

## اثر محتوای فرکانسی زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل بر عملکرد لرزه‌ای پایه پل‌های بتن‌آرمه

علیرضا مرتضایی، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

E-mail: a.mortezaei@semnaniau.ac.ir

دریافت: ۹۳/۱۱/۲۸ - پذیرش: ۹۴/۰۷/۳۰

### چکیده

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای پل‌ها مستلزم استفاده از زمین‌لرزه‌های طبیعی ثبت شده یا رکوردهای مصنوعی تولید شده جهت استفاده در تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی است. به سبب پیچیدگی مرتبط با خصوصیات اتلاف انرژی پل‌ها و مشخصه‌های دینامیک زمین‌لرزه‌ها، کیفیت و کفایت نتایج تحلیل‌های دینامیک غیرالاستیک وابستگی بسیار زیادی به جامعیت گروه رکوردهای زمین‌لرزه مورد استفاده، مدل‌سازی ریاضی پل و رفتار ماده دارد. این عوامل، لزوم در نظر گرفتن معیارهای مناسب برای انتخاب رکوردهای زمین‌لرزه و ارزیابی پتانسیل خسارت آنها جهت اتصال بین بارگذاری لرزه‌ای و پاسخ سازه‌ای را بیش از پیش مشخص تر می‌کند. بر اساس مطالعات پاسخ لرزه‌ای پایه پل‌ها، به خوبی مشخص شده آنچه که در بین پارامترهای فوق سبب افزایش خسارات سازه‌ای می‌گردد، محتوای فرکانسی زلزله می‌باشد. لذا در این مقاله، محتوای فرکانسی زمین‌لرزه به عنوان اصلی‌ترین عامل که پاسخ غیرالاستیک پایه پل‌های بتن‌آرمه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، در نظر گرفته شد. روش‌های مختلف تعیین محتوای فرکانسی زمین‌لرزه‌ها ارائه شده و بهترین روش جهت تعیین محتوای فرکانسی انتخاب گردید. به کمک روش انتخابی محتوای فرکانسی، هفت رکورد زمین‌لرزه بر اساس شاخص مربوطه تعیین شده و تأثیر این شاخص بر عملکرد لرزه‌ای پایه پل‌های بتن‌آرمه و روند وقوع تشکیل مفاصل پلاستیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که به دلیل مشخصات متفاوت زمین‌لرزه‌ها، الگوهای مفصل پلاستیک، که حاصل تحریکات لرزه‌ای می‌باشند، نشان‌دهنده تغییرات در بین زمین‌لرزه‌ها هستند. نتایج همچنین نشان می‌دهد که در یک زمین‌لرزه با محتوای فرکانسی بالا، مفاصل پلاستیک با طول بیشتری در پایه پل‌ها شکل می‌گیرند. برای زمین‌لرزه‌هایی که به یک دامنه حداکثر شتاب زمین مقیاس شده‌اند، محتوای فرکانسی کم، مفصل پلاستیک طویل‌تری را شکل می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: محتوای فرکانسی، زمین‌لرزه نزدیک گسل، عملکرد لرزه‌ای، پایه پل

### ۱. مقدمه

رکوردهای مناسب و با کیفیت بالا مورد توجه قرار گرفت. دلیل دیگری که گرایش تحقیق در خصوص انتخاب رکوردهای زمین‌لرزه را سرعت بخشید، توسعه سریع در محدوده مهندسی زلزله بر اساس عملکرد بود که در زمینه

انتخاب رکوردهای زمین‌لرزه برای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی موضوعی است که از دهه گذشته و بعد از ثبت

سبب هر یک از این پارامترهای لرزه‌ای پیشنهاد شده است.

بر اساس مطالعات پاسخ لرزه‌ای پایه پل‌ها، به‌خوبی مشخص شده که خسارت سازه‌ای اساساً به‌واسطه سه پارامتر لرزه‌ای مهم ایجاد می‌شود: دامنه، محتوای فرکانسی زمین‌لرزه و مدت زمان حرکت قوی زمین. هنگامی که پاسخ غیرالاستیک سیستم سازه‌ای چند درجه آزادی (MDOF) مد نظر قرار می‌گیرد، به عقیده بسیاری از محققین، آنچه که در بین پارامترهای فوق سبب افزایش خسارات سازه‌ای می‌گردد، محتوای فرکانسی زلزله می‌باشد. به‌دنبال این حقیقت، محققین مختلفی نتیجه گرفته‌اند که پاسخ غیرخطی پایه پل‌ها قویاً به فازبندی حرکت ورودی زمین و شکل (محتوای فرکانسی) طیف آن بستگی داشته که این دو ارتباط نزدیکی با بزرگای زلزله (M) و فاصله ساختگاه تا منبع (R) دارند (خالد و همکاران، ۲۰۱۱).

