

ارزیابی پالس معادل حرکات پالس گونه در تخمین پاسخ قاب‌های خمشی بتن آرمه

سید روح الله حسینی واعظ^{۱*}، مجتبی جهان آبادی^۲

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

۲- دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

چکیده

در این مطالعه ارزیابی توانایی پالس معادل تولید شده در تخمین پاسخ قاب‌های خمشی بتن آرمه توسط یک مدل ریاضی شبیه‌ساز پالس مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی مدل ریاضی شبیه‌ساز مشخص می‌شود که طیف پاسخ الاستیک پالس‌های شبیه‌سازی شده بوسیله مدل انتخاب شده مطابقت خوبی با طیف پاسخ رکورد واقعی دارد. همچنین تابع مورد استفاده هم به صورت کیفی و هم کمی توانایی مدل‌سازی بخش زمان تناوب بالای رکورد واقعی حرکات پالس گونه را با دقت بالایی دارد. به منظور ارزیابی پالس معادل حرکات پالس گونه در تخمین پاسخ قاب‌های خمشی بتن آرمه، پنج قاب بتن آرمه ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه یکبار تحت رکوردهای واقعی و بار دیگر تحت پالس‌های معادل متناظر آنالیز شده‌اند. جهت ارزیابی، نتایج برش پایه، حداکثر تغییر مکان نسبی و توزیع تغییر مکان نسبی طبقه در ارتفاع سازه در سه سطح شکل پذیری برای قاب‌ها، تحت رکورد واقعی و پالس معادل آن استخراج شدند. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، پالس معادل حرکات پالس گونه در پیش‌بینی پاسخ قاب‌های مورد مطالعه که دوره تناوب آن‌ها نزدیک به پالس معادل یا از آن بیش‌تر است، کارایی لازم را داراست. برای حرکات با محتوای فرکانسی بالا این اختلاف زیاد است؛ که با افزایش تعداد طبقات و نزدیک شدن دوره تناوب پالس به دوره تناوب اصلی سازه و افزایش شکل پذیری پیش‌بینی پاسخ سازه دقیق‌تر می‌شود.

کلمات کلیدی: حرکات پالس گونه، پالس معادل، قاب خمشی، زمان تناوب اصلی، طیف پاسخ الاستیک و غیرالاستیک.

*نویسنده مسئول: سید روح الله حسینی واعظ

پست الکترونیکی: hoseinivaez@qom.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2017.68683.1006

شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.68683.1006>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۱۶

۱- مقدمه

اکثر زلزله‌های اخیر نظیر زلزله‌های نورتریج کالیفرنیا در سال ۱۹۹۴، کوبه ژاپن در سال ۱۹۹۵، ازمیت ترکیه در سال ۱۹۹۹ و بم ایران در سال ۲۰۰۳ نشان می‌دهند که حرکات زمین نزدیک گسل به‌خصوص زمانی که در مناطق پرجمعیت شهری اتفاق می‌افتند، خسارات مالی و جانی زیان‌باری به‌جا می‌گذارند. از این‌رو، وقوع زلزله‌های بزرگ که اثرات نزدیک گسل را نمایان می‌کند، در نواحی شهری امری اجتناب‌ناپذیر است. زمانی که زلزله San Fernando کالیفرنیا در سال ۱۹۷۱ اتفاق افتاد، مهندسين سازه و زلزله اثرات مخرب حرکات نزدیک گسل را بر روی ساختمان‌ها بررسی کردند. در ادامه، وقوع رویدادهای لرزه‌ای نظیر Northridge کالیفرنیا در سال ۱۹۹۴، Kobe ژاپن در سال ۱۹۹۵ خسارات گسترده‌ای به سازه‌های واقع در مجاورت حوزه‌های لرزه‌خیز وارد آوردند و به‌طور قابل توجه‌ای اطلاعات پایه‌ای حرکات نزدیک گسل را افزایش دادند.

زلزله‌های Northridge و San Fernando به‌ترتیب موجب ثبت دو رکورد C02 و PCD در حوزه نزدیک گسل شدند. این رکوردها شامل پالس‌های نیرومند سرعت و تغییرمکان با زمان تناوب نسبتاً طولانی هستند. با توجه به خسارات مهیب ایجاد شده به‌وسیله این زمین‌لرزه‌ها در مناطق پرجمعیت شهری و تفاوت‌های اساسی این زلزله‌ها با رویدادهای معمولی، پدیده‌های نزدیک گسل مورد توجه ویژه از جانب مهندسين و محققین قرار گرفت. محققین دریافتند که وجود ویژگی‌های خاص در حرکات نزدیک گسل پارامترهای مهندسی نظیر شکل‌پذیری، تغییرمکان نسبی، برش‌پایه و... را افزایش می‌دهند. آن‌ها همچنین به نارسایی آئین‌نامه‌ها در لحاظ کردن اثر این‌گونه حرکات اشاره کردند. برخلاف تلاش‌های اولیه، تا قبل از رویدادهای ۱۹۹۴ نورتریج و ۱۹۹۵ کوبه پدیده‌های نزدیک گسل در میان محققان چندان مورد توجه قرار نگرفت. خسارات مهیب ایجاد شده به‌وسیله این زمین‌لرزه‌ها در مناطق پرجمعیت شهری باعث افزایش توجه مهندسين و محققین به پدیده‌های نزدیک گسل شد. بعد از اثرات مخرب زلزله نورتریج کالیفرنیا در سال ۱۹۹۴، توجه گسترده‌ای به شبیه‌سازی حرکات نزدیک گسل و مطالعه پاسخ سازه‌ای به حرکت پالس‌گونه شد. بسیاری از مهندسين و محققین اشکال موجی ساده شده مختلفی را برای بیان پالس‌های حرکت زمین که در مناطق حوزه نزدیک مشاهده شده بود، استفاده کرده‌اند [۱-۸]. مدلی که توسط Mavroeidis و Papageorgiou در سال ۲۰۰۳ پیشنهاد شد [۸]، یک مدل ساده است که تا حدی قادر به نمایش ویژگی‌های طیف پاسخ رکوردهای واقعی نزدیک گسل می‌باشد. مدل آن‌ها یک مدل ساده شده از موجک Gabor می‌باشد به‌نحوی که پوش گوسی (پوش نرمال) موجک Gabor با یک تابع کسینوسی تعویض شده است و زمانی که با یک موج هارمونیک ترکیب می‌شود، پالس مورد نیاز را تولید می‌نماید. در سال ۲۰۰۷، Tian و همکارانش نیز مدلی مشابه با استفاده از موجک Gabor ارائه دادند [۹]. برای تولید پالس حرکات نزدیک گسل مدل‌های دیگری نیز ارائه شده است که یا به‌صورت اشکال موجی ساده شده و یا با استفاده از موجک‌های متداول، پالس مورد نظر تولید گردیده است [۱۰-۱۶].

۱-۱- تاریخچه تحقیقات

اکثر رویدادهای لرزه‌ای اخیر نظیر زلزله‌های نورتریج کالیفرنیا در سال ۱۹۹۴، کوبه ژاپن در سال ۱۹۹۵، ازمیت ترکیه در سال ۱۹۹۹ و بم ایران در سال ۲۰۰۳ نشان می‌دهند که حرکات زمین نزدیک گسل به‌خصوص زمانی که در مناطق پرجمعیت شهری اتفاق می‌افتند، خسارات مالی و جانی زیان‌باری به‌جا می‌گذارند. از این‌رو، وقوع رویدادهای لرزه‌ای بزرگ که اثرات حرکات نزدیک گسل را نمایان می‌کند، در نواحی شهری امری اجتناب‌ناپذیر است.

اولین شواهد لرزه‌شناسی قوی برای پدیده نزدیک گسل توسط Benioff در سال ۱۹۵۵ در حالی که بر روی الگوهای شدت زلزله Kern County کالیفرنیا (۱۹۵۲) مطالعه می‌کرد، گزارش شده است. Benioff نشان داد که انتشار پاره‌شدگی گسل بسته به موقعیت سایت نسبت به ناحیه پاره‌شدگی می‌تواند منجر به انواع مختلف حرکات زمین شود [۱۷]. در سال ۱۹۶۷، Trifunac و Houser اولین کسانی بودند که اثرات نزدیک گسل را در تاریخچه زمانی ایستگاه شماره ۲ (C02) زلزله Parkfield کالیفرنیا (۱۹۶۶) به‌وضوح مشاهده کردند. این رکورد تنها در فاصله ۸۰ متری از شکست گسل ثبت گردید و شامل پالس‌های نیرومند سرعت و تغییرمکان با زمان تناوب نسبتاً طولانی می‌باشد که آن را از زلزله‌های حوزه دور متمایز می‌کند [۱۸]. در سال ۱۹۶۸، Aki در مطالعه خود بر روی تغییرمکان لرزه‌ای نزدیک یک گسل، با

استفاده از یک مدل ساده شده، جابه‌جایی حرکت ثبت شده در ایستگاه شماره ۲ زلزله Parkfield کالیفرنیا را شبیه‌سازی کرد [۱۹]. زلزله سال ۱۹۷۱ San Fernando کالیفرنیا موجب ثبت رکورد PCD شد که مؤلفه سرعت عمود بر امتداد گسل این رکورد خصوصیات پالس‌گونه نشان می‌دهد. بعد از این رویداد تلاش‌های متعددی جهت مدل‌سازی این رکورد توسط محققین صورت گرفت. اهمیت اثرات نزدیک گسل بر سازه‌های مهندسی که در مجاورت گسل فعال قرار دارند بر هیچ‌کس پوشیده نیست. هر زلزله جدیدی که رخ می‌دهد در استانداردهای موجود یک نارسایی را آشکار می‌کند. آگاهی از اهمیت داده‌های اثرات نزدیک گسل به زلزله San Fernando کالیفرنیا در سال ۱۹۷۱ برمی‌گردد، هرچند بازنگری‌های مهم در آئین‌نامه‌ها تا بعد از وقوع زلزله Northridge کالیفرنیا در سال ۱۹۹۴ طول کشید.

زمانی که زلزله San Fernando کالیفرنیا در سال ۱۹۷۱ به وقوع پیوست، مهندسين سازه و زلزله اثرات حرکات نزدیک گسل را بر روی ساختمان‌ها بررسی کردند. در سال ۱۹۷۸، Bertero و همکارانش با مشاهدات شان از این رویداد، دریافتند که ساختمان مرکزی بیمارستان Olive View تحت پالس قوی خسارات شدیدی متحمل شده است. آن‌ها این پالس را به صورت مشخصه‌ای از حرکات نزدیک گسل معرفی کردند. آنالیز خسارات وارده به سازه نشان داد که نقص‌های طراحی و خطاهای ساخت از مهمترین دلایل شکست سازه هستند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که خسارت ایجاد شده به علت محدود سیکل‌های تغییرمکان بزرگ بوده است نه به علت تعداد زیاد نوسانات که در زلزله‌های متداول علت خسارت است. به‌هرحال، الگوهای خسارات کلی و تغییرمکان‌های باقی‌مانده بزرگ پیچیدگی‌هایی را آشکار می‌کند. این پیچیدگی‌ها در پاسخ سازه به پالس‌های بزرگ سرعت حرکات نزدیک گسل که سایت در طول زلزله تجربه می‌کند، نسبت داده می‌شود. آن‌ها همچنین اشاره کردند که ساختمان‌های با زمان تناوب کوتاه که برطبق آئین‌نامه طراحی شده بودند، زمانی که در معرض لرزه‌های نزدیک گسل قرار می‌گیرند، می‌توانند نیازهای شکل‌پذیری بسیار بالایی را تجربه نمایند و نیز بر لزوم یک پروسه طراحی ویژه در نزدیکی گسل‌های فعال تاکید نمودند [۲۰]. وقوع زلزله‌های Northridge کالیفرنیا در سال ۱۹۹۴، Kobe ژاپن در سال ۱۹۹۵، Izmit ترکیه در سال ۱۹۹۹، خسارات گسترده‌ای به سازه‌های واقع در مجاورت حوزه‌های لرزه‌خیز وارد آوردند و به‌طور قابل توجه‌ای اطلاعات پایه‌ای حرکات نزدیک گسل را افزایش دادند. این رویدادها اطلاعات جدیدی درباره رفتار سازه‌های مهندسی که نزدیک به منطقه ثبت رکورد بودند، فراهم کردند. این اثرات نزدیک گسل در لرزش‌های زمین، سازه‌ها را با بارگذاری که در آئین‌نامه‌های طراحی وجود نداشت مواجه کرد. مهندسين سازه ابتدا اثرات نزدیک گسل را بر روی ساختمان‌ها مطالعه کردند و ضرایب طراحی در آئین‌نامه UBC97 اعمال کردند. برخلاف تلاش‌های اولیه، تا قبل از این زلزله‌ها پدیده‌های نزدیک گسل در میان محققین، زیاد مورد توجه قرار نگرفت. خسارات مهیب ایجاد شده توسط این زلزله‌ها در مناطق پرجمعیت شهری باعث افزایش توجه مهندسين و محققین زلزله و سازه به پدیده‌های نزدیک گسل شد.

