورت گرفته در این مقاله، رکوردهایی که دارای نسبت انرژی دو مولفه افقی (LNوTR) بین ۰/۲۵ تا ۰/۵۰ باشند، شتاب‌نگاشت نیرومند[1] نامیده می‌شوند. همچنین رکوردهای دارای نسبت انرژی ۰/۵۰ تا ۰/۷۵ شتاب‌نگاشت قدرتمند[2] و رکوردهای دارای نسبت انرژی بین ۰/۷۵ تا ۱ نیز از نوع بسیار پرانرژی[3] طبقه بندی می‌گردند. در این تحقیق، طبقه‌بندی شتاب‌نگاشت‌ها با معیار انرژی جنبشی (معیار نسبت انرژی) و با تمرکز بر نسبت عددی دو مقدار مربوط به مولفه‌های افقی رکورد می‌باشد. همچنین تاکید می‌شود که از تفاوت موجود در ساختار فیزیکی موجک‌ها و اسپایک‌های[4] سرعت صرف نظر شده است.

یکی از پیچیده‌ترین چالش‌ها در موضوع ارزیابی طرح سازه، انتخاب رکوردهای بحرانی زلزله جهت بررسی دامنه حداکثر پاسخ اسکلت مقاوم با توجه به تعریف معیارهای مختلف نیاز لرزه‌ای می‌باشد. مشخصات رکوردهای حوزه نزدیک با پارامترهایی مانند PGA ، PGV ، انرژی جنبشی و شدت آریاس شناخته می‌شوند. قدرتی و منوچهری (۲۰۰۵) به این نتیجه رسیدند که اگر حداکثر سرعت زمین دارای مقدار بزرگی باشد، پارامترهای دیگر مانند حداکثر شتاب، حداکثر جابجایی زمین و همچنین شاخص شدت آریاس نیز دارای مقادیر به نسبت زیاد خواهد بود [۲۰]. بر این اساس، در تحقیق حاضر نیز دو گروه سرعت بین ۸۵ تا ۱۳۵ و ٤۰ تا ۸۵ (سانتیمتر بر ثانیه) جهت بررسی تحلیلی مربوطه و توجه به ماهیت رکوردهای بحرانی انتخاب شدند. رکوردهای حوزه نزدیک حاوی اثرات جهت‌داری پیشرو، دارای مولفه افقی عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR) با معیار PGV بیشتر و بزرگ‌تری نسبت به مقدار متناظر برای مولفه موازی با صفحه شکست گسل (مولفه LN) می‌باشند. با این توصیف، تنها ۸ مولفه از رکوردهای انتخابی زلزله نورثریج و هر سه مولفه رکوردهای ایران دارایPGV بیش از ۸۵ سانتیمتر بر ثانیه بوده و بیشتر رکوردهای انتخابی نیز در دسته ٤۰ تا

[1] Strong Record

[2] Powerful Record

[3] Surpassing Powerful Record

[4] Spike

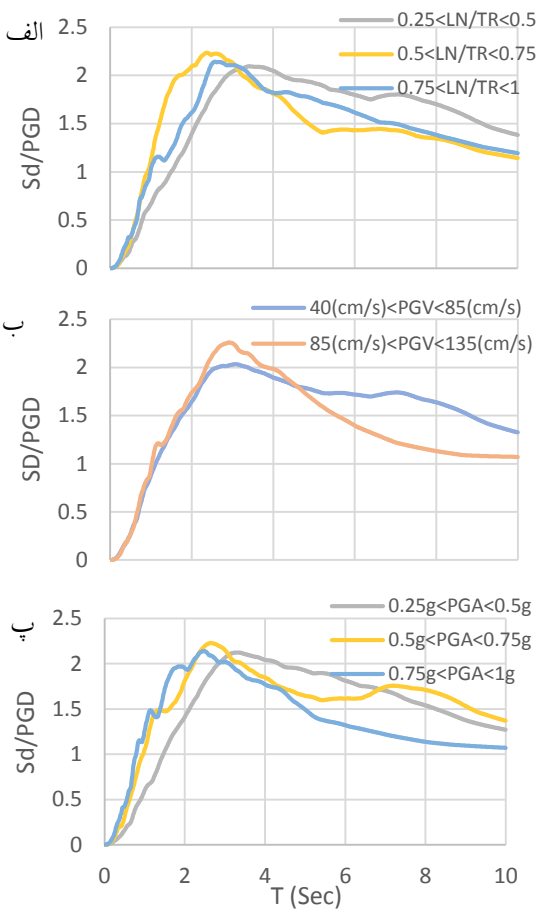
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