در این مقاله، محتوای فرکانسی زمین‌لرزه به عنوان اصلی‌ترین عامل که پاسخ غیرالاستیک پایه پل‌های بتن‌آرمه را برای زمین‌لرزه‌ها با شدت مشابه تحت تأثیر قرار می‌دهد، در نظر گرفته می‌شود. بدین منظور، محتوای فرکانسی هفت رکورد زمین‌لرزه بر اساس شاخص مربوطه تعیین شده و تأثیر این شاخص بر عملکرد لرزه‌ای پایه پل‌های بتن‌آرمه و روند وقوع تشکیل مفاصل پلاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲. محتوای فرکانسی یک رکورد زمین‌لرزه

### ۲-۱. پارامترهای ژئوفیزیک مؤثر بر محتوای فرکانسی

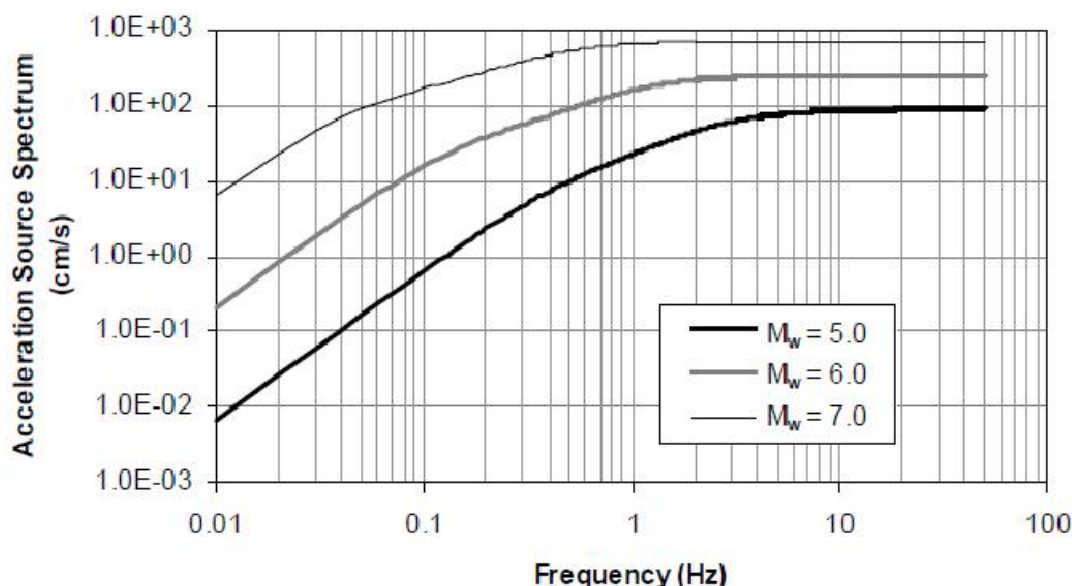
بهترین روش برای روند طبقه‌بندی زمین‌لرزه، استفاده از گروه‌های بزرگا - فاصله بوده که سناریوهای مختلف زلزله را ارائه می‌دهد؛ به عنوان مثال، یک زمین‌لرزه بزرگ ( $M > 6.7$ ) که در یک فاصله دور ( $R > 35$  km) از ساختگاه زمین اتفاق می‌افتد. زمین‌لرزه‌ها به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که طیف پاسخ الاستیک آنها (طیف پاسخ

طراحی و ارزیابی استفاده می‌شود. با این وجود، نتایج ارائه شده توسط محققین مختلف نشان داده که همچنان فقدان یک معیار متداول برای انتخاب زمین‌لرزه‌ها وجود دارد (آی و آکار، ۲۰۱۴). این عامل به‌سبب تغییرات در مشخصه‌های رکوردهای زمین‌لرزه بوده که منجر به انتخاب معیارهای متفاوت شده است. به عنوان مثال، داده‌های زمین‌لرزه را می‌توان بر طبق یک سناریوی زلزله خاص که رابطه بزرگا-فاصله (M-R) را در نظر می‌گیرد (انتخاب بر حسب پارامترهای ژئوفیزیک) در نظر گرفت. یا با در نظر گرفتن مشخصه‌های زمین‌لرزه، همچون شتاب حداکثر زمین (PGA) یا سرعت حداکثر زمین (PGV) (انتخاب بر حسب پارامترهای حرکت قوی) رکوردها را انتخاب نمود. لذا، لازم است جنبه متداول معیارهای موجود جهت این‌مان مورد تأکید قرار گیرد.

وقتی یک زلزله اتفاق می‌افتد، دامنه، فازبندی و محتوای فرکانسی لرزش وابستگی زیادی به مشخصات منبع (به عنوان مثال، بزرگا، مکانیزم گسلش، زاویه قرارگیری گسل نسبت به سایت، وقوع و یا عدم وقوع گسیختگی سطحی) (استوارت و همکاران، ۲۰۰۱) و خصوصیات (سختی، مقاومت و لایه‌بندی) لایه خاک و یا سنگ بین منبع و محل ضبط رکورد زلزله دارد (نیومارک و هال، ۱۹۶۹). به سبب دلایلی که برشمرده شد، هر زلزله ثبت شده در یک ساختگاه خاص، مشخصه‌های متفاوتی بر حسب دامنه (PGA و PGV)، محتوای فرکانسی (وجود مؤلفه‌های مختلف موج در ترکیب یک رکورد) و فاز امواج ورودی دارد. هنگامی که تمامی این پارامترها در نظر گرفته می‌شوند، بعید به نظر می‌رسد که هر رکوردی برای خطر لرزه‌ای مناسب باشد. به عنوان مثال، پیش‌بینی پاسخ محاسبه شده از حرکات زمین با شدت مشابه که بر حسب شدت واحدی همچون PGA یا شتاب طیفی در زمان تناوب اصلی سازه تعریف می‌شود، منجر به تغییرات قابل ملاحظه می‌گردد. لذا، معمولاً لازم است که گروهی از رکوردها مورد امتحان قرار گیرند. روش‌های اندازه‌گیری مختلفی جهت شناسایی پتانسیل خسارت یک زمین‌لرزه به