در سال ۱۹۹۵، Hall و همکارانش تئوری امواج را برای مطالعه پاسخ یک ساختمان برشی پیوسته درمقابل حرکات پالس‌گونه بکار گرفتند. آن‌ها بیان کردند که پالس‌های تغییرمکان حرکات نزدیک گسل، تقاضای تغییرمکان بیشتری به ساختمان‌های بلندمرتبه که براساس آئین‌نامه‌های قبلی طراحی شده‌اند، تحمیل می‌کند. به‌عبارتی به اثرات تخریبی حرکات نزدیک گسل و نارسایی ضوابط آئین‌نامه‌ای در مشخص کردن این مشکل اشاره کردند [۱]. در سال ۱۹۹۷، Iwan ساختمان برشی الاستیک مشابه‌ای را در معرض حرکات نزدیک گسل با مشخصات پالس‌گونه قرار داد. هدف او دستیابی به طیف تغییرمکان نسبی (نمودار حداکثر تغییرمکان نسبی طبقه در مقابل دوره تناوب سازه)، به‌عنوان مقیاس اندازه‌گیری تقاضای لرزه‌ای برای سازه‌های چند درجه آزادی بود. او نشان داد که حتی برای سازه‌های الاستیک نمی‌توان با ضرب ضریب برش پایه در ضریب نزدیک گسل پیشنهاد شده توسط آئین‌نامه ساختمانی (UBC97) اثرات زلزله‌های نزدیک گسل را منظور نمود [۲]. در سال ۱۹۹۹، Malhotra مشخصات پاسخ سه رکورد واقعی و یک رکورد مصنوعی حرکات نزدیک گسل با مشخصات پالس‌گونه را مورد مطالعه قرار داد. او نشان داد حرکات نزدیک گسل با اثرات راستاپذیری تمایل به نسبت بزرگ‌تر حداکثر سرعت زمین به حداکثر شتاب زمین دارند که بر روی مشخصات پاسخ‌شان به‌طور چشمگیر اثر می‌گذارد. همچنین دریافت که زمین لرزه‌هایی با نسبت بالای سرعت حداکثر زمین به شتاب حداکثر زمین محدوده وسیعی از حساسیت شتاب در طیف پاسخ‌شان دارند، از این رو نیازهای شکل‌پذیری، تغییرمکان نسبی طبقات و برش پایه را در ساختمان‌های بلندمرتبه افزایش می‌دهند [۵]. در سال ۱۹۹۹، Anderson و همکارانش عملکرد چندین قاب بتنی بلند با دیواربرشی و قاب‌های فولادی تقویت شده با سیستم‌های مهاربند جانبی را در مقابل حرکات نزدیک گسل مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که وقتی سازه‌هایی با دوره تناوب بزرگ در معرض حرکات پالس‌گونه شدید هستند، استراتژی‌های معمول همچون افزایش سختی

و (یا) مقاومت سیستم، با افزودن دیوارهای بتنی کارا نیست، چون افزایش سختی دوره تناوب سازه را می‌کاهد و آن را به محدوده شتاب طیفی بالاتر سوق می‌دهد [۴]. Loh و Chai در سال ۱۹۹۹ از سه نوع پالس سرعت استفاده نمودند تا ضریب کاهش مقاومت ساختمان با زمان تناوب‌های مختلف را مشخص کنند و آن‌ها دریافتند که تقاضای مقاومت، بستگی به زمان تناوب پالس و نسبت زمان تناوب سازه‌ای با زمان تناوب پالس دارد [۲۱]. در سال ۲۰۰۰، Nakashima و همکارانش بر روی پاسخ رفتار قاب‌های خمشی فولادی تحت زلزله‌های نزدیک گسل ثبت شده در زلزله‌های ژاپن، تایوان و آمریکا مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات تحت رکوردهای نزدیک گسل ژاپن، تایوان و آمریکا شبیه به یکدیگر می‌باشند [۲۲].

در سال ۲۰۱۱، Sehati و همکاران پاسخ سازه‌های چند طبقه را در مقابل حرکات نزدیک گسل با اثرات راستاپذیری پیش‌رونده و همچنین ارزیابی توانایی پالس‌های ساده تولید شده در نشان دادن اثرات پالس‌های موجود در حرکات پیش‌رونده را بررسی کردند. برای این منظور آن‌ها سه نوع مختلف ساختمان را با انجام آنالیز دینامیکی افزاینده تحت حرکات معمولی و حرکات نزدیک گسل با اثرات راستاپذیری پیش‌رونده قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که حرکات پالس‌گونه زمین در مقایسه با حرکات معمولی زمین تقاضاهای بزرگ‌تری را در سازه بوجود می‌آورند. آن‌ها بار دیگر پاسخ سازه‌ای را تحت پالس معادل که مبتنی بر پالس موجکی ساده شده Gabor بدست آمده بررسی کردند. نتایج نشان داد که وقتی نسبت دوره تناوب پالس (T_p) به دوره تناوب سازه (T_s) در بازه ۰/۵ تا ۲/۵ قرار می‌گیرد، مدل پالس معادل به‌طور مناسبی پاسخ سازه‌ای را برای حرکات نزدیک گسل پیش‌بینی می‌کند [۲۳]. در سال ۲۰۱۴، Hoseini Vaez و همکاران با استفاده از رابطه پیشنهادی مدل‌سازی پالس غالب حرکات نزدیک گسل، مطالعه‌ای بر روی تاثیر پالس غالب حرکات نزدیک گسل بر روی سازه‌های جداسازی شده، انجام دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد که تاریخچه زمانی‌های پالس غالب استخراج شده از رکوردهای اصلی قابلیت نشان دادن ویژگی‌های برجسته پاسخ ساختمان‌های جداسازی شده تحت حرکات پالس‌گونه نزدیک گسل را دارا می‌باشد. بررسی پاسخ لرزه‌ای مدل‌های سازه‌ای تحت حرکات پالس‌گونه، مشخص نمود که تاثیر پالس بر روی پاسخ، علی‌رغم مدت زمان کوتاه آن در مقابل رکورد اصلی، به‌طور چشمگیری غالب می‌باشد. با توجه به نتایج مطالعه آن‌ها مشخص شد که پاسخ‌های تغییرمکان پایه مدل‌های جداسازی شده تحت پالس‌های معادل تقریباً به‌طور کامل با پاسخ‌های تغییرمکان پایه مدل‌های جداسازی شده تحت رکوردهای واقعی حرکات نزدیک گسل، مطابقت دارد. همچنین بر طبق مطالعه آن‌ها بر روی پاسخ هیستریزس سیستم جداگرا تحت هر دو تاریخچه زمانی‌های پالس‌های غالب و رکوردهای واقعی حرکات نزدیک گسل، مطابقت نزدیکی بین انرژی‌های تلف شده مشخص شد [۲۴].

۲- حرکات نزدیک گسل مورد مطالعه

۱۱ رکورد ثبت شده در مناطق نزدیک گسل در طی زلزله‌های مختلف جهان در این مطالعه استفاده شده است. این رکوردها، از رکوردهای نزدیک گسل Hoseini Vaez و همکاران [۲۵ و ۲۶] گرفته شده است. تمام این رکوردها از حرکات راستاپذیری پیش‌رونده می‌باشند.

۲-۱- رکوردهای واقعی مورد مطالعه

این زلزله‌ها دارای مقادیر بزرگای گشتاوری (M_w) بین ۵/۷ تا ۷/۴ می‌باشند. نزدیک‌ترین فاصله تا گسل ۰/۳ کیلومتر می‌باشد. جزئیات بیش‌تر درباره موقعیت، بزرگا، مقادیر حداکثر شتاب زمین و حداکثر سرعت زمین و حداکثر تغییرمکان زمین در جدول ۱ نشان داده شده است. این رکوردها متاثر از راستاپذیری پیش‌رونده می‌باشند.

۲-۲- پالس‌های مورد مطالعه

تمام رکوردهای واقعی حرکات نزدیک گسل در این مطالعه توسط مدل پیشنهادی Hoseini Vaez و همکاران (۲۰۱۳) به‌صورت پالس معادل معرفی شده‌اند [۲۵]. چون هدف اصلی این مطالعه ارزیابی دقت پالس معادل در پیش‌بینی پاسخ غیرالاستیک سیستم‌های چند درجه آزادی و مقایسه با رکوردهای واقعی می‌باشد، همه سازه‌ها یک‌بار تحت رکوردهای واقعی و سپس تحت پالس معادل آنالیز می‌گردند.

جدول ۱: مشخصات حرکات نزدیک گسل

شماره	رویداد	سال	ایستگاه	M_w	نزدیک ترین فاصله* (km)	PGA (g)	PGV (cm/sec)	PGD (cm)
۱	San Fernando	۱۹۷۱	Pacoima Dam (upper left abut)	۶/۶	۱/۸	۱/۴۳	۱۱۶/۵	۳۰/۹۷
۲	Coyote Lake	۱۹۷۹	Gilroy Array #6	۵/۷	۳/۱	۰/۴۵	۵۱/۵	۷/۱
۳	Imperial Valley-06	۱۹۷۹	Aeropuerto Mexicali	۶/۵	۰/۳	۰/۳۶	۴۴/۳	۱۰/۴
۴	Imperial Valley-06	۱۹۷۹	Agrarias	۶/۵	۰/۷	۰/۳۱	۵۴/۴	۱۴/۸
۵	N. Palm Springs	۱۹۸۶	North Palm Springs	۶/۱	۴	۰/۶۷	۷۳/۶	۱۱/۸۷
۶	Northridge-01	۱۹۹۴	LA Dam	۶/۷	۵/۹	۰/۵۷	۷۷/۱	۲۰/۱
۷	Northridge-01	۱۹۹۴	Rinaldi Receiving Sta	۶/۷	۶/۵	۰/۸۷	۱۶۷/۲	۲۸/۸
۸	Superstition Hills-02	۱۹۸۷	Parachute Test Site	۶/۵	۱	۰/۴۲	۱۰۶/۸	۵۰/۵
۹	Chi-Chi, Taiwan	۱۹۹۹	TCU076	۶/۲	۱۴/۷	۰/۵۲	۵۹/۴	۹/۶
۱۰	Bam	۲۰۰۳	Bam	۶/۶	۱	۰/۷۸	۱۰۹/۵	۳۲/۵
۱۱	Tab	۱۹۷۸	Tab	۷/۴	۲/۰۵	۰/۸۵	۱۲۱/۴	۹۵

* نزدیک ترین فاصله از محل رکورد ثبت شده تا محل گسیختگی (پاره شدگی).