۸۵ سانتیمتر بر ثانیه قرار می‌گیرند. پارامتر حداکثر شتاب زمین (PGA) به دلیل عدم وابستگی به عمود یا موازی بودن مولفه زلزله نسبت به صفحه شکست گسل (TR یا LN) انتخاب مناسبی جهت بررسی طیف‌های پاسخ می‌باشد. رکوردهای حوزه نزدیک دارای PGA به مراتب بزرگتری نسبت به رکوردهای حوزه دور هستند. بر پایه سازمان این تحقیق، رکوردهای انتخابی بر مبنای حداکثر شتاب زمین به سه گروه $0.75g<PGA<1g$ ، $0.5g<PGA<0.75g$ و $0.25g<PGA<0.5g$ دسته بندی شدند.

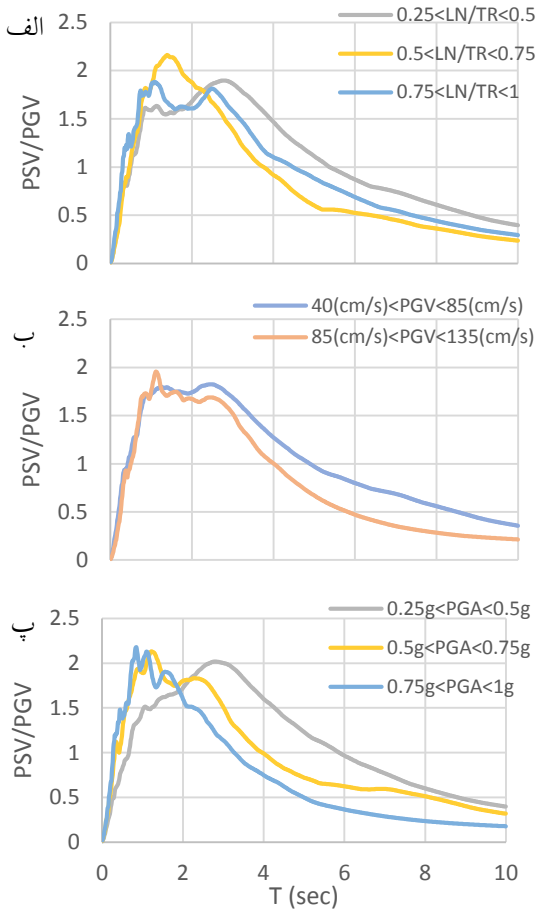
۵- طیف‌های پاسخ نرمال

شکل ۳ طیف‌های میانگین پاسخ جابجایی (طیف Sd با نماد DS) افراز شده نسبت به PGD را برای هر سه معیار سنجش به ترتیب نسبت انرژی جنبشی، PGV و PGA نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۳-الف، در پریودهای کمتر از ۱ ثانیه دو گروه شتاب‌نگاشت‌های قدرتمند و بسیار پرانرژی دارای مقادیر طیفی یکسانی در طیف پاسخ جابجایی نرمال (با نماد NDS) هستند. با افزایش پریود از شیب نمودار شتاب‌نگاشت‌های بسیار پرانرژی کاسته شده و مقادیر طیفی این گروه‌ها کمتر از شتاب‌نگاشت‌های قدرتمند می‌شوند. همچنین، در پریود حدود ۲/۲ ثانیه شیب نمودارهای سه گروه شتاب‌نگاشت‌ها بصورت کاهنده است، به طوری که در پریود ۳/۲٦ ثانیه سه نمودار با یکدیگر برخورد دارند. در ناحیه پریودهای بزرگ، بیشترین مقادیر طیفی در شتاب‌نگاشت‌های نیرومند مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۳-ب، شتاب‌نگاشت‌های با بیشینه سرعت زمین بیش از ۸۵ و کمتر از ۱۳۵ سانتیمتر بر ثانیه دارای مقادیر به نسبت یکسان در طیف پاسخ جابجایی نرمال هستند. هر دو گروه مذکور دارای مقادیر بیشینه طیف پاسخ جابجایی (با نماد DS) در پریود حدود ۲/۸ ثانیه هستند. در بازه پریودی بیش ٤/۷ ثانیه نیز ابتدا یک روند واگرایی مقادیر طیفی رخ داده و سپس در پریودهای بزرگ، نمودی از همگرایی در مقادیر طیفی مشاهده می‌شود. نتایج معیار سنجش PGA (شکل ۳-پ)، نیز نمود مشابهی با نتایج معیار سنجش نسبت‌های انرژی جنبشی دو مولفه افقی LN/TR دارد. همچنین، در پریودهای کمتر از ۱/٤ ثانیه دو گروه شتاب‌نگاشت‌های با PGA بیش از ۰/۵g و بیش از ۰/۷۵g، دارای انطباق نسبی مقادیر طیفی می‌باشند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]