می‌دهند. به عبارت دیگر، یک شتابنگاشت غنی از فرکانس‌های مختلف با سطح دامنه متوسط می‌تواند خطر لرزه‌ای قابل ملاحظه‌ای را برای محدوده وسیعی از پروده‌های سازه‌ای ایجاد نماید. شکل ۱ مدل تتوریک طیف شتاب منبع پیشنهاد شده توسط آتکینسون و سیلوا (۲۰۰۰) را نشان می‌دهد که بزرگنمایی مؤلفه‌های موج در فرکانس‌های مختلف را به سبب افزایش بزرگای زلزله، خصوصاً در محدوده فرکانس‌های کم، نشان می‌دهد. علاوه بر آن، شرایط ساختگاه، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر محتوای فرکانسی زمین‌لرزه‌های ثبت شده دارد. تفاوت‌ها در شکل طیف پاسخ لرزه‌ای برای شرایط مختلف زمین‌شناسی مانند ساختگاه‌های سنگی و خاکی، مدت‌ها پیش شناخته شده و در آیین‌نامه ساختمانی بسیاری از کشورها وارد شده است. این اثر، خود سبب بزرگنمایی یا کاهش دامنه امواج خاص به سبب شرایط غیرخطی خاک، خصوصاً در خاک‌های نرم، و تغییر در ماهیت امواج می‌گردد. شرایط ساختگاه مقادیر حداکثر دامنه زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

خطر احتمالاتی) در یک نسبت میرایی خاص بر هم منطبق شده که به واسطه آن پتانسیل خطر لرزه‌ای تعریف شده توسط مشخصه‌های ساختگاه و منبع ارائه شود. محدوده وسیعی از مؤلفه‌های فرکانسی موج در ترکیب تاریخچه زمانی ضبط شده یک زمین‌لرزه وجود دارد. توان هر یک از این مؤلفه‌های موج در فرکانس‌های مختلف به سبب تعدادی از پارامترهای ژئوفیزیک ارائه شده در بالا که منجر به شکل‌های مختلف طیفی می‌گردد، متغیر است. پارامترهای ژئوفیزیک که شکل طیف (محتوای فرکانسی) را تحت تأثیر قرار می‌دهند اساساً شامل بزرگای زلزله ( $M$ )، اثرهای مسیر حرکت بر حسب فاصله منبع تا خاستگاه ( $R$ ) و شرایط زمین مسیر حرکت، و شرایط زمین‌شناسی محلی در ساختگاه ضبط رکورد هستند. یک شتابنگاشت حرکت زمین شامل مؤلفه‌های موج با محدوده فرکانسی محدود، اثرهای تخریبی خود را بر سازه‌هایی دارد که زمان‌های تناوب طبیعی آنها منطبق با زمان تناوب غالب رکورد زلزله باشد. این نوع از رکوردها، معمولاً ارتعاشات فرکانس بالا با دامنه بالا ( $PGA$ ) را نشان



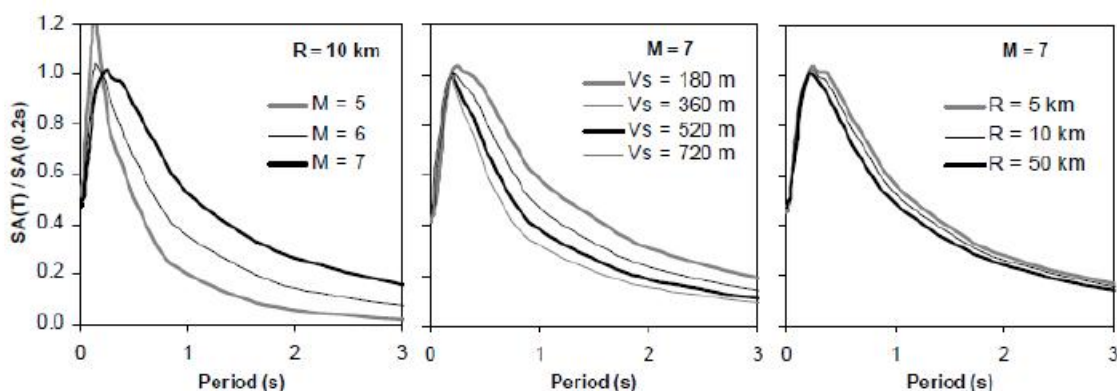
شکل ۱. مدل طیف منبع شتاب (آتکینسون و سیلوا، ۲۰۰۰)

$M$  و عدم وابستگی آن را به  $R$  مشخص کردند. بزرگا، یک متغیر اصلی و یک عامل اساسی بوده که ترکیب

در بین بسیاری از مطالعات موجود، سابتا و پوگلیس (۱۹۹۶)، وابستگی شکل طیفی (محتوای فرکانسی) را به

انواع مختلف شرایط ساختگاه ساخته شده است. از شکل مشخص است در حالی که بزرگا و طبقه‌بندی ساختگاه به طور قابل ملاحظه‌ای محتوای فرکانسی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (شکل‌های ۲-الف و ۲-ب)، فاصله منبع تا ساختگاه اثر بسیار کمی بر شکل طیفی دارد (شکل ۲-ج).