۳- مدل ریاضی پالس معادل

حرکات نزدیک گسل مصنوعی معمولاً از طریق ترکیب یک پالس سرعت وابسته با زمان تناوب بالا و موج لرزه‌ای مستقل فرکانس بالا شبیه‌سازی می‌شوند. از این رو مدل‌سازی پالس غالب رکوردهای واقعی نزدیک گسل از این لحاظ که در ترکیب با این مولفه مستقل می‌تواند بیانگر رکورد واقعی باشد، از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. بسیاری از مهندسیین و محققین اشکال موجی ساده شده مختلفی را برای بیان پالس‌های حرکت زمین که در مناطق حوزه نزدیک مشاهده شده بود، استفاده کرده‌اند. بیش‌تر مدل‌های استفاده شده براساس پارامترهایی هستند که به روش‌های مختلف کالیبره شده‌اند و وابسته به خود مدل می‌باشند. مدل، بهتر است ساده و مطمئن باشد و پارامترهای آن به صورتی باشد که مفهوم فیزیکی واضحی داشته باشد؛ به نحوی که بتوان آن را مستقیماً به زلزله مرتبط کرد. برخی از شکل‌های موج سرعت، برای مثال، مربع، مثلث یا پالس‌های سینوسی می‌تواند منجر به تخمین غیرواقع گرایانه از پاسخ دینامیکی سازه‌های مهندسی شود؛ مخصوصاً اگر آن‌ها قادر نباشند تاریخچه زمانی و ویژگی‌های طیف پاسخ رکورد واقعی نزدیک گسل را نمایش دهند. همچنین این‌گونه مدل‌ها بهتر است در عین سادگی قابلیت مدل‌سازی تمام انواع پالس‌ها را نیز داشته باشد. با توجه به نقاط ضعف مدل‌های موجود در زمینه تولید و شبیه‌سازی حرکات نزدیک گسل، ارائه روش‌های ریاضیاتی نوین با تکیه بر ارائه ترکیبی مناسب و همگون از توابع متناظر ریاضیاتی ضروری می‌باشد. در سال ۲۰۰۳، Mavroeidis و Papageorgiou به‌عنوان پیشگامان مدل‌سازی ریاضیاتی رکوردهای حرکات نزدیک گسل شناخته شده‌اند. طبق تحقیقات آن‌ها پارامترهای تاثیرگذار بر پالس غالب شامل دامنه پالس، مدت زمان، اختلاف فاز و تعداد چرخه‌های نوسانی می‌باشد. با توجه به پارامترهای ذکر شده، آن‌ها پیشنهاد دادند، که هر مدل تحلیلی که به‌عنوان شبیه‌ساز پالس انتخاب می‌شود می‌بایست سه شرط سادگی، جامع بودن و مشتق پذیر بودن (قابلیت انجام عملیات ریاضیاتی) را داشته باشد.

در سال ۲۰۱۳، HoseiniVaez و همکاران برای تولید بخشی از رکورد که دارای زمان تناوب بالا می‌باشد (پالس)، یک مدل ریاضی پیشنهاد داده‌اند که در عین سادگی می‌تواند این بخش از رکورد واقعی نزدیک گسل را با دقت مناسبی مدل‌سازی نماید [۲۵]. در مدل پیشنهاد شده تابع پوش نرمال موجک Gabor (رابطه ۱) [۲۷]، با یک تابع درجه ۲ جایگزین شده است. جایگزینی تابع پوش برای مدل کردن پالس سرعت حرکات نزدیک گسل و رسیدن به مولفه‌های 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 بسته ای نباشد. تابع پوش چند جمله ای درجه دوم به نحوی با تابع پوش نرمال موجک Gabor تطابق داده شده است که این دو پوش تا حدود ۹۰ درصد بر هم منطبق می‌شوند. مدل پیشنهاد شده بوسیله دامنه، فرکانس، تعداد سیکل‌ها و فاز پالس پارامتربندی شده است. پالس‌های سرعت نزدیک گسل به‌صورت ریاضی توسط مدل پیشنهادی HoseiniVaez و همکاران (۲۰۱۳) معرفی شده است. این مدل با استفاده از رابطه ۲ بیان گردیده است.

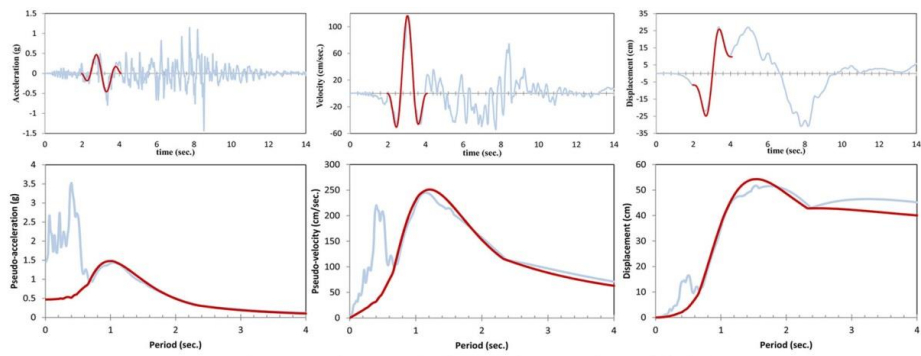
$$f(t) = A \times e^{-\left(\frac{2f_p}{\gamma}\right)^2 t^2} \times \cos(2\pi f_p t + \nu) \quad (1)$$

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

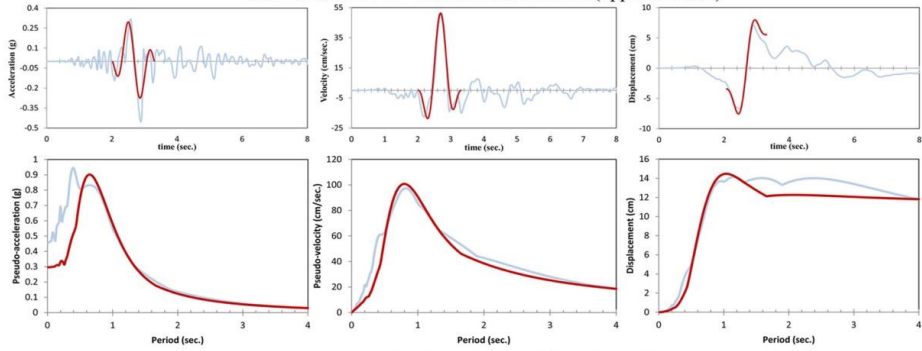
که در آن A کنترل کننده دامنه پالس، f_p فرکانس، ν اختلاف فاز، γ معرف خصوصیت نوسانی (تعداد چرخه‌ها) و t_0 بیانگر مرکز پنجره زمانی یا همان زمان متناظر با نقطه حداکثر پوش می‌باشد. مشخصات رکوردهای نزدیک گسل و مقادیر پارامترهای ورودی که از مطابقت دادن تابع پیشنهادی پالس غالب با آن‌ها بدست آمده است، در جدول ۲ آورده شده است. همچنین در شکل ۱ رکوردهای شتاب، سرعت و تغییر مکان به همراه طیف‌های پاسخ مربوط برای رکورد واقعی و پالس معادل نمایش داده شده است.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای ورودی حاصل از تطابق تابع پیشنهادی پالس غالب با رکوردهای نزدیک گسل.

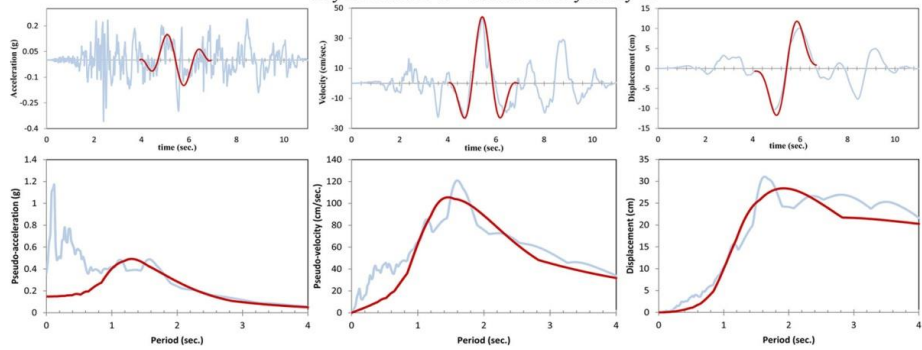
t_0 (sec.)	f_p (Hz)	ν (rad.)	γ	A	ایستگاه	سال	رویداد
۳/۰۲	۰/۷۰	۵/۵۰	۳	۱۱۶/۵	Pacoima Dam (upper left abut)	۱۹۷۱	San Fernando
۲/۶۶	۰/۹۹	۲/۰۹	۲/۵۵	۵۱/۵	Gilroy Array #6	۱۹۷۹	Coyote Lake
۵/۴۳	۰/۵۸	۵/۳۴	۳/۵۰	۴۴/۳	Aeropuerto Mexicali	۱۹۷۹	Imperial Valley-06
۷/۷۷	۰/۵۴	۵/۵۹	۳/۲۰	۵۴/۴	Agrarias	۱۹۷۹	Imperial Valley-06
۲/۸۰	۰/۷۵	۵/۱۵	۲/۵۰	۷۳/۶	North Palm Springs	۱۹۸۶	N. Palm Springs
۳	۰/۵۸	۵/۵۹	۲/۳۰	۷۷/۱	LA Dam	۱۹۹۴	Northridge-01
۲/۶۰	۰/۷۷	۴/۰۱	۲/۵۰	۱۶۷/۲	Rinaldi Receiving Sta	۱۹۹۴	Northridge-01
۱۲/۳۵	۰/۴۸	۱/۵۷	۳/۷۰	۱۰۶/۸	Parachute Test Site	۱۹۸۷	Superstition Hills-02
۱۰/۳۷	۱/۱۰	۳	۲/۸۰	۵۹/۴	TCU076	۱۹۹۹	Chi-Chi, Taiwan-03
۵/۹	۰/۵۵	۲/۷۱	۴	۹۵	Bam	۲۰۰۳	Bam
۱۲	۰/۱۹	۰/۸۷	۵	۱۰۰	Tab	۱۹۷۸	Tab



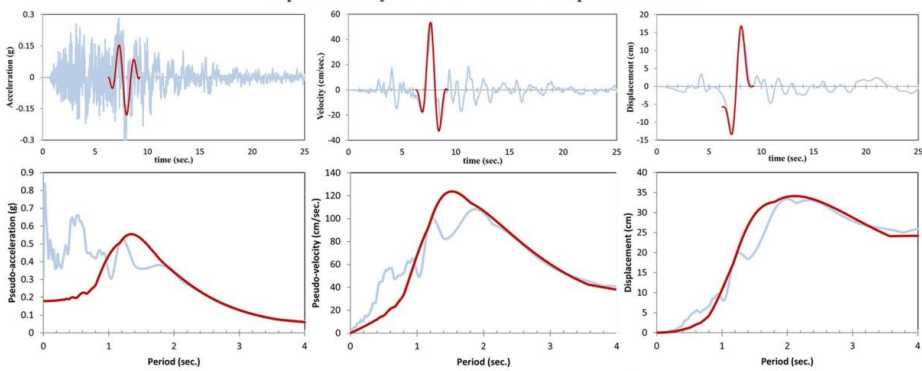
San Fernando 1971 - Station Pacoima Dam (upper left abut)