شکل ٣- طیف پاسخ جابجایی نرمال، (با نماد NDS)



شکل ٤- طیف پاسخ شبه سرعت نرمال، (با نماد NPVS)

با توجه به شکل ٣ و بررسی سه معیار سنجش، تاثیر ماهیت راندوم یک رکورد در ساختار طیفی نمودارهای طیف پاسخ جابجایی نرمال (با نماد NDS) با نمودی متفاوت در بازه پریودهای بالا (فرکانس‌های پایین) ملاحظه می‌شود. یک عامل مشخص این روند مربوط به وجود ساختارهای مختلف اسپایک‌های سرعت می‌باشد. شکل ٤ نشان دهنده انطباق نسبی مقادیر طیفی متناظر با پریودهای کوچکتر از ١ ثانیه در طیف پاسخ شبه سرعت نرمال (با نماد NPVS) می‌باشد. با حرکت به سمت پریودهای بزرگتر شتاب‌نگاشت‌هایی که دارای پارامترهای ضعیف‌تری هستند. مقادیر طیفی بزرگتری را نشان می‌دهند. نتیجه جامع حاصل از مقایسه نمودارهای طیف پاسخ شبه سرعت نرمال با معیارهای سنجش مختلف (شکل‌های٣ و٤) بیان‌گر آن است که برای پریودهای بزرگ، تغییر مقادیر طیفی به شدت راندوم بوده و غیرقابل پیش‌بینی است. شایان ذکر است که روند تغییرات گروه‌های مختلف معیارهای سنجش (نسبت انرژی جنبشی دو مولفه افقی، PGV و PGA) نیز تابع مستقیم خصوصیات طیفی انواع پالس‌های سرعت نمی‌باشد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

٦- طیف پاسخ نرمال دوسویه با معیار پریود غالب T_p

با توجه به شکل ٥-الف، تاثیرات ناشی از رکوردهای نیرومند در طیف پاسخ نرمال دوسویه با معیار پریود غالب (معیار Tp)، دارای روند افزایشی یکنواختی می‌باشد. توضیح آنکه رکوردهای قدرتمند و بسیار پرانرژی با شیب زیادی در ناحیه نسبت پریودی کمتر از ۱ شروع شده و با افزایش نسبت پریودی از شیب نمودار کاسته شده و نمودارهای دو گروه در پریودهای بزرگ، به مقدار طیفی حدود ۱/٥ همگرا می‌شوند. بر اساس معیار سنجش PGV (شکل ٥-ب)، رکوردهای با پارامتر بیشینه سرعت بیش از ۸٥ سانتیمتر بر ثانیه، دارای بیشترین مقادیر طیفی در طیف پاسخ جابجایی نرمال دوسویه[۱] با معیار Tp هستند. نمودارهای مربوط به هر دو گروه رکوردهای دسته شده بر مبنای PGV در نسبت پریودی برابر ۱۰ همگرا می‌شوند. شکل ٥-پ نمایش‌دهنده ساختار متمایز طیف پاسخ BNDS با معیار پریود غالب Tp در گروه رکوردهای با PGA بزرگتر از ۰/۷٥g است. همچنین روند به نسبت یکسان برای افزایش مقادیر طیفی متناظر با نسبت‌های پریودی کوچکتر از ٦ در دو گروه دیگر رکوردهای مطالعاتی مشاهده می‌شود.