فرکانسی امواج منعکس شده را تعیین می‌نماید. فاصله، پارامتری است که سبب کاهش دامنه زمین‌لرزه شده و تأثیر اندک بر محتوای فرکانسی دارد. در راستای تأیید این گفته، شکل ۲، شکل نرمال شده طیف با استفاده از معادله کاهش شتاب طیفی را نشان می‌دهد که توسط بور و آتکینسون (۲۰۰۸) پیشنهاد شد و از مقادیر متوسط پیش‌بینی شده برای بزرگاهای مختلف، فواصل مختلف و



شکل ۲. شکل‌های طیفی پاسخ همپایه‌شده برای مقادیر مختلف بزرگا، فاصله و طبقه‌بندی زمین (بور و آتکینسون، ۲۰۰۸)

$(S_a(T_1))$  به شتاب طیفی متوسط مقیاس شدند، مقدار پراکندگی را برای مقادیر متوسط پاسخ در مقیاس با رکوردهای مقیاس نشده کاهش دادند. با توجه به این نکته، مؤثرترین سازوکار پیشنهادی برای تخمین نیاز غیرخطی از یک رویداد مشخص ( $R, M$ ) آن است که ابتدا به کمک روابط کاهندگی، شتاب طیفی متوسط که شدت لرزه‌ای را تعریف می‌کند، تخمین زده شود. آنگاه زمین‌لرزه‌ها به یک بزرگای یکسان از شتاب طیفی در یک زمان تناوب مشخص قبل از انجام تحلیل غیرخطی مقیاس شوند.

این محققین همچنین نتایج روند همپایه‌سازی پیشنهادی را با دیگر معیارهای مقیاس‌بندی مقیاس نمودند و برتری این روند پیشنهادی را بر دیگر روندها نشان دادند. آنها همچنین دریافتند، هنگامی که روش‌های مقیاس‌بندی بر اساس مشخصه‌های حداکثر زمین‌لرزه است، پراکندگی در مقادیر نیاز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

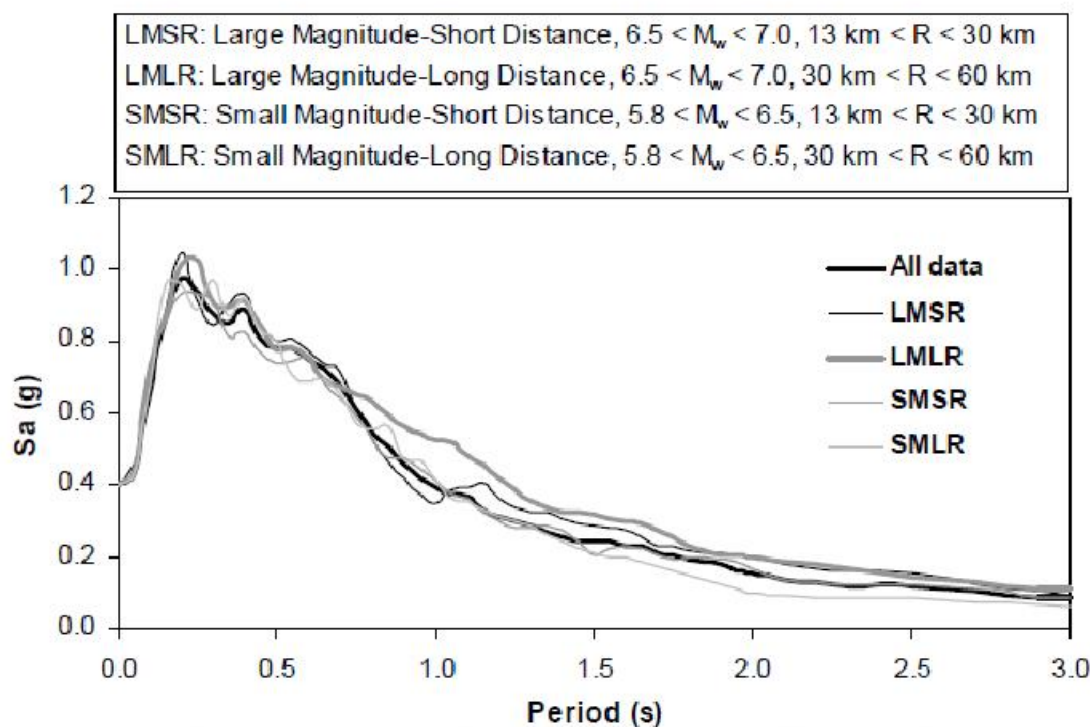
## ۲-۲. وابستگی شکل طیف و مقادیر نیاز به پارامترهای بزرگا - فاصله

اگرچه تأثیر زیادی بزرگای زلزله بر محتوای فرکانسی و مدت زمان زمین‌لرزه به‌خوبی مشخص شده، در برخی از مطالعات انجام شده، نتیجه‌گیری شده که رکوردهایی که چه به صورت اختیاری انتخاب می‌شوند و چه براساس مقادیر حداقل بزرگا - فاصله، تأثیری بر مقادیر متوسط نیاز ندارند، به شرط آنکه رکوردها در زمان تناوب اصلی سازه به طیف پاسخ متوسط الاستیک همپایه شوند.