Coyote Lake 1979 - Station Gilroy Array #6

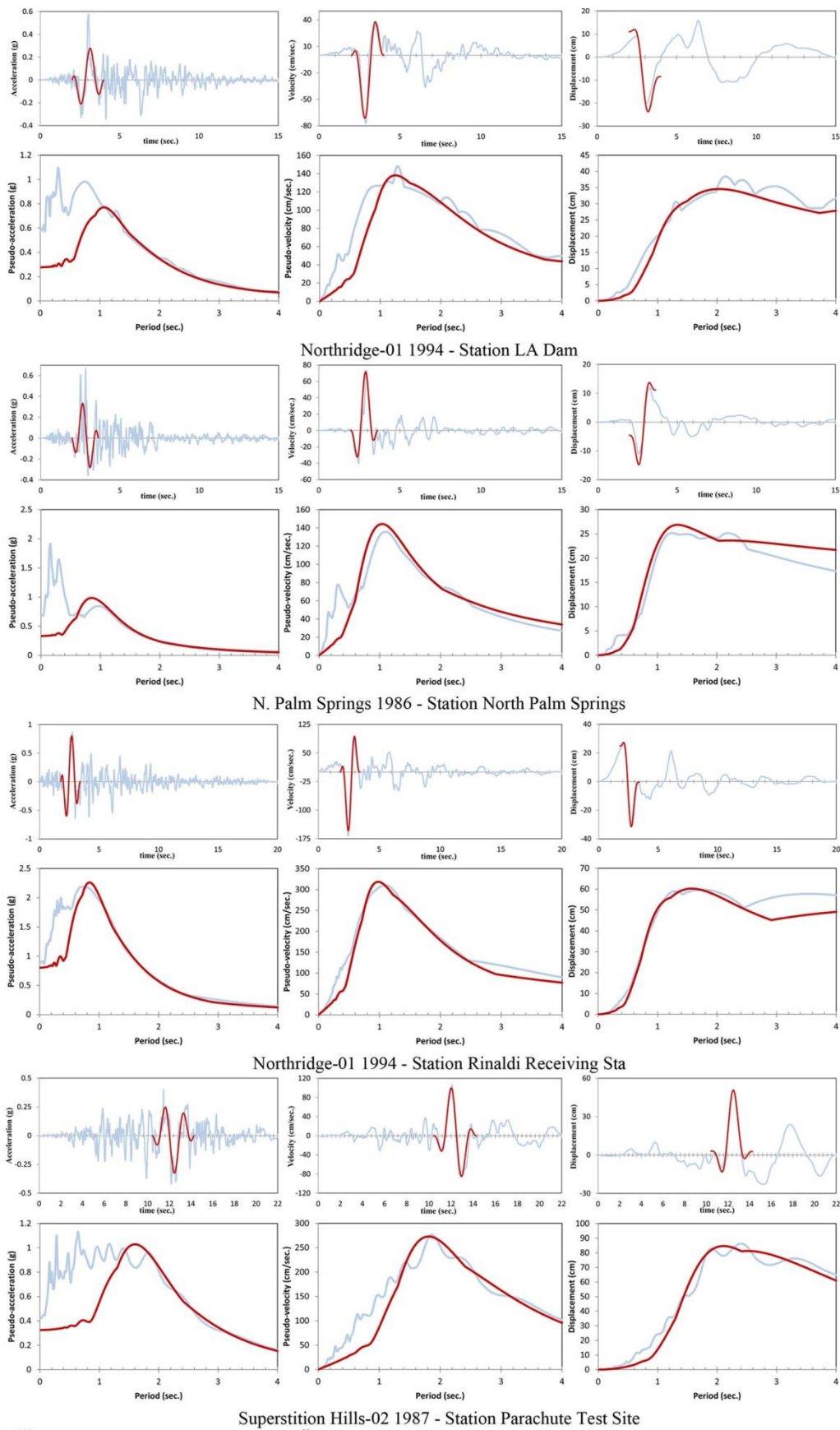


Imperial Valley-06 1979 - Station Aeropuerto Mexicali



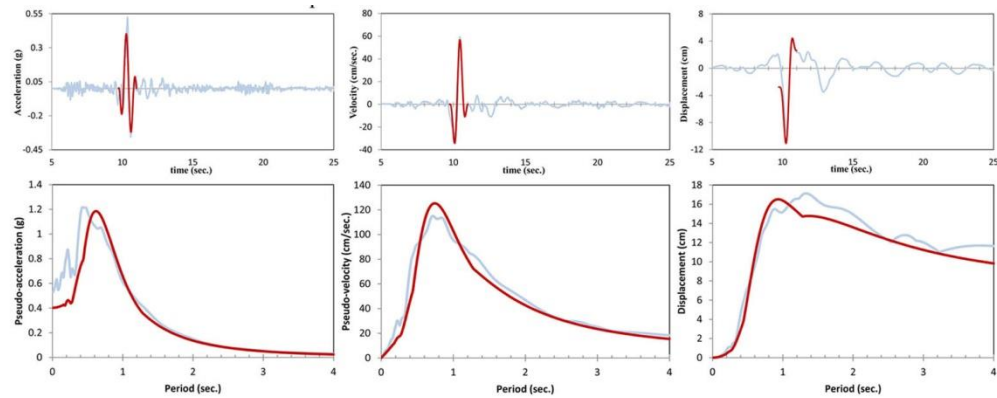
Imperial Valley-06 1979 - Station Agrarias

شکل ۱: پالس های معادل شتاب، سرعت و تغییر مکان [۲۵].

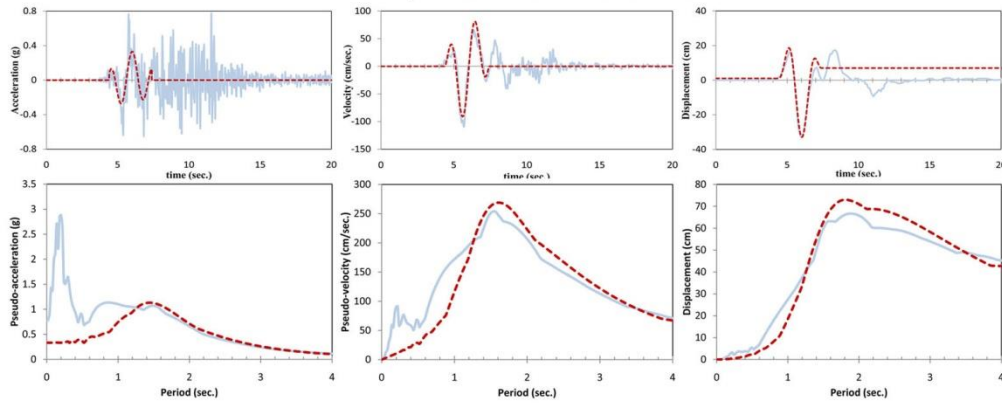


Superstition Hills-02 1987 - Station Parachute Test Site

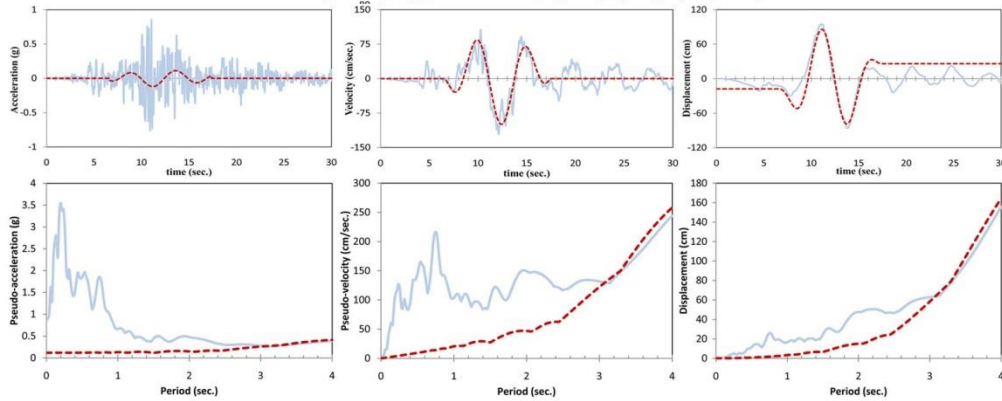
شکل ۱: (ادامه) [۲۵].



Chi-Chi, Taiwan-03 1999 - Station TCU076



مولفه های حرکتی عمود بر گسل - ایستگاه BAM - زلزله بم در سال ۲۰۰۳



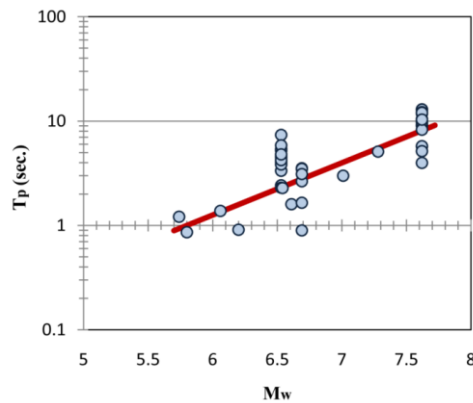
مولفه های حرکتی عمود بر گسل - ایستگاه TAB - زلزله طبرس در سال ۱۹۷۸

شکل ۱: (ادامه) [۲۵].

۴- تخمین T_p با بزرگای زلزله

فرکانس غالب، f_p ، یا به طور معادل زمان تناوب T_p ($f_p = \frac{1}{T_p}$) پالس سرعت رکوردهای حرکات نزدیک گسل با تغییرات بزرگای گشتاوری (M_w) متناسب می باشد. دوره تناوب پالس به پارامترهای منبع همچون افزایش زمان و بعد گسل مرتبط است. چون این پارامترها توسط بزرگای زلزله اندازه گیری می شوند، انتظار می رود دوره تناوب پالس باید با بزرگای زلزله تعیین شود. در شکل ۲ تغییرات زمان تناوب پالس در مقابل بزرگای گشتاوری رسم شده است و با استفاده از آن رابطه ۳ بدست می آید. رابطه بدست آمده به طور کامل مطابق با رابطه Mavroedidis و Papageorgiou که در سال ۲۰۰۳ ارائه شده است، می باشد [۲۵].

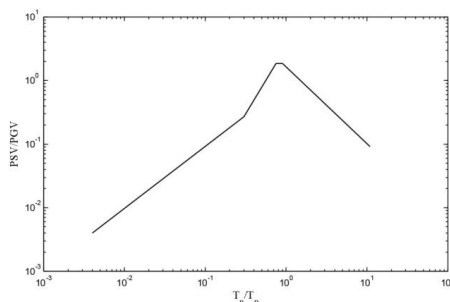
$$\log T_p = -2.9 + 0.5M_w \quad (۳)$$



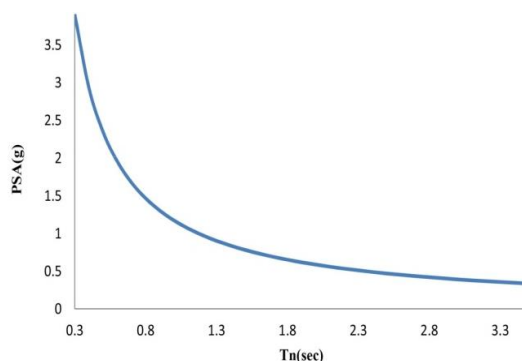
شکل ۲: تغییرات زمان تناوب (Tp) پالس سرعت در مقابل تغییرات بزرگای گشتاوری (Mw) [۲۵].

۴-۱- ساخت طیف پاسخ برای حرکات نزدیک گسل

از آنجا که دوره تناوب پالس با بزرگای زلزله افزایش می‌یابد، روشن است که طیف پاسخ زلزله‌های مختلف با بزرگای مختلف، مشروط بر آن که شامل اثرات راستاپذیری پیش‌رونده باشند، مقادیر حداکثری در دوره تناوب طبیعی نشان خواهند داد. طیف پاسخ زلزله‌هایی با بزرگای بزرگ‌تر، مقادیر حداکثری در دوره تناوب طبیعی بالاتر دارند و بنابراین سازه‌های انعطاف‌پذیر بیش‌تر از آن‌ها تاثیر می‌پذیرند. از طرف دیگر طیف پاسخ زلزله‌هایی با بزرگای کوچک‌تر، مقادیر حداکثری در دوره تناوب پایین‌تر دارند و بنابراین سازه‌های سخت‌تر بیش‌تر از آن‌ها تاثیر می‌گیرند. این بدان معنی است که دامنه‌های طیف پاسخ زلزله‌ای با بزرگای کوچک‌تر می‌تواند در دوره تناوب طبیعی کوتاه‌تر تا متوسط از دامنه طیف پاسخ زلزله‌ای با بزرگای بزرگ‌تر بیش‌تر شود [۲۸]. بنابراین شکل طیف پاسخ را نباید برای زلزله‌های نزدیک گسل با پالس‌های راستاپذیری پیش‌رونده ثابت نگه داشت. آئین‌نامه‌های فعلی بر شکل طیف ثابت تکیه می‌کنند و آن را به‌طور یکنواخت برای تمام دوره تناوب‌ها براساس بزرگای زلزله مقیاس می‌کنند. این عمل می‌تواند منجر به تخمین نادرست پاسخ شود. علاوه بر این در بعضی آئین‌نامه‌های ساختمانی، جهت به حساب آوردن اثرات نزدیک گسل، به سادگی طیف پاسخ ثابت را در ضرایبی ضرب می‌کنند که معقول نیست. به دلیل این که دوره تناوب پالس با بزرگای اندازه‌گیری می‌شود، طیف باید با ضرایب مختلف در مقادیر متفاوت دوره تناوب طبیعی مقیاس شده باشد. برای دستیابی به مفهوم مقیاس‌سازی بزرگای پالس راستاپذیری، طیف پاسخ همپایه شده برای حرکات نزدیک گسل پیشنهاد شده است [۲۹]. همان‌طور که قبلاً بحث شد، شکل طیف پاسخ به دوره تناوب پالس تحریک وابسته است. بنابراین ضروری است تا دوره تناوب پالس را برای دستیابی به محور عرضی طیف طراحی برای هر سازه با دوره تناوب طبیعی معلوم تخمین زد. از طرفی چون در یک ساختمان ممکن است زلزله‌های با بزرگای مختلف اتفاق بیافتد، لازم است تا دوره تناوب پالس را در مدل‌های مختلف حرکات زمین یکی کرد، تا یک طیف طراحی واقعی ساخت. چنین روشی مستلزم اطلاعاتی احتمالاتی قبلی از اثرات نزدیک گسل بر ساختمان می‌باشد [۳۰]. برای اجتناب از چنین مسئله‌ای، فرض می‌کنیم که دوره تناوب پالس، معادل با دوره تناوب سازه طراحی شده است. طیف شبه‌سرعت در شکل ۳ نشان داده شده است. سپس طیف شبه‌شتاب را می‌توان با استفاده از آن بدست آورد (شکل ۴).