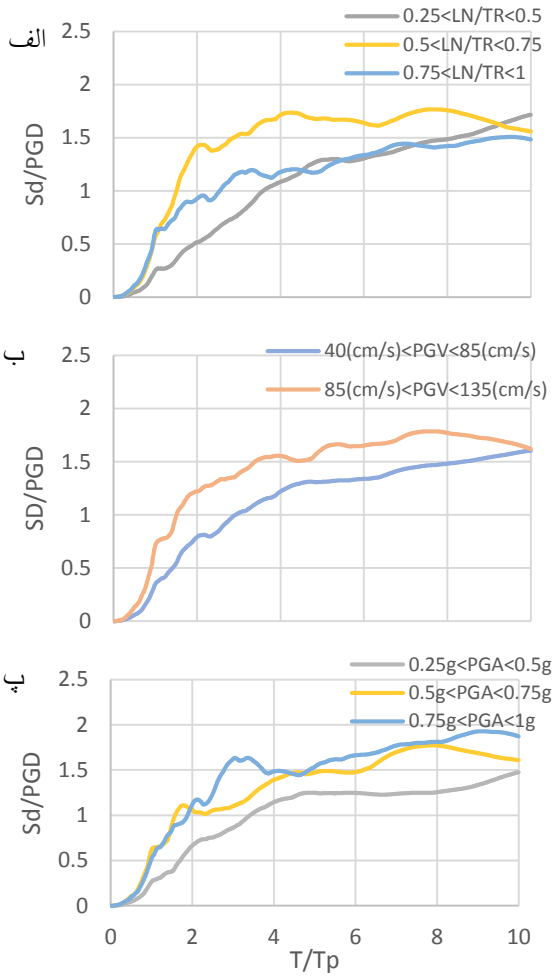
شکل ٦-الف نشان دهنده پراکندگی بسیار اندک مقادیر میانگین طیفی متناظر با پریودهای کوچکتر از ۱ ثانیه در طیف پاسخ شبه سرعت نرمال (با نماد NPVS) و نسبت‌های پریودی کمتر از ۱ در طیف پاسخ شبه سرعت نرمال دوسویه[۲] با معیار Tp است. طیف پاسخ مذکور، در محدوده نسبت‌های پریودی ۱ تا ٤ دارای پراکندگی داده‌ها می‌باشد، این مسئله مبین حساسیت مقادیر طیف پاسخ شبه سرعت به پریود غالب Tp در این ناحیه است. با افزایش نسبت پریودی نیز مقادیر طیفی دارای روند یکنواختی شده و یک شیب بسیار اندک کاهشی را دارا می‌باشد.

طیف‌های میانگین پاسخ شبه سرعت نرمال دوسویه (با نماد BNPVS) با معیار Tp برای هر دو گروه شتاب‌نگاشت‌های با PGV کمتر و بیشتر از ۸٥ سانتیمتر بر ثانیه تا نسبت‌های پریودی کمتر از ۲ به صورت موازی افزایش می‌یابند (شکل ٦-ب). نتایج معیار سنجش PGA (شکل ٥-پ و شکل ٦-پ) نمود مشابهی از نتایج معیار سنجش نسبت‌های انرژی جنبشی دو مولفه افقی LN و TR دارند. نتیجه جامع از تحلیل طیف پاسخ نرمال دوسویه با معیار پریود غالب Tp نشان داده شده در شکل‌های ٥ و٦ مبین آن است که حساسیت محاسباتی مولفه طیف BNPVS با معیار Tp، به ویژه در بازه پریودیک نزدیک به پریود غالب Tp افزایش دوچندان می‌یابد. فراز و نشیب‌های طیفی در بازه نسبت پریودی بزرگ‌تر با نمود کمتری بروز پیدا می‌نماید. اضافه می‌شود که خطای محاسباتی ناشی از روند تحلیلی فرمول انتگرال دوهامل، در این پریود برای هر دو تابع سینوس و کسینوس به صورت یکسان است. وجود نماد e با توان منفی، ایجاد یک روند هموارشدن نسبی در نسبت پریودی بالا را در پی دارد.

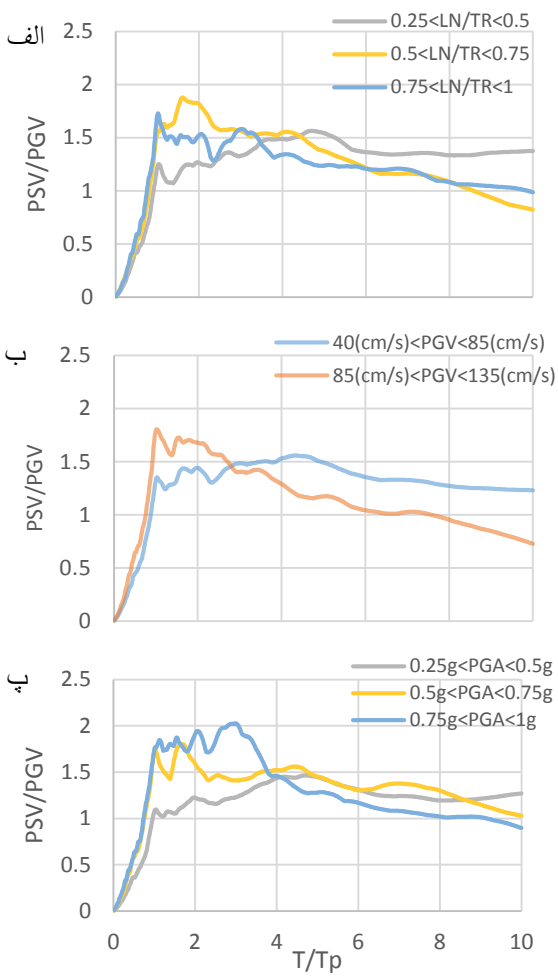
[۱] Bi-Normalized Displacement Spectra (BNDS)