به طور طبیعی، انتظار می‌رود که پاسخ غیرخطی اندازه‌گیری شده از گروهی از رکوردها، حتی برای مقادیر حداقل فاصله زمانی بزرگا و فاصله، دارای پراکندگی زیادی باشد. شوم و همکاران (۱۹۹۸) در پاسخ به این سؤال که آیا رکوردهای مقیاس شده نسبت به رکوردهای مقیاس نشده با شدت یکسان، پاسخ‌های غیرخطی متفاوتی را تولید می‌کنند، با استفاده از دسته رکوردهای با فاصله کم بزرگا و فاصله که در زمان تناوب اصلی سازه

که حتی رکوردهای انتخاب شده در گروه نسبتاً محدود، نیز دارای پراکندگی زیادی در محتوای فرکانسی است. شکل‌های طیفی متوسط برای مجموعه زمین‌لرزه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. پراکندگی نسبت به ترکیب بزرگا - فاصله حساس نبوده، اما بجز در زمان تناوب مقیاس شده، در تمامی زمان تناوب‌ها مقدار بالایی دارد. به دنبال این حقیقت، آنها نتیجه گرفتند که اثر محتوای فرکانسی بر پیش‌بینی نیاز توسط پراکندگی مقادیر طیفی نسبت به میانگین شکل طیفی تعیین‌کننده است.

مدینا و کراوینکلر (۲۰۰۳)، با مشخص نمودن وابستگی محتوای فرکانسی زمین‌لرزه به بزرگا و فاصله، بیان نمودند که به منظور کاهش انحراف در نیازهای محاسبه شده، رکوردها باید برای رویدادی با مقادیر حداقل بزرگا و فاصله انتخاب شوند. آنها از زمین‌لرزه‌های معمولی استفاده نمودند که فاقد مشخصه‌های خاص همچون زلزله‌های حوزه نزدیک حاوی اثر جهت‌داری بودند. آنها فرض نمودند که شتاب طیفی در زمان تناوب مد اول سازه ( $S_a(T_1)$ ) (به طور خاص‌تر، شتاب شبه‌طیفی) معیار اصلی شدت زمین‌لرزه است. با این وجود، آنها مشاهده کردند



شکل ۳. میانگین شکل‌های طیفی چهار مجموعه M-R (تمامی زمین‌لرزه‌ها به PGA یکسان مقیاس شده‌اند)

دادند. آنها همچنین پریود سازه‌ای و حساسیت را در تخمین نیاز غیرخطی مد نظر قرار دادند. زمین‌لرزه‌های انتخاب شده برای مطالعه در دو گروه طبقه‌بندی شدند. گروه هدف و گروه اختیاری، که هر یک شامل ۵ دسته بودند. رکوردهای گروه اختیاری به طور تصادفی و از یک کاتالوگ با محدوده فاصله و بزرگای نسبتاً وسیع انتخاب شدند. گروه هدف برای مطالعه انتخاب رکورد به گونه‌ای طراحی شدند که نماینده یک رویداد سناریوی خاص ( $R_s$ )

ایرونیلو و کورنل (۲۰۰۵)، در مطالعات خود، با مد نظر قرار دادن سئوال انتخاب و مقیاس‌بندی دامنه شتاب‌نگاشت‌ها برای تخمین پاسخ لرزه‌ای غیرخطی سازه‌ها، مشخصه‌هایی را مورد بررسی قرار دادند که باید در انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها در نظر گرفته شود. آنها راه‌های مؤثر مقیاس‌بندی رکوردها به منظور حصول سناریوی شدت (هدف) و تعداد کافی رکوردهای انتخابی در حصول مقادیر نیاز قابل اطمینان را مورد بررسی قرار

استفاده از تحلیل‌های طیفی سازه یک درجه آزادی تعیین نمود. به طور گسترده‌ای پذیرفته شده که اهمیت محتوای فرکانسی را می‌توان از طریق استفاده از طیف پاسخ شتاب یک رکورد و زمین‌لرزه شناسایی نمود، زیرا این طیف دانش و اطلاعات سازه را به مشارکت می‌گیرد. همچنین، پذیرفته شده است که محتوای فرکانسی زمین‌لرزه در شکل طیف پاسخ شتاب نیز منعکس می‌شود (بیکر و کورنل، ۲۰۰۶).

به منظور شناخت آنکه چرا شکل طیفی می‌تواند پاسخ سازه‌ای را تحت تأثیر قرار دهد لازم است که پاسخ یک سازه چند درجه آزادی در محدوده الاستیک و پلاستیک شناخته شود. پاسخ الاستیک سازه چند درجه آزادی توسط زمان تناوب مد اول مشخص شده و بر حسب شتاب طیفی محاسبه شد. در این زمان تناوب  $S_d(T_1)$  اندازه‌گیری می‌شود. با این وجود، علاوه بر پارامترهای مختلف، رفتار غیرالاستیک سازه‌های چند درجه آزادی تحت ارتعاشات لرزه‌ای متأثر از دو پدیده‌ی اصلی است که یکی کاهش سختی به دلیل زوال خصوصیات مکانیکی سازه به سبب حرکات رفت و برگشتی بوده و دیگری تحریکات مدهای بالاتر که منجر به پاسخ دینامیک می‌شوند، است. در حالی که پارامتر اصلی اول منجر به افزایش زمان تناوب سازه‌ای که نتیجه آن پاسخ نرم‌تر با افزایش نیازهای تغییرمکانی بود می‌شود و پارامتر اصلی دوم سبب تغییر در توزیع نیروی اینرسی شده که منجر به افزایش نیاز برش پایه می‌گردد. تحت اثر رفت و برگشت‌های تسلیم غیرالاستیک متوالی، مرتضایی (۲۰۱۲) نشان داد که زمان تناوب ارتعاش اصلی یک دیوار برشی تا مقداری معادل دو برابر قابل افزایش است. بنابراین، برای دو رکورد با مقدار مشابه  $S_d(T_1)$ ، رکوردی با مقدار بیشتر  $S_d$  در زمان تناوب‌هایی غیر از زمان تناوب  $T_1$  منجر به نیازهای تغییرمکانی بزرگتر از سیستم‌های غیرالاستیک می‌شود. نشان داده می‌شود که پاسخ سازه‌های چند درجه آزادی به شدت به افت و خیزهای طیف پاسخ شتاب حساس است.