شکل ۳: طیف پاسخ شبه‌سرعت حرکات نزدیک گسل.



شکل ۴: پاسخ الاستیک با میرایی ۵ درصد برای مجموعه حرکات نزدیک گسل.

برای دوره تناوب‌های نرمالیزه شده بزرگ‌تر از $0.75 \left(\frac{T_n}{T_p}\right)_c = 0.75$ ضریب شکل‌پذیری و ضریب کاهش نیرو یکسان هستند [۲۹]. یعنی برای سیستم غیرالاستیک داریم:

$$R_y = \mu \quad (۴)$$

چون دوره تناوب نرمالیزه شده را معادل با یک قرار می‌دهیم، این رابطه معتبر است. برش پایه طراحی برای سازه الاستیک به صورت زیر می‌باشد:

$$V_b = PSA * m \quad (۵)$$

در این رابطه V_b برش پایه، PSA شبه‌شتاب طیفی حاصل از نمودار شکل ۴ و m جرم کل سازه است. برش پایه برای سازه‌های غیرالاستیک به صورت زیر است:

$$V_{by}(\mu) = \frac{V_b}{\mu} \quad (۶)$$

۵- مدل‌های سازه‌ای

برای ارزیابی پالس‌های معادل حرکات نزدیک گسل قاب‌های مقاوم خمشی بتنی یک دهانه با ارتفاع‌های مختلف انتخاب شده‌اند. قاب‌ها مورد استفاده دارای یک دهانه و تعداد طبقات مختلف شامل ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ می‌باشند. ارتفاع هر طبقه ۳ متر و طول دهانه هر قاب ۶ متر می‌باشد (شکل ۵). در تمام قاب‌ها جرمی معادل با ۸۹ تن به هر طبقه اختصاص داده شده است. این جرم به صورت جرم متمرکز در هر طبقه فرض می‌شود. در هر طبقه ممان اینرسی تیر آن طبقه با ممان اینرسی ستون‌های آن طبقه یکسان می‌باشد (جدول ۳). با این فرض مقادیر نسبی سختی‌های تیرها و ستون‌ها طوری اختصاص داده شده، تا وقتی سازه در معرض بارهای جانبی قرار می‌گیرد تغییرمکان نسبی ثابتی در امتداد ارتفاع ساختمان ایجاد شود. بارهای جانبی مطابق ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰ می‌باشد.

ممان اینرسی تیرها در طبقات مختلف هر یک از قاب‌ها را با توجه به نکات زیر نشان می‌دهد:

- تحت بارهای جانبی، تغییرمکان نسبی یکسانی در هر طبقه ایجاد شود.

$$F_i = (V - F_t) \frac{W_i h_i}{\sum_{j=1}^n W_j h_j} \quad (۷)$$

- دوره تناوب اصلی سازه باید با رابطه زیر یکسان باشد.

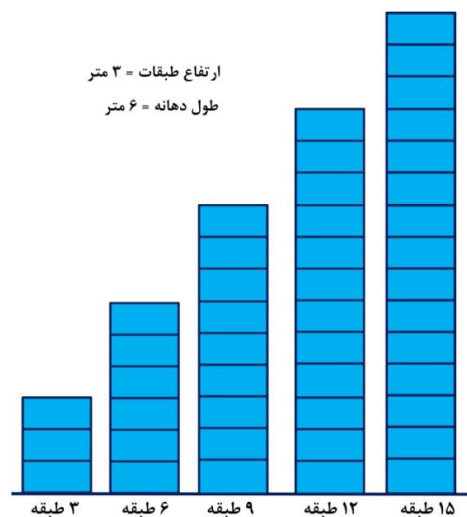
$$T_1 = 0.07H^{3/4} \quad (۸)$$

۶- توزیع مقاومت، طراحی ظرفیت و مدل سازی خواص غیرالاستیک اعضا و میرایی سازه

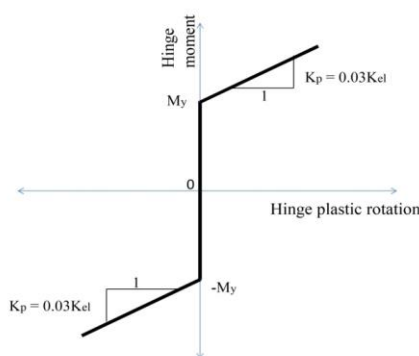
هر یک از قاب‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه برای ۳ مقدار شکل پذیری ۱، ۲ و ۴ مدل سازی شده‌اند. شکل پذیری ۱ به قاب الاستیک و شکل پذیری ۲ و ۴ به قاب غیر الاستیک دلالت دارند. بعد از تعیین مقاومت تسلیم برش پایه، نیروی برش پایه در ارتفاع سازه به صورت نیروی جانبی معادل در هر طبقه توزیع می‌شود. توزیع این نیروهای جانبی در طبقات مختلف مطابق آیین نامه ۲۸۰۰ می‌باشد. قاب‌های مورد استفاده براساس ایده ستون قوی-تیر ضعیف مدل شده‌اند. به عبارت دیگر تیرها و ستون‌ها طوری مدل شده‌اند که تغییر شکل‌های غیرالاستیک فقط در انتهای تیرها رخ دهد و ستون‌ها در حالت الاستیک باقی بمانند. خواص غیرالاستیکی در قاب‌ها با استفاده از لولاهای پلاستیک مدل سازی شده است. دو انتهای تیرهای همه طبقات دارای این مفاصل پلاستیک هستند. رابطه گشتاور- دوران مفاصل پلاستیک به صورت متقارن تعریف شده است (شکل ۶).

جدول ۳: ممان اینرسی تیرها در طبقات قاب‌ها. در هر طبقه ممان اینرسی تیر با ستون‌های آن طبقه برابر است

طبقه	ممان اینرسی (m ⁴)				
	طبقه ۳	طبقه ۶	طبقه ۹	طبقه ۱۲	طبقه ۱۵
۱	۰/۰۰۰۷۶۹۶	۰/۰۰۰۸۷۳۸	۰/۰۰۱۲۵۱	۰/۰۰۱۷۳۸	۰/۰۰۲۱۳۳
۲	۰/۰۰۱۷۳۸	۰/۰۰۳۴۱۷	۰/۰۰۵۲۰۸	۰/۰۰۷۶۲۶	۰/۰۱۰۸
۳	۰/۰۰۰۶۷۵	۰/۰۰۲۱۳۳	۰/۰۰۳۴۱۷	۰/۰۰۵۲۰۸	۰/۰۰۷۶۲۶
۴	-	۰/۰۰۱۷۳۸	۰/۰۰۲۵۹۳	۰/۰۰۴۴۲۴	۰/۰۰۶۰۹۳
۵	-	۰/۰۰۱۲۵۱	۰/۰۰۲۱۳۳	۰/۰۰۳۷۳۱	۰/۰۰۵۲۰۸
۶	-	۰/۰۰۰۳۸۰۸	۰/۰۰۱۷۳۸	۰/۰۰۳۱۲۳	۰/۰۰۴۴۲۴
۷	-	-	۰/۰۰۱۲۵۱	۰/۰۰۲۵۹۳	۰/۰۰۳۴۱۷
۸	-	-	۰/۰۰۰۸۷۳۸	۰/۰۰۱۷۳۸	۰/۰۰۲۵۹۳
۹	-	-	۰/۰۰۰۳۲۵۵	۰/۰۰۱۲۵۱	۰/۰۰۲۱۳۳
۱۰	-	-	-	۰/۰۰۰۶۷۵	۰/۰۰۱۷۳۸
۱۱	-	-	-	۰/۰۰۰۳۸۰۸	۰/۰۰۱۲۵۱
۱۲	-	-	-	۰/۰۰۰۲۳۳۲	۰/۰۰۰۸۷۳۸
۱۳	-	-	-	-	۰/۰۰۰۶۷۵
۱۴	-	-	-	-	۰/۰۰۰۳۲۵۵
۱۵	-	-	-	-	۰/۰۰۰۱۳۳۳



شکل ۵: هندسه قاب‌های مورد استفاده.



شکل ۶: رابطه ممان- دوران برای مفاصل پلاستیک.

میرایی در سازه توسط ماتریس میرایی رایلی تعریف می‌شود. ضرایب رابطه رایلی طوری تعیین می‌شوند که نسبت میرایی مودال برای مد اول و مد زام برابر با ۵ درصد باشد و مد z مدی است که زمان تناوب آن بیش‌تر از 0.4 ثانیه و یا مجموع جرم‌های مؤثر در آن بیش‌تر از ۹۰ درصد جرم کل سازه باشد. جدول ۴ مقادیر محاسبه شده ضرایب α و β را نشان می‌دهد.

جدول ۴: ضرایب متناسب با جرم و سختی میرایی رایلی برای قاب‌های مختلف

β	α	تعداد طبقات
0.008316	0.210978	۳
0.016131	0.120365	۶
0.015501	0.09866	۹
0.02274	0.075341	۱۲
0.027825	0.063043	۱۵

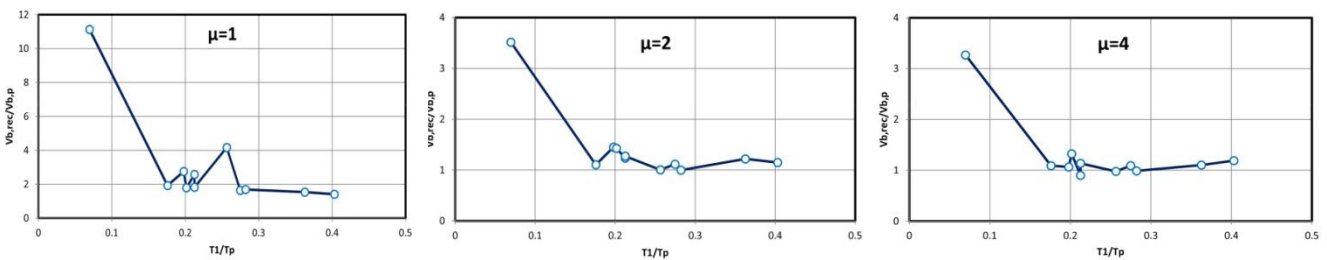
۷- ارزیابی پالس‌های معادل در پیش‌بینی پاسخ سازه

در این بخش به ارزیابی پالس‌های معادل (رابطه ۱)، در پیش‌بینی پاسخ سازه و مقایسه آن با پاسخ رکورد واقعی می‌پردازیم. آنالیز تاریخیچه زمانی بر روی همه قاب‌های مورد مطالعه، برای هر یک از رکوردهای واقعی نزدیک گسل جدول ۱ و پالس‌های متناظر با این رکوردها صورت گرفته است. مدل‌سازی و انجام آنالیز با برنامه (SAP2000) انجام شده است. برای انجام دادن آنالیز تاریخیچه زمانی از روش شتاب متوسط نیومارک ($\beta=1/4, \gamma=1/2$)، با گام زمانی متناسب با رکورد استفاده شده است.