[۲] Bi-Normalized Pseudo Velocity Spectra (BNPVS)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]



شکل ٥- طیف پاسخ جابجایی نرمال دوسویه با معیار پریود غالب Tp ، (با نماد (BNDS(Tp)



شکل ٦- طیف پاسخ شبه سرعت نرمال دوسویه با معیار پریود غالب Tp ، (با نماد (BNPVS(Tp)

٧- طیف پاسخ نرمال دوسویه با معیار گام زمانی پرش[١] T_{jump}

رکوردهای انتخابی از زلزله‌های بزرگ ایران و کالیفرنیای جنوبی، دارای رکوردهای حاوی پالس پیوسته بلند مدت با یک یا چند مقدار اوج سرعت[٢] می‌باشند. رکوردهای حاوی اثرات جهت‌داری پیشرو قسمت بزرگی از انرژی جنبشی زلزله را در ساختار یک یا دو پالس مشخص و به طور ناگهانی به ساختگاه وارد می‌کنند. نکته دیگر آن که مولفه افقی ثبت شده در جهت عمود بر گسل (مولفه TR)، بطور معمول حاوی انرژی جنبشی بیشتری نسبت به مولفه افقی ثبت شده در جهت موازی (مولفه LN) با صفحه شکست گسل است [٢١و٢٢].

شایان توجه است که در سازمان علمی این تحقیق، بازه زمانی مربوط به افزایش شدید روند آزاد شدن انرژی جنبشی از مقدار کم به مقدار زیاد، تا گذر از اسپایک‌های پردامنه پس از پالس پیوسته سرعت، با معیار گام زمانی پرش (T_{jump}) توصیف شده است. تعریف این پارامتر نیز بر حسب توجه به وجود ساختارهای پرش پلکانی در نمودار تجمعی آزاد

[١] Jump up Domain

[٢] Peak Velocity

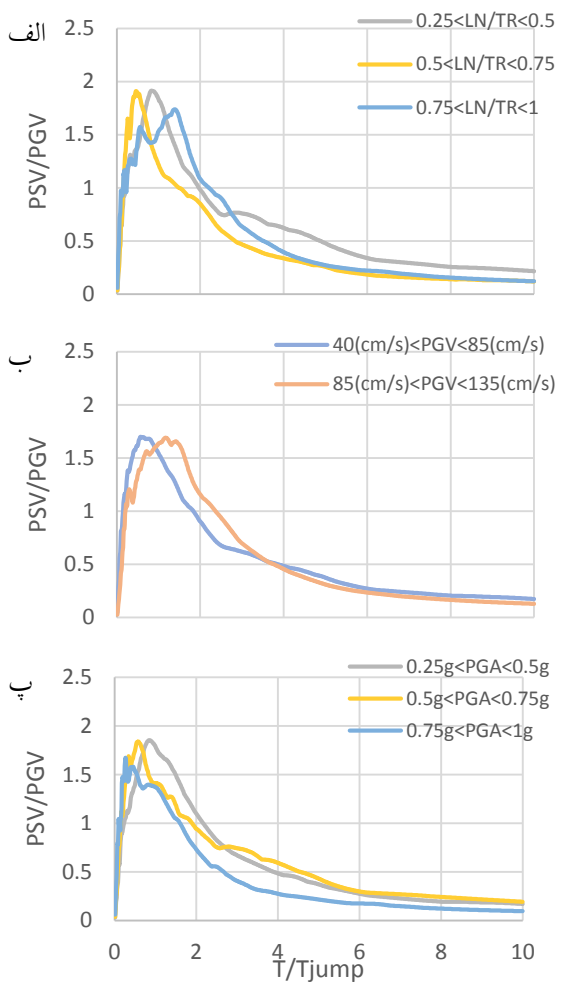
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