IM که ممکن است یک خطر واقعی برای یک ساختگاه خاص، در اینجا بزرگای گشتاوری ۷ در فاصله ۲۰ کیلومتر، که به عنوان نزدیک‌ترین فاصله به گسلش گسل تعریف می‌شود، باشند. تمامی رکوردها از ۵ رویداد در محدوده بزرگای ۶/۷ الی ۷/۴ و در محدوده فاصله  $20 \pm 5$  کیلومتر بودند. برای هر سازه مورد نظر، این رکوردها در گروه‌های هدف به متوسط شتاب طیفی کلی خود در پیوند مد اول مقیاس شدند.

بسته به نتایج محاسبه شده، ایرولینو و کورنل (۲۰۰۵) بیان کردند که  $R$  و  $M$  در بیشتر اوقات نقش کمی در تحت تأثیر قرار دادن تغییرمکان‌های غیرخطی سازه‌ها داشته و هیچ شواهد مرتبگی که این در انتخاب رکوردها با توجه به چنین فاکتورهایی لازم است، یافت نشد. بنابراین، می‌توان گفت که تغییرمکان‌های غیرخطی سازه‌ای به  $R$  حساس نبوده و کمی به  $M$  حساس می‌باشند. همچنین، گفته شد که حالت‌هایی که ممکن است کمی حساسیت به بزرگا نشان دهند شامل ساختمان‌های بلندمرتبه با اثرات مهم مرتبه دوم و سیستم‌های با زمان تناوب بسیار کم است.

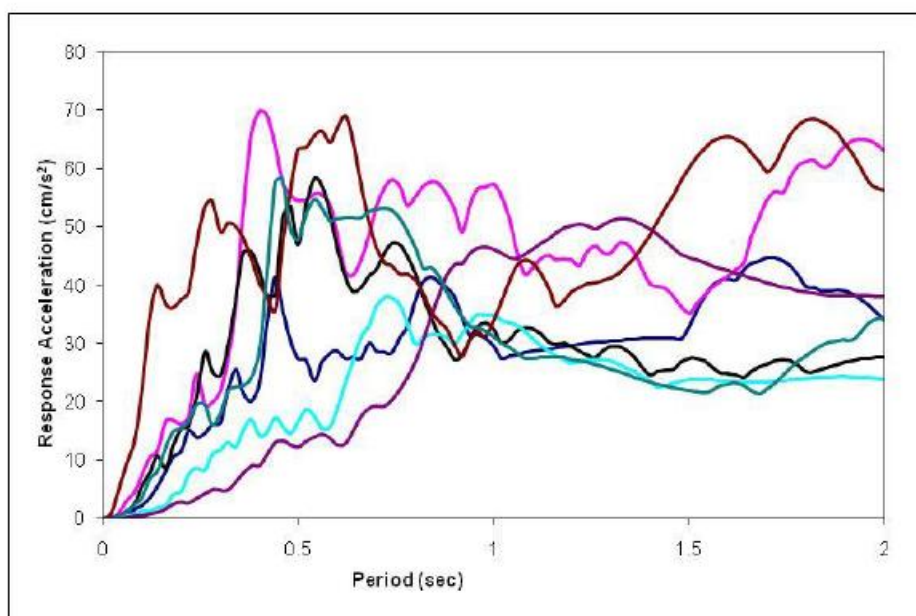
همانطور که مشاهده می‌شود، بجز پدیده کاهندگی دامنه زمین‌لرزه با دور شدن از منبع (کانون) زلزله، هیچ نتیجه مشخصی، در خصوص وابستگی محتوای فرکانسی و مدت زمان حرکت قوی زمین به بزرگا و فاصله وجود ندارد. در حقیقت، وقتی که یک معیار شدت زمین‌لرزه از نقطه نظر مهندسی سازه ارزیابی می‌شود، باید برحسب بارهای لرزه‌ای وارد بر سازه نسبت به خصوصیات لرزه‌شناختی خود آموزنده و مفید باشد.