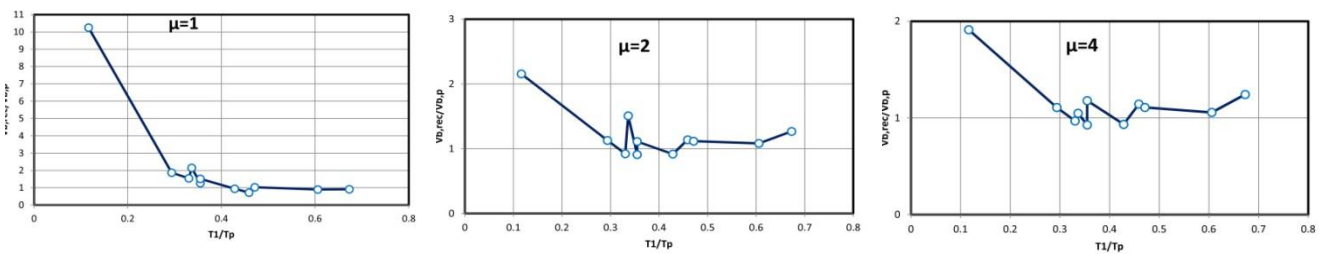
۷-۱- ارزیابی پالس در پیش‌بینی برش پایه

برای هر آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی، برش پایه V_b حداکثر مقدار برش پایه در قاب می‌باشد. این برش پایه برای رکوردهای واقعی نزدیک گسل به صورت $V_{b,rec}$ و برای پالس‌های متناظر به صورت $V_{b,p}$ نمایش داده شده است. شکل‌های ۷ الی ۱۱ مقایسه برش پایه رکورد واقعی با برش پایه پالس‌های معادل متناظر را نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌ها پالس معادل به خوبی توانایی پیش‌بینی تقاضای پاسخ برش پایه را برای قاب‌های مورد نظر دارد. همچنین با مقایسه طیف پاسخ رکوردهای واقعی و پالس‌های معادل متناظرشان، انتظار می‌رفت که پالس بتواند مشخصات رکوردهای واقعی را داشته باشد. محور افقی این شکل‌ها دوره تناوب نرمالیزه شده می‌باشد، که از تقسیم دوره تناوب اصلی سازه بر دوره تناوب پالس، بدست می‌آید. محور قائم نسبت برش پایه حاصل از رکوردهای واقعی ($V_{b,rec}$) به برش پایه حاصل از پالس‌های معادل ($V_{b,p}$) را نشان می‌دهد. با بررسی این شکل‌ها مشخص می‌شود وقتی دوره تناوب پالس به دوره تناوب اصلی سازه نزدیک یا از آن کم‌تر باشد، پیش‌بینی پالس‌های معادل بهتر است. به‌طور کلی برای دوره تناوب‌های نرمالیزه شده خیلی کم، پیش‌بینی پاسخ دقیق نیست و پالس تقاضای برش پایه کمتری را تخمین می‌زند. دلیل این امر این است که پالس بخش محتوای فرکانسی بالای حرکات زمین که یک پدیده اتفاقی در طبیعت می‌باشد، را نمی‌تواند معرفی کند. برای هر سازه با افزایش سطوح شکل‌پذیری، تفاوت در پیش‌بینی پاسخ توسط رکورد واقعی و پالس

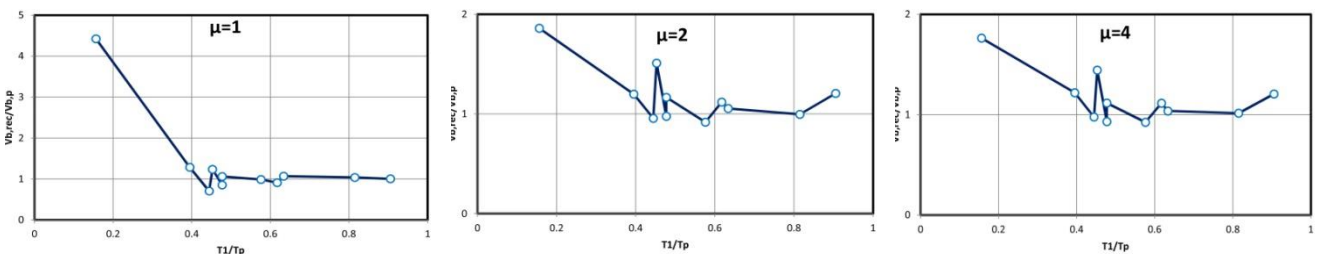
معادل کاهش می‌یابد. با توجه به این که سازه‌ها برای سه سطح شکل‌پذیری ۱، ۲ و ۴ مدل شده‌اند و برای دو سطح ۲ و ۴ تحت عملکرد نیروهای استاتیکی (متناظر با دوره‌تناوب نرمالیزه شده یک) مفاصل پلاستیک جاری می‌شوند، وقتی سازه در معرض پالسی که دوره‌تناوب بالاتری از دوره‌تناوب اصلی سازه دارد قرار گیرد، به حالت الاستیک باقی می‌ماند. در چنین مواردی سازه‌ها مقاومت بیش از اندازه‌ای دارند، بنابراین وقتی در معرض این پالس‌ها باشند، تسلیم نمی‌شوند. از طرفی وقتی سازه در معرض رکورد واقعی که محتوای فرکانسی بالایی دارد قرار گیرد، انتظار می‌رود که سازه جاری شود. بنابراین مقادیر برش پایه پیش‌بینی شده توسط رکورد واقعی برای سطوح بالاتر شکل‌پذیری کاهش می‌یابد، چون توسط مقاومت سازه‌ها محدود شده‌اند. همان‌طور که گفته شد برای دوره‌تناوب نرمالیزه شده پایین، پیش‌بینی پالس معادل دقیق نیست، چنانچه این دوره‌تناوب نادیده گرفته شود، متناظر با همه سازه‌ها پیش‌بینی پاسخ توسط پالس خیلی دقیق می‌باشد. این موضوع به خوبی در شکل‌های ۱۲ الی ۱۴ مشخص می‌باشد. در این شکل‌ها محور افقی دوره‌تناوب نرمالیزه شده برای تمام سازه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر میانه برای رکوردهای موجود میزان خطاها برای سه سطح شکل‌پذیری ۱، ۲ و ۴ به ترتیب ۶ درصد، ۱۱ درصد و ۹ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان در بازبینی طراحی سازه‌های جدید و ارزیابی عملکرد سازه‌های موجود از پالس معادل با در نظر گرفتن موارد مطرح شده به عنوان جایگزین رکورد واقعی استفاده کرد.



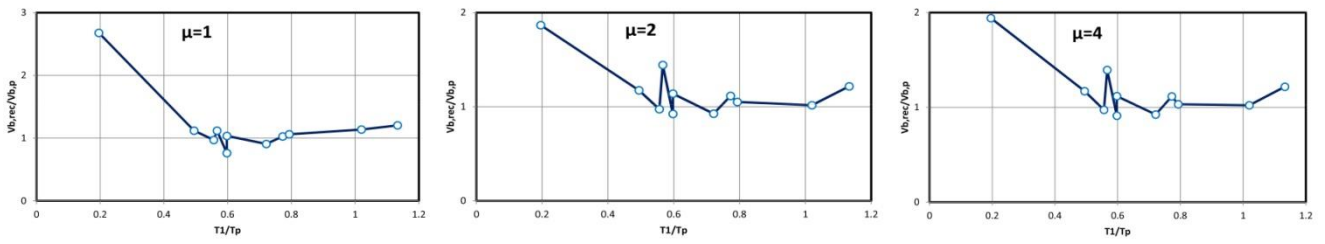
شکل ۷: نسبت برش پایه رکورد واقعی به برش پایه پالس معادل متناظر برای قاب ۳ طبقه.



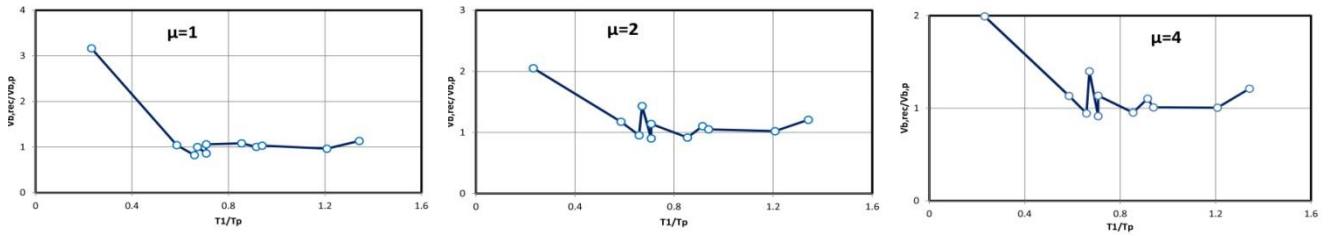
شکل ۸: برش پایه رکورد واقعی به برش پایه پالس معادل متناظر برای قاب ۶ طبقه.



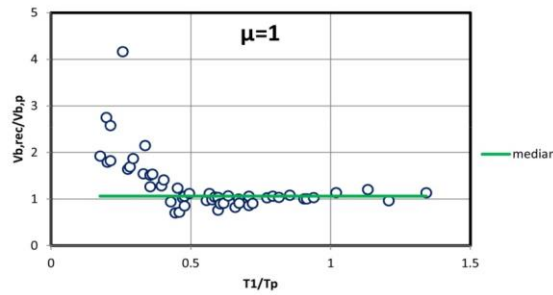
شکل ۹: نسبت برش پایه رکورد واقعی به برش پایه پالس معادل متناظر برای قاب ۹ طبقه.



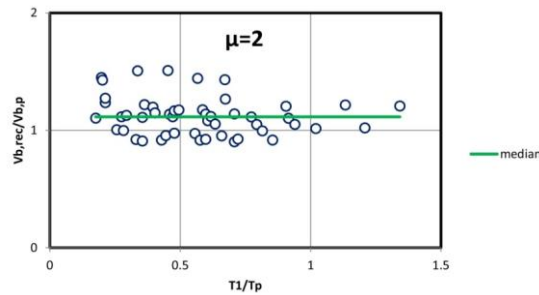
شکل ۱۰: نسبت برش پایه رکورد واقعی به برش پایه پالس معادل متناظر برای قاب ۱۲ طبقه.



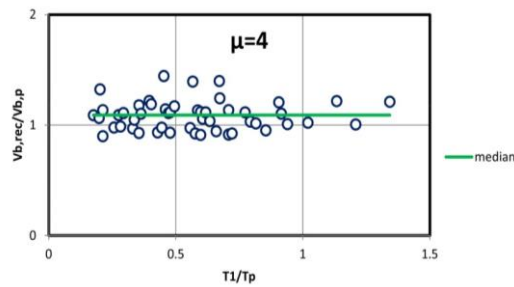
شکل ۱۱: نسبت برش پایه رکورد واقعی به برش پایه پالس معادل متناظر برای قاب ۱۵ طبقه.



شکل ۱۲: نسبت برش پایه رکورد واقعی به برش پایه پالس (median = 1.06).



شکل ۱۳: نسبت برش پایه رکورد واقعی به برش پایه پالس (median = 1.11).

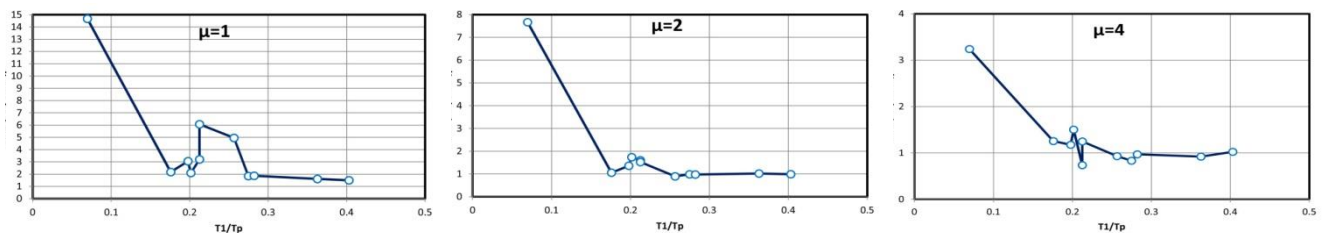


شکل ۱۴: نسبت برش پایه رکورد واقعی به برش پایه پالس (median = 1.09).