شدن انرژی جنبشی است. بدین لحاظ، یک هم ارزی موضوعی میان گام زمانی پرش (T_{jump}) و پریود پالس پیوسته سرعت (T_{pulse}) وجود دارد. با توجه به تعریف گام زمانی پرش، بازه زمانی مربوط به T_{jump} بطور نسبی از پریود بزرگ‌ترین موجک اصلی در پالس ترکیبی سرعت، بیشتر است. همچنین، T_{jump} با توجه به عدم پوشش اسپایک‌های کم دامنه در دو بخش پیش و بویژه پس از پالس اصلی سرعت، دارای بازه زمان کوچکتری نسبت به T_{pulse} می‌باشد. طول پالس پیوسته سرعت، دربرگیرنده بازه زمانی از شروع روند تدریجی آزاد شدن انرژی جنبشی با شیب بسیار کم (متناظر با اسپایک‌های کوچک پیش از موجک اصلی پالس سرعت) تا اسپایک‌های پردامنه پس از آن است. بدین ترتیب، علاوه بر پوشش بازه زمانی موجک (یا موجک‌های) اصلی پالس سرعت، هر دو محدوده مربوط به سهم انرژی اسپایک‌های پردامنه و با گام زمانی ۰/۱ تا ۰/۵ ثانیه نیز لحاظ می‌شود. بر این اساس، پارامتر T_{jump} برای محاسبه طیف پاسخ نرمال دوسویه بکار برده شده است.

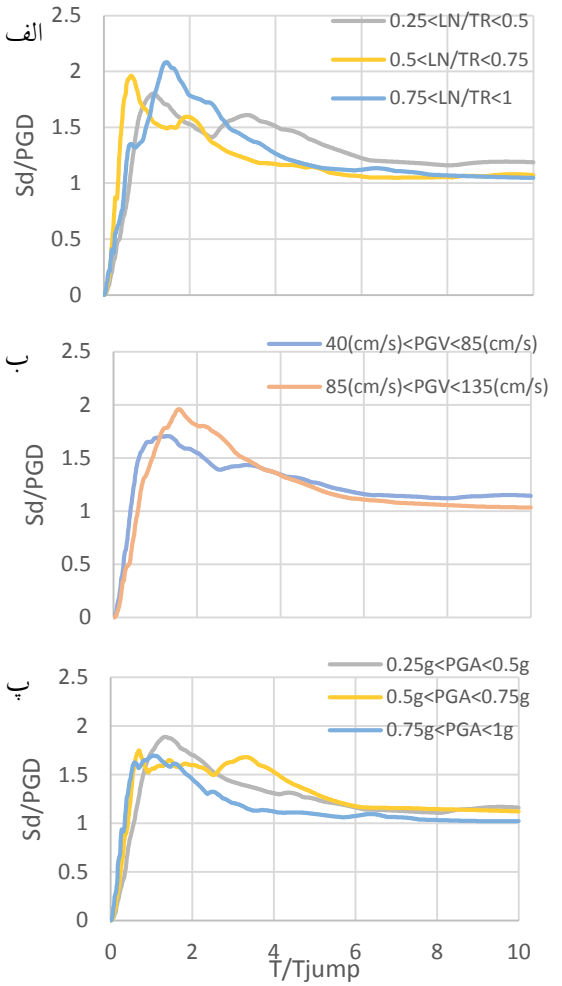
ساختار طیف پاسخ جابجایی با معیار گام زمانی پرش (T_{jump}) مربوط به دسته‌بندی‌های مختلف شتاب‌نگاشت‌ها با شیب زیادی در نسبت‌های پریودی کوچک افزایش می‌یابند. نمود تحلیلی این مسئله نیز پیدایش اکسترمم مطلق در طیف پاسخ جابجایی نرمال دوسویه با معیار T_{jump} است (شکل ۷). بر پایه شکل ۷–الف شتاب‌نگاشت‌های بسیار پرانرژی، قدرتمند و نیرومند به ترتیب دارای بیشترین مقادیر طیفی در نسبت‌های پریودی حدود ۱/۵، ۰/٥٤ و ۱/۱٦ می‌باشند. شکل ۷–ب نشان می‌دهد که مقادیر طیفی هر دو گروه شتاب‌نگاشت‌ها بر مبنای PGV ، دارای حداقل پراکندگی داده‌ها در طیف پاسخ جابجایی نرمال دوسویه با معیار T_{jump} می‌باشند. با توجه به شکل ۷–پ، مقادیر طیفی با معیار PGA در نسبت‌های پریودی کمتر از ۰/۵ و بیشتر از ٦ به یکدیگر همگرا شده اند. رکوردهایی با بیشینه شتاب بزرگ‌تر از ۰/۷۵g در نسبت پریودی ۰/۵ تا ۲/٦ دارای حداکثر مقادیر طیفی می‌باشند. با افزایش نسبت پریودی تا محدوده ٦، شتاب نگاشت‌هایی با مشخصه ۰/۵g<PGA<۰/۷۵g بزرگترین مقادیر طیفی را دارند.