## ۲-۳. طیف پاسخ

راه‌های مختلفی برای شناسایی محتوای فرکانسی یک زمین‌لرزه وجود دارد. محتوای فرکانسی زمین‌لرزه را می‌توان منحصراً به طور مستقل و بر اساس مشخصه‌های سازه‌ای همچون تحلیل‌های طیف فوریه تعیین نمود و یا می‌توان به طور مشترک با مشخصات دینامیک سازه‌ها با

اصلی الاستیک ( $T_1$ )، سیستم به ناحیه شتاب با دامنه بالا وارد شده و در معرض نیروهای لرزه‌ای بالایی قرار می‌گیرد. برای سیستم‌های تسلیم‌پذیر و شکل‌پذیر، وقتی زمین‌لرزه‌هایی متناسب با توصیف فوق در نظر گرفته شوند و سطح تسلیم افزایش یابد، نیازهای تغییرشکل کلی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. اگر مسیر تسلیم یا مسیر افزایش زمان تناوب منطبق با شاخه صعودی طیف باشد، این بدین معنی است که تغییرشکل‌های قابل ملاحظه‌ای روی سازه و بسته به مقاومت برش پایه اتفاق می‌افتد. در این حال، اگر مسیر افزایش روی شاخه نزولی طیف باشد، اگرچه زمان تناوب اصلی ( $T_1$ ) با شتاب‌های طیفی بسیار بالا منطبق می‌شود، ولی بسته به شیب طیف در طول مسیر تسلیم، به طور غیرمنتظره‌ای پاسخ‌های کلی بسیار کمی به دست می‌آیند.

در شکل ۴، طیف پاسخ الاستیک طیف شتاب برای مؤلفه EW زلزله طبس ( $PGA = 0.74g$ ) و شکل مقیاس شده آن داده شده است. تغییرمکان‌های بام حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی  $1/78$  میلی‌متر،  $6/22$  میلی‌متر،  $11/39$  میلی‌متر و  $25/01$  میلی‌متر را به ترتیب برای حداکثر شتاب زمین  $0/296g$ ،  $0/37g$ ،  $0/49g$  و  $0/74g$  نتیجه می‌دهد. افزایش  $PGA$  به مقدار  $32$  درصد (از  $g$   $0/37$  به  $g$   $0/49$ ) سبب افزایش  $83$  درصدی در تغییرمکان کل شده، در حالیکه افزایش آن به مقدار  $200$  درصد (از  $g$   $0/37$  به  $g$   $0/74$ ) منجر به افزایش  $300$  درصدی پاسخ کلی می‌گردد. توضیح این وضعیت این است که زمانی که شدت زمین‌لرزه افزایش می‌یابد، افزایش در زمان تناوب ( $T_f$ ) نیز به سبب افزایش سطح تغییرشکل‌های غیرالاستیک نیز رخ می‌دهد. به دلیل تغییر در زمان تناوب



شکل ۴. تأثیر افزایش زمان تناوب بر پاسخ سازه‌ای

ارتباط داشته که مستقیماً به محتوای فرکانسی زمین‌لرزه از طریق خصوصیات دینامیک سازه (زمان تناوب ارتعاشی طبیعی) مرتبط می‌شود. بنابراین، محتوای فرکانسی را می‌توان منحصرأ و مستقلاً بر اساس مشخصه‌های سازه‌ای تعیین نمود و یا به کمک تحلیل‌های طیفی سازه‌های یک درجه آزادی، به طور وابسته به همراه خصوصیات

### ۳. روش‌های تعیین شکل طیفی

با توجه به بحث فوق، مشاهده می‌شود که ارزیابی محتوای فرکانسی یک زمین‌لرزه دارای دو بعد می‌باشد: یک بعد به سبب مشخصه‌های یک زمین‌لرزه خاص (بزرگا، نوع گسلش، فاصله منبع) بوده که هر شتابنگاشت طبیعت فرکانسی خود را دارد و دیگری با پاسخ سازه‌ای

یک درجه آزادی برای یک نسبت میرایی ویسکوز ثابت،  $\xi$ ، طیف پاسخ الاستیک نامیده می‌شود. مقادیر شدت طیفی، پُراستفاده‌ترین شاخص‌های اندازه‌گیری در تعیین قابلیت خسارت یک زمین‌لرزه بوده، زیرا این شاخص‌ها مشخصه‌های سازه‌ای را در روند تصمیم‌گیری نیز دخالت می‌دهند.

### ۳-۳. پارامترهای دامنه

ملهوترا (۲۰۰۲) و کوردوا و همکاران (۲۰۰۰) بیان نمودند که معیارهای اندازه‌گیری خطر لرزه‌ای که بر اساس طیف پاسخ شتاب و با محوریت مد اول ارتعاشی سازه می‌باشند، منجر به تغییر قابل ملاحظه پاسخ غیرالاستیک شده که به شیب طیف زمان‌های تناوب افزایش یافته، همچون موقعیت نمایش داده شده در شکل ۴ بستگی دارد. کوردوا و همکاران (۲۰۰۰) یک پارامتر شدت ثانویه جهت منظور نمودن شکل طیفی (محتوای فرکانسی) پیشنهاد دادند که به صورت نسبت شتاب‌های طیفی در دو زمان تناوب، زمان تناوب مد اول ( $T_1$ ) و زمان تناوب بزرگتر ( $T_f$ ) بود که نماینده سازه غیرالاستیک (خسارت‌دیده) است. در حالی که شتاب طیفی در زمان تناوب مد اول،  $S_a(T_1)$ ، انطباق خوبی با سطح پاسخ سازه‌ای الاستیک که منعکس‌کننده شدت طیفی می‌باشد، دارد، پارامتر  $R_{sa} = S_a(T_f) / S_a(T_1)$  منعکس‌کننده شکل طیفی و در حقیقت پتانسیل خسارت در مرحله غیرالاستیک پاسخ می‌باشد. با این وجود، پارامتر مذکور به فراز و فرودهای طیف حساس بوده که به تبع آن قابلیت اعتماد مقادیر شدت پیشنهادی را کاهش می‌دهد.