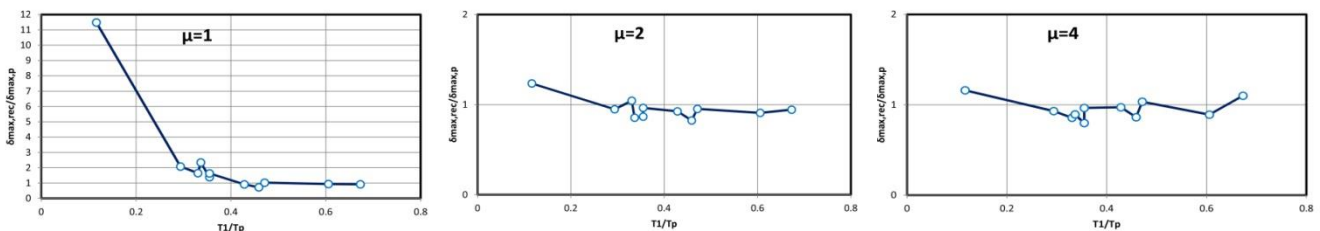
۷-۲- ارزیابی پالس در پیش‌بینی حداکثر تغییرمکان نسبی

در این بخش توانایی پالس‌های معادل در پیش‌بینی حداکثر تغییرمکان نسبی داخلی طبقه در ارتفاع سازه در مقابل رکوردهای واقعی متناظر ارزیابی می‌شود. تغییرمکان نسبی با انجام آنالیز تاریخیچه زمانی برای هریک از قاب‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه حاصل می‌شود. کمیت پاسخ مدنظر مقدار حداکثر تغییرمکان نسبی همه طبقات در هر سازه می‌باشد. حداکثر تغییرمکان نسبی داخلی حاصل از آنالیز توسط پالس‌های معادل به صورت $\delta_{max,p}$ و توسط رکورد واقعی به صورت $\delta_{max,rec}$ نشان داده می‌شود. در شکل‌های ۱۵ الی ۱۹ نسبت حداکثر تغییرمکان نسبی حاصل از رکورد واقعی به پالس‌های معادل متناظر ($\delta_{max,rec}/\delta_{max,p}$) در مقابل دوره‌تناوب نرمالیزه شده برای سه سطح شکل‌پذیری نشان داده شده است. نتایج مشابه با برش‌پایه پیش‌بینی شده توسط پالس می‌توان برای حداکثر تغییرمکان نسبی نیز بدست آورد. با توجه به شکل ۱ مشخص می‌شود که مدل ارائه شده پالس رکوردهای نزدیک گسل زلزله‌ها را با دقت بسیار بالایی مدل کرده است، به نحوی که تطابق بین طیف پاسخ الاستیک رکورد واقعی و مدل ارائه شده بسیار خوب می‌باشد، در حالی که مدل تولید شده برای رکورد نزدیک گسل زلزله طبس با این که پالس مدل شده مطابقت نزدیکی با رکورد واقعی سرعت دارد ولی تطابق ایجاد شده در طیف پاسخ الاستیک رکورد واقعی و پالس مدل شده فقط در محدوده زمان تناوب بالا قابل قبول می‌باشد. مدت زمان طولانی پالس در رکورد طبس باعث می‌شود که تطابق در طیف پاسخ الاستیک در محدوده زمان تناوب بالا اتفاق بیافتد. پاسخ پالس با نادیده گرفتن دوره‌تناوب نرمالیزه شده خیلی پایین (زلزله طبس) با پاسخ رکورد واقعی قابل مقایسه است. البته با توجه به شکل‌ها می‌توان فهمید که این عمل برای سازه‌های کوتاه مناسب است، ولی برای سازه‌های بلندتر به دلیل افزایش دوره‌تناوب سازه و افزایش شکل‌پذیری پیش‌بینی پاسخ توسط پالس حتی برای این رکورد نیز دقیق شده است. به هر حال می‌توان گفت پالس‌های معادل توانایی پیش‌بینی حداکثر تغییرمکان نسبی را دارند.

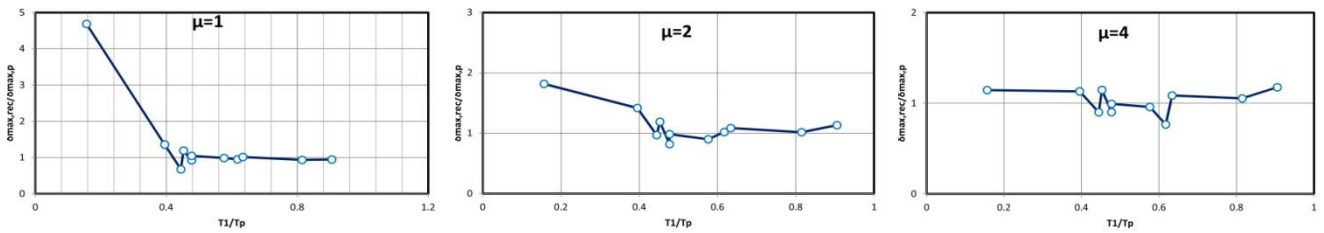
با توجه به شکل‌های ۲۰ الی ۲۲ که در آن‌ها دوره‌تناوب نرمالیزه شده پایین در نظر گرفته نشده است، دقت پالس‌ها در پیش‌بینی پاسخ بهتر مشاهده می‌شود. در این شکل‌ها محور قائم نسبت حداکثر تغییرمکان نسبی رکورد واقعی به پالس معادل است. محور افقی دوره‌تناوب نرمالیزه شده برای تمام سازه‌ها و تمام رکوردها می‌باشد. خط پررنگ میانگین مقادیر نسبت‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر میانگین برای رکوردهای موجود میزان خطاها برای سه سطح شکل‌پذیری ۱، ۲ و ۴ به ترتیب ۹/۴ درصد، ۳/۷ درصد و ۳/۴ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان کرد که پالس تا حد بالایی قادر به پیش‌بینی پاسخ سازه می‌باشد.



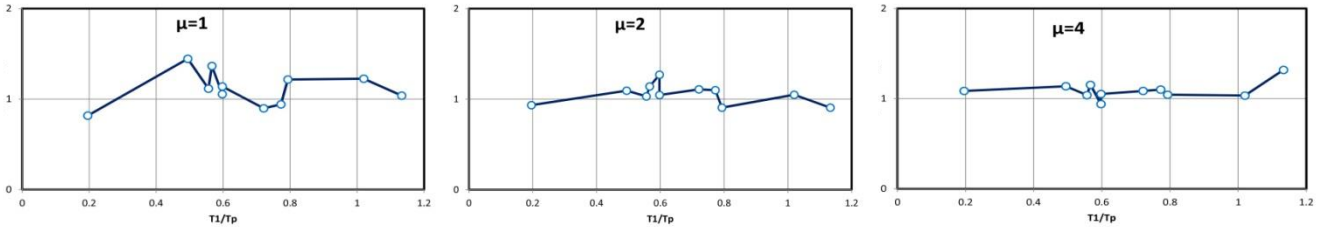
شکل ۱۵: نسبت حداکثر تغییرمکان نسبی در ارتفاع سازه تحت رکورد واقعی به پالس معادل متناظر برای قاب ۲ طبقه.



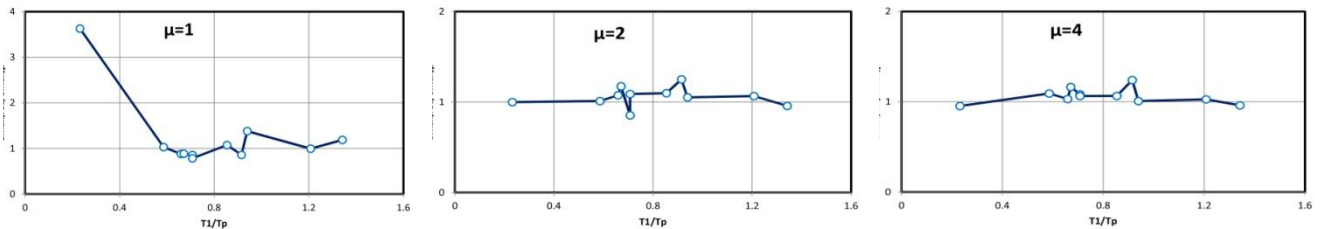
شکل ۱۶: نسبت حداکثر تغییرمکان نسبی در ارتفاع سازه تحت رکورد واقعی به پالس معادل متناظر برای قاب ۶ طبقه.



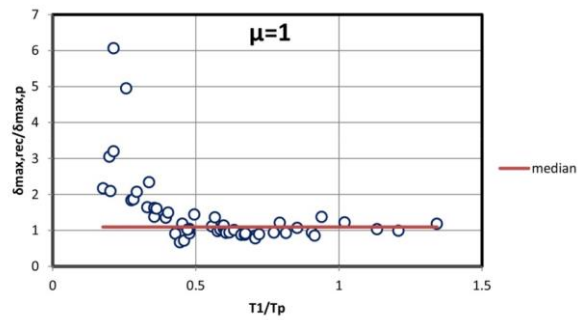
شکل ۱۷: نسبت حداکثر تغییرمکان نسبی در ارتفاع سازه تحت رکورد واقعی به پالس معادل متناظر برای قاب ۹ طبقه.



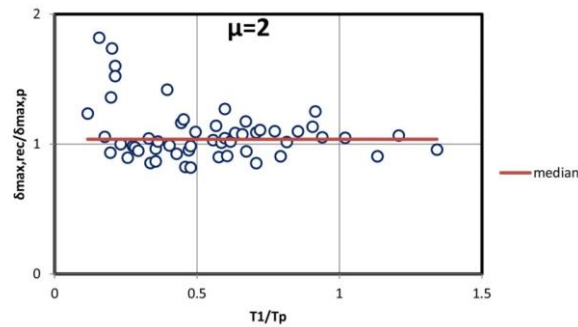
شکل ۱۸: نسبت حداکثر تغییرمکان نسبی در ارتفاع سازه تحت رکورد واقعی به پالس معادل متناظر برای قاب ۱۲ طبقه.



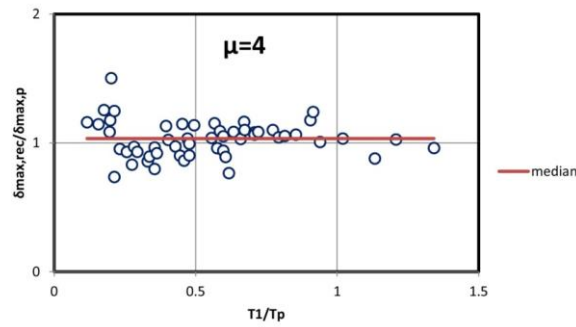
شکل ۱۹: نسبت حداکثر تغییرمکان نسبی در ارتفاع سازه تحت رکورد واقعی به پالس معادل متناظر برای قاب ۱۵ طبقه.



شکل ۲۰: نسبت حداکثر تغییرمکان نسبی رکورد واقعی به پالس معادل (median = 1.09).



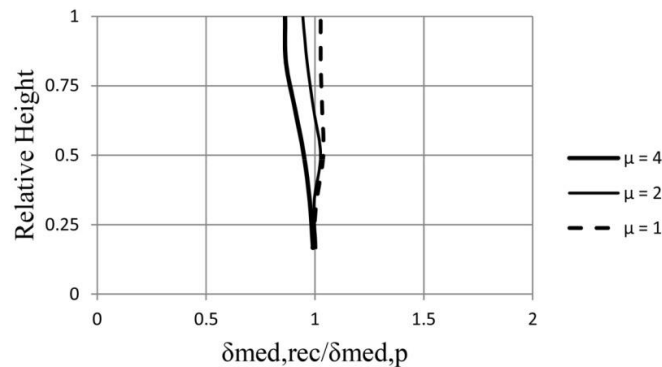
شکل ۲۱: نسبت حداکثر تغییرمکان نسبی رکورد واقعی به پالس معادل (median = 1.037).



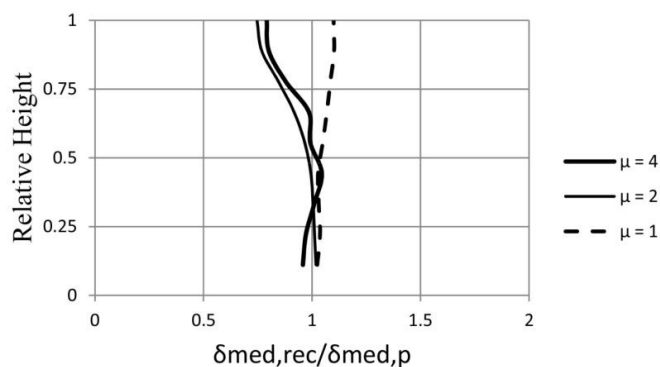
شکل ۲۲: نسبت حداکثر تغییرمکان نسبی رکورد واقعی به پالس معادل (median = 1.033).