شکل ۸ نشان می‌دهد که طیف پاسخ شبه سرعت نرمال دوسویه با معیار T_{jump} دارای مقادیر بیشینه در نسبت‌های پریودی ۰/۵۰ تا ۱/۵۰ می‌باشد. یک همگرایی مقادیر طیفی در نسبت‌های پریودی بزرگ‌تر مشاهده می‌شود، به گونه‌ای که در نسبت‌های پریودی بزرگتر از حدود ٤ دو نمودار طیفی شتاب‌نگاشت‌های قدرتمند و بسیار پرانرژی بر یکدیگر منطبق شده‌اند (شکل ۸–الف). همچنین با در نظرگرفتن معیارهای سرعت (PGV) و شتاب (PGA) نیز یک انطباق نسبی مقادیر طیفی متناظر با دسته‌بندی‌های مختلف شتاب‌نگاشت‌ها مشاهده می‌شود. در محدوده ۰/۸٤ تا ۳ بزرگترین مقادیر طیفی را رکوردهایی با مشخصه PGV بیشتر از ۸۵cm/s به خود اختصاص داده‌اند. همچنین شتاب نگاشت‌هایی با PGA کمتر از ۰/۵g، حداکثر مقادیر طیف پاسخ شبه سرعت نرمال دوسویه با معیار گام زمانی پرش (T_{jump}) را در فاصله نسبت پریودی ۰/۸٤ تا ۲/٤ دارا می‌باشند (شکل ۸–ب وپ). با توجه به دو شکل ۷ و۸، در نظر گرفتن گام زمانی پرش T_{jump} جهت نرمال‌کردن محور افقی طیف پاسخ، سبب کاهش اثرات تغییرات پارامترهای سنجشی مختلف در ساختار طیف پاسخ جابجایی و سرعت شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]



شکل ٨- طیف پاسخ شبه سرعت نرمال دوسویه با معیار گام پرش زمانی T_{jump}، (با نماد BNPVS(Tjump)



شکل ٧- طیف پاسخ جابجایی نرمال دوسویه با معیار گام پرش زمانی T_{jump}، (با نماد BNDS(Tjump)

٨- نتیجه‌گیری

این مطالعه به پژوهش درباره ساختار تحلیلی طیف‌های پاسخ نرمال و نرمال دوسویه با تاکید بر پریود غالب شتاب (T_p) و طول گام زمانی پرش (T_{jump})، متناظر با رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک پرداخته است. تبیین مباحث یاد شده بر اساس سه پارامتر نسبت انرژی جنبشی دو مولفه افقی (LN و TR)، حداکثر سرعت زمین (PGV)، حداکثر شتاب زمین (PGA) متناظر با رکوردهای حوزه نزدیک دارای پالس سرعت بررسی شد. دامنه و پریود پالس و تعداد موجک‌های پالس سرعت، مشخصه اصلی رکوردهای حوزه نزدیک می‌باشند. نمودهای متفاوت در ساختار و چینش موجک‌ها در داخل گام زمانی پالس و نیز آرایش اسپایک‌های تاریخچه زمانی سرعت، با نبود یک روند مشخص و همچنین راندوم بودن مقادیر طیفی بویژه در محدوده پریود غالب، در طیف‌های پاسخ جابجایی و شبه سرعت نرمال و نرمال دوسویه ساخته شده با معیار مذکور ملاحظه می‌شود. با توجه به ساختار انتگرال دوهامل، خطای عددی متاثر از دو تابع سینوس و کسینوس در محاسبه طیف پاسخ نرمال دوسویه با معیار پریود غالب یکسان است. همچنین، یکنواختی نسبی مقادیر طیفی در محدوده نسبت‌های پریودی بزرگتر نیز ناشی از اثرات تابع نمایی e با توان منفی می‌باشد. همچنین ملاحظه شد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

که روند هموار شدن نسبی در نسبت‌های پریودی بزرگتر از یک حاصل می‌شود. این تاثیرات به گونه‌ای است که نمی‌توان روندی مشخص در این محدوده طیفی لحاظ نمود.

در نظر گرفتن طول گام زمانی پرش انرژی در پالس پیوسته سرعت جهت نرمال کردن محور افقی طیف پاسخ شبه سرعت، سبب ایجاد یکنواختی و همگرایی نسبی مقادیر طیفی و کاهش اثرات تغییرات پارامترهای سنجشی مختلف در ساختار طیف پاسخ نرمال دوسویه جابجایی و شبه سرعت با معیار مذکور شده است. همچنین طیف پاسخ نرمال دوسویه شبه سرعت با معیار طول گام زمانی پرش انرژی در پالس پیوسته سرعت، دارای مقادیر طیفی بزرگ‌تری در باند متناظر با نسبت‌های پریودی کوچک و متوسط می‌باشد. افزون بر آن، طیف پاسخ نرمال دوسویه جابجایی با معیار پریود غالب مقادیر طیفی بزرگتری را در نسبت پریودی متوسط و بزرگ نشان می‌دهد.

مراجع

1. Pu W., Wu M., Huang B., Zhang H., "Quantification of response spectra of pulse-like near-fault ground motions", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 104 (2018) 117-130.

2. Tehranizadeh M., Hamedi F., "Influence of earthquake source parameters and damping on elastic response spectra for Iranian earthquakes", Engineering Structures, Vol. 24, No. 7 (2002) 933-943.

3. Rayhani M. H., El-Naggar M.H., Tabatabaei S.H., "Nonlinear analysis of local site effects on seismic ground response in the Bam earthquake", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 26, No. 1 (2008) 91-100.

4. Pavel F., Vacareanu R., Lungu D., "Bi-normalized response spectra for various frequency content ground motions", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 18, No. 2 (2014) 264-289.

5. Hall J.F., Heaton T.H., Halling M.W., Wald D.J., "Near-source ground motion and its effects on flexible buildings", Earthquake Spectra, Vol. 11, No. 4 (1995) 569-605.

6. Kohrangi M, Vamvatsikos D, Bazzurro P., "Pulse-like versus non pulse-like ground motion records: Spectral shape comparisons and record selection strategies", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 48, No. 1 (2019) 46- 64.

7. Mimoglou P., Psycharis I.N., Taflampas I.M., "Explicit determination of the pulse inherent in pulse-like ground motion", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 43, No. 15 (2014) 2261-2281.

8. Zhao G., Xu L-J., Gardoni P, Xie L., "A new method of deriving the acceleration and displacement design spectra of pulse-like ground motions based on the wavelet multi-resolution analysis", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 119, (2019) 1-10.

9. Ding Y., Peng Y., Li J., "Cluster analysis of earthquake ground-motion records and characteristic period of seismic response spectrum", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 24, No. 6, (2020) 1012-1033.

10. Mavroeidis G.P., Dong G., Papageorgiou A.S., "Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freeedom (SDOF) systems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 33, No. 9 (2004) 1023-1049.

11. Xu L.J., Xie L.L., "Bi-normalized response spectral characteristics of the 1999 Chi-Chi earthquake", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 3, No. 2 (2004) 147-155.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

12. Xu L.J., Xie L.L., "Study on bi-normalized earthquake acceleration response spectra", 13th World Conference on Earthquake Engineering, August 1-6, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 2592 (2004).

13. Xu L.J., Zybhao G., Liu Q., Xie Y., Xie L.L., "Consecutive combined response spectrum", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 13, No. 4 (2014) 623-636

14. Pavel F., Vacareanu R., Neagu C., Pricopie A., "Bi-normalized response spectra and seismic intensity in Bucharest for 1986 and 1990 Vrancea seismic events", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 13, No. 1 (2014) 125-130.

15. Rajasekaran S., "Structural Dynamics of Earthquake Engineering: Theory and Application using Mathematica and Matlab", Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering (2009).

16. Naeim F., "Earthquake ground motion and response spectra", In Mohraz B, Sadek F., The seismic design handbook, Berkeley, California (2001), 47-124.

17. Calvi G.M., "Revisiting design earthquake spectra". Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol. 47, No. 13 (2018) 2627– 2643.

١٨. مرشد شکرچی. ص، مشکوه‌الدینی. ا، «نگرشی بر ساختار تحلیلی طیف پاسخ نرمال دوسویه رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک»، اولین کنفرانس ملی زلزله و مدیریت ریسک با رویکرد آسیب پذیری سازه‌ها و شریان‌های حیاتی، دانشگاه تهران، ایران (١٣٩٧).

19. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Retrieved from http://peer.berkeley.edu/smcat/

20. Ghodrati Amiri G., Manouchehri D., "Introduction of the most suitable parameter for selection of critical earthquake", Computers and Structures, Vol. 83, No. 8-9 (2005) 613-626.

21. Etli S., Güneyisi E.M., "Response of steel buildings under near and far field earthquakes", Civil Engineering Beyond Limits, Turkey, Vol. 2, (2020) 24-30.

22. Khansefid A., "Pulse-like ground motions statistical characteristics, and GMPE development for the Iranian plateau", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 134, (2020) https://doi.org/ 10.1016/j.soildyn.2020.106164

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]