۷-۳- توانایی پالس معادل در پیش‌بینی توزیع تغییرمکان نسبی طبقه در ارتفاع سازه

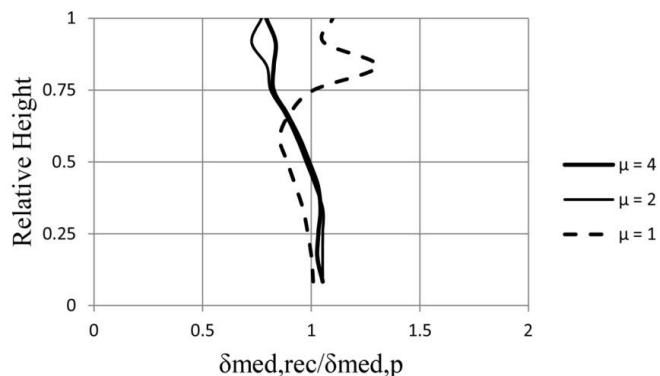
در این قسمت توانایی پالس در پیش‌بینی توزیع تغییرمکان نسبی در ارتفاع قاب‌ها ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه را بررسی می‌کنیم. قاب سه طبقه به دلیل پایین بودن دوره تناوب اصلی سازه در نظر گرفته نشده است. برای این کار تغییرمکان‌های نسبی حاصل از رکوردهای واقعی با تغییرمکان‌های حاصل از پالس‌های معادل مقایسه می‌شوند. برای هر طبقه، مقدار میانه تغییرمکان نسبی طبقه برای تمام رکوردهای واقعی و پالس‌های معادل در نظر گرفته می‌شود. مقدار میانه تغییرمکان نسبی حاصل از پالس‌های معادل $\delta_{median,p}$ و رکوردهای واقعی $\delta_{median,rec}$ می‌باشند. شکل‌های ۲۳ الی ۲۶ مقایسه بین پیش‌بینی پالس و رکورد واقعی را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها محور قائم ارتفاع نسبی ساختمان را از پایه و محور افقی نسبت $(\delta_{median,rec}/\delta_{median,p})$ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌ها می‌توان مشاهده کرد که نسبت میانه تغییرمکان نسبی حاصل از رکورد و پالس معادل نزدیک به یک هستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پالس‌های معادل توانایی پیش‌بینی توزیع تغییرمکان نسبی را دارند. حداکثر اختلاف بین پیش‌بینی رکوردهای واقعی و پالس معادل متناظر برای قاب‌های ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۱۳/۷۷ درصد، ۲۵/۳۳ درصد، ۳۰/۴۳ و ۳۰/۵۲ می‌باشد. این اختلاف برای سازه‌های بلندتر قابل انتظار است، چون برای سازه‌های بلند توزیع تغییرمکان توسط مدهای بالاتر کنترل می‌شوند. این مدها با تغییرات بلندتر فرکانسی همراه هستند که پالس نمی‌تواند اثرات آن‌ها را داشته باشد. به هر حال عملکرد پالس‌ها در پیش‌بینی این کمیت نیز در مقابل رکوردهای واقعی راضی‌کننده است.



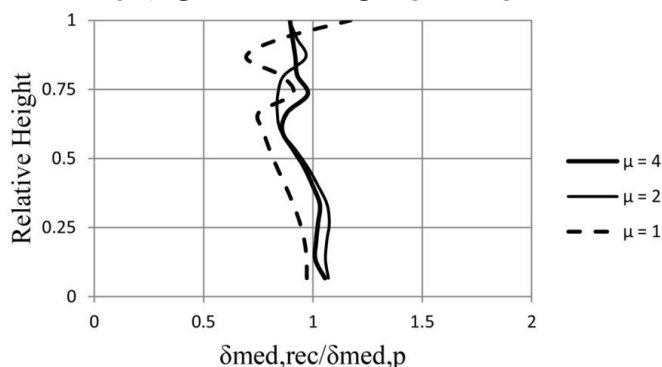
شکل ۲۳: مقایسه توزیع تغییرمکان نسبی حاصل از رکورد واقعی با پالس متناظر برای قاب ۶ طبقه.



شکل ۲۴: مقایسه توزیع تغییرمکان نسبی حاصل از رکورد واقعی با پالس متناظر برای قاب ۹ طبقه.



شکل ۲۵: مقایسه توزیع تغییرمکان نسبی حاصل از رکورد واقعی با پالس متناظر برای قاب ۱۲ طبقه.



شکل ۲۶: مقایسه توزیع تغییرمکان نسبی حاصل از رکورد واقعی با پالس متناظر برای قاب ۱۵ طبقه.

۸- نتیجه گیری

در این مطالعه به منظور ارزیابی توانایی پالس معادل تولید شده توسط یک مدل ریاضی شبیه‌ساز پالس جهت تخمین پاسخ قاب‌های خمشی بتن‌آرمه، پنج قاب بتن‌آرمه ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه تحت رکوردهای واقعی و پالس‌های معادل متناظر مورد آنالیز قرار گرفتند. سپس جهت ارزیابی، نتایج برش پایه، حداکثر تغییرمکان نسبی و توزیع تغییرمکان نسبی طبقه در ارتفاع سازه در سه سطح شکل‌پذیری برای قاب‌ها، استخراج شدند. در بررسی تقاضای برش پایه، با توجه به مقادیر میانه برای رکوردهای موجود میزان خطاها برای سه سطح شکل‌پذیری ۱، ۲ و ۴ به ترتیب ۶ درصد، ۱۱ درصد و ۹ درصد می‌باشد. نسبت میانه تغییرمکان نسبی حاصل از رکورد و پالس معادل نزدیک به یک هستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پالس‌های معادل توانایی پیش‌بینی توزیع تغییرمکان نسبی را دارند. حداکثر اختلاف بین پیش‌بینی رکوردهای واقعی و پالس معادل متناظر برای قاب‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۱۳/۷۷ درصد، ۲۵/۳۳ درصد، ۳۰/۴۳ و ۳۰/۵۲ می‌باشد. این اختلاف برای سازه‌های بلندتر قابل انتظار است، چون برای سازه‌های بلند توزیع تغییرمکان توسط مدهای بالاتر کنترل می‌شوند. این مدها با تغییرات بلندتر فرکانسی همراه هستند که پالس نمی‌تواند اثرات آن‌ها را داشته باشد. به‌رحال عملکرد پالس‌ها در پیش‌بینی این کمیت نیز

در مقابل رکوردهای واقعی راضی کننده است. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، پالس معادل در پیش بینی پاسخ قاب های مورد مطالعه که دوره تناوب آن ها نزدیک به پالس معادل یا از آن بیش تر است، کارایی لازم را داراست. البته برای دوره تناوب های بسیار پایین اختلاف زیاد است که این به دلیل محتوای فرکانسی بالای این نوع حرکات می باشد. ولی با افزایش تعداد طبقات و نزدیک شدن دوره تناوب پالس به دوره تناوب اصلی سازه و افزایش شکل پذیری پیش بینی پاسخ سازه دقیق تر می شود.

مراجع

- [1] Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W., Wald, D.J. (1995). Near source ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthquake Spect.* 11, pp. 569-606.
- [2] Iwan, W.D. (1997). Drift spectrum: measure of demand for earthquake ground motions. *J. Struct. Eng.* ASCE 123, pp. 397-404.
- [3] Makris, N. (1997). Rigidity-plasticity-viscosity: can electrorheological dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions?. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* 26, pp. 571-591.
- [4] Anderson, J.C., Bertero, V.V., Bertero, R.D. (1999). *Performance improvement of long period building structures subjected to severe pulse-type ground motions*. PEER Report 1999/09, University of California at Berkeley, California.
- [5] Malhotra, P.K. (1999). Response of buildings to near-field pulse-like ground motions. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* 28, pp. 1309-1326.
- [6] Alavi, P., Krawinkler, H. (2001). *Effects of near-fault ground motion on building structures*. CUREE-Kajima Joint Research Program Report, Richmond, California.
- [7] Alavi, B., & Krawinkler, H. (2004). Behavior of moemnt-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions. *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 33, pp. 687-706.
- [8] Mavroeidis, G.P., Papageorgiou, A.S. (2003). A mathematical representation of near-fault ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93 (3), pp. 1099-1131.
- [9] Tian, Y.j., Yang, Q.sh., Lu, M.q. (2007). Simulation method of near-fault pulse-type ground motion. *ACTA SEISMOLOGICA SINICA*, 20 (1), pp. 80-87.
- [10] Fu, Q., Menun, Ch. (2004). Seismic environment based simulation of near fault ground motion. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada.
- [11] Li, X.L., and Zhu, X. (2004). Study on equivalent velocity pulse of near fault ground motions. *Acta Seismologica Sinica*, 17, pp. 697-706.
- [12] Makris, N., Black, C.J. (2004). Evaluation of peak ground velocity as a "Good" intensity measure for near-source ground motions. *J. Eng. Mech.* 130 (9), pp. 1032-1045.
- [13] Xie, L., Xu, L., Rodriguez-Marek, A. (2005). Representation of near-fault pulse-type ground motions. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 4 (2), pp. 191-199.
- [14] Baker, J. (2007). Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97 (5), pp. 1486-1501.
- [15] Baker, J. (2008). Identification of near-fault velocity pulses and prediction of resulting response spectra. *Proceedings, Geotechnical Earthquake Engineering and Structural Dynamics IV*, Sacramento, CA.
- [16] Yaghmaei-Sabegh, S. (2010). Detection of pulse-like ground motions based on continues wavelet transform. *Journal of Seismology*. 14 (4), pp. 715-726.
- [17] Benioff, H., (1955). *Mechanism and Strain Characteristics of the White Wolf Fault as Indicated by the Aftershock Sequence*. Earthquakes in Kern County, California, During 1955(G.B. Oakeshotte, ed.)" California Division of Mines Bulletin, 171: 199-202.
- [18] Housner, G., (1967). Characteristics of Strong-Motion Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 37: 19-31.
- [19] Aki, K. (1968). Seismic Displacement Near a Fault. *J. Geophys. Res.*, 73: 5359-5376.
- [20] Bertero, V.V., Mahin, S.A. and Herrera, R.A. (1978). A Seismic Design Implications of Near-Fault San Fernando Earthquake Records. *Earth-quake Eng. Struct. Dyn.*, 6: 31-42.
- [21] Chai, J.F. and Loh, C.H. (1999). Near-Fault Ground Motion and Its Effects on Civil Structures *Proceedings of the International Workshop on Mitigation of Seismic Effects on Transportation Structures*, Taiwan, 70-81.
- [22] Nakashima, M., Matsumiya, T., and Asano, K., (2000). Comparison in Earthquake Responses of Steel Moment Frames Subjected to Near-Fault Strong Motions Recorded in Japan, Taiwan and the US. *Proceedings of the International Workshop on Annual Commemoration of Chi-Chi Earthquake*, Technology Aspect, Taiwan vol. II, 112-123.
- [23] Sehati, R., Rodriguez-Marek, A., ElGawady, M.F., Cofer, W. (2011). *Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures*. Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, United States, Engineering Structures 33, pp.767-779.

- [24] Hoseini Vaez, S.R., Naderpour, H., Barros, R.C., (2014). Influence of Equivalent Pulses of Near Fault Ground Motions on Base-Isolated RC Structures. *9th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2014)*, Jun 30-July 2, Porto, Portugal, ISSN: 2311-9020; ISBN: 978-972-752-165-4, pp. 2101-2106.
- [25] Hoseini Vaez, S.R., Sharbatdar, M.K., Ghodrati Amiri, G., Naderpour, H., and Kheyroddin A., (2013). Dominant pulse simulation of near fault ground motions. *Earthq Eng & Eng Vib*, 12: 267-278.
- [26] Hoseini Vaez, S.R., Ghodrati Amiri, G., Sharbatdar, M.K., Naderpour, H., Kheyroddin, A. (2014). Prevalent Pulse Modelling for Near-Fault Records during 1978 Tabas and 2003 Bam Earthquakes. *Journal of Science & Technology, Transaction on: Civil Engineering, Sharif University of Technology*, Vol. 30-2, No. 1.2, pp. 107-116.
- [27] Gabor, D. (1946). Theory of communication. I. The analysis of information. *IEEE* 93, 429-441.
- [28] Somerville, P.G. (1997). Engineering characteristics of near fault ground motions. *SMIP97 Seminar Proceedings, Seminar on Utilization of Strong Ground Motion Data*, Pasadena, CA, pp. 9-28.
- [29] Mavroeidis, G.P., Dong, G., and Papageorgiou, A.S. (2004). Near-fault Ground Motions, and the Response of Elastic and Inelastic Single-Degree-of-Freedom Systems. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 33: 1023-1049.
- [30] Baker, J., (2007). Quantitative Classification of Near-fault Ground Motions using Wavelet Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5): 1486-1501.