معیارهای مختلفی برای اندازه‌گیری شدت طیفی وجود دارد که پتانسیل خسارت زمین‌لرزه‌ها را تعیین می‌نماید. هوسنر (۱۹۵۹) یک شدت طیفی پیشنهاد نمود که به صورت سطح زیر منحنی طیف سرعت در طول محدوده پریود بین ۰/۱ الی ۲/۵ تعریف می‌شود:

$$I_H = \int_{T=0.1s}^{2.5s} S_V(T, \xi) dT \quad (4)$$

دینامیک سازه‌ها تعیین نمود. در این مرحله، چهار روند جهت تحلیل محتوای فرکانسی از بقیه بارزتر هستند:

### ۳-۱. طیف فوریه

زمین‌لرزه‌ها را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از امواج هارمونیک (سینوسی) با فرکانس‌ها و زمان‌های ورود (فازهای) متفاوت در نظر گرفت. طیف دامنه فوریه (FAS) قادر به نمایش محتوای فرکانسی زمین‌لرزه است. یک طیف فوریه که دامنه‌ها در یک باند باریک فرکانس‌ها جمع می‌شوند بدین معنی است که حرکت دارای یک فرکانس (زمان تناوب) غالب است که می‌تواند یک تاریخچه زمانی هموار و اغلب سینوسی تولید نماید. در این حال، یک طیف باند پهن متناظر با یک حرکت که شامل فرکانس‌های مجزا می‌باشد، تولید یک تاریخچه زمانی نامنظم دنداندار می‌نماید. برای یک سری زمانی مشخص ( $f(t)$ ) با مدت زمان محدود ( $t_d$ )، طیف فوریه به صورت زیر است:

$$F(w) = \int_0^{t_d} f(t) e^{iwt} dt \quad (1)$$

و دامنه فوریه به صورت زیر است:

$$|F(iw)| = \left\{ \left[ \int_0^{t_d} f(t) \cos wt \right]^2 + \left[ \int_0^{t_d} f(t) \sin wt \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

با زاویه فاز فوریه:

$$\phi(iw) = \frac{\int_0^{t_d} f(t) \sin wtdt}{\int_0^{t_d} f(t) \cos wtdt} \quad (3)$$

### ۳-۲. طیف پاسخ الاستیک

تحت یک زمین‌لرزه فرضی، نمایشی از مقادیر حداکثر مطلق پاسخ (شتاب، سرعت و تغییرمکان)، به صورت تابعی از زمان تناوب (یا فرکانس) ارتعاش یک سیستم



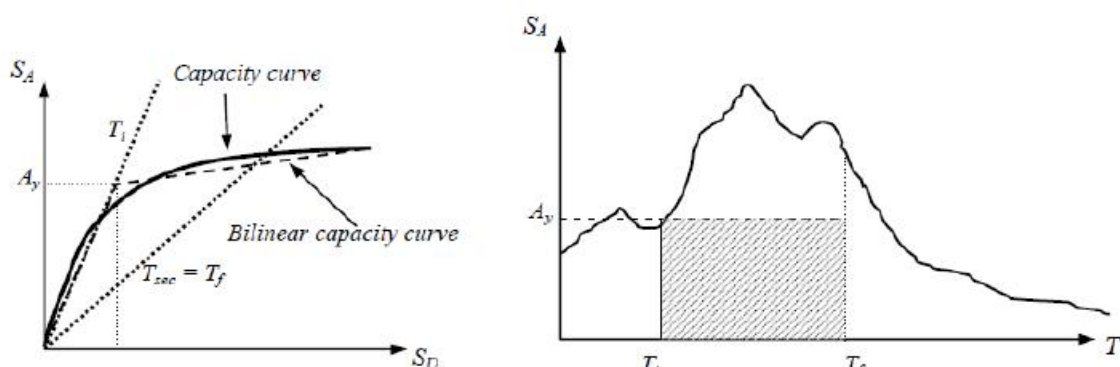
است. با همپایه نمودن سطح مذکور به کمک تقسیم بر سطح زیر سطح شتاب پایه تسلیم ( $A_y$ )، شدت بدون بعد به دست می آید که در معادله (۶) داده شده است:

$$I_a = \frac{1}{(T_f - T_i) A_y} \int_{T_i}^{T_f} S_a(T, \xi) dT \quad (6)$$

در مقایسه با معادله هوسنر (معادله ۴)، برای محدوده زمان تناوب کوتاه الی متوسط، رابطه زیر توسط کازز و یاکوت (۲۰۰۶) بر اساس طیف پاسخ شتاب پیشنهاد شد:

$$I_a = \int_{T_i}^{T_f} S_a(T, \xi) dT \quad (5)$$

معادله (۵)، سطح زیر منحنی طیف پاسخ شتاب بین زمان تناوب اصلی ( $T_i$ ) و پریود افزایش یافته محاسبه شده ( $T_f$ )



شکل ۵. توصیف نمایشی معیار اندازه گیری شدت طیفی ( $I_a$ )

(۳ مؤلفه از هر رکورد)، از ۴۶ ایستگاه در ۱۶ رویداد لرزه ای برای ساختگاه های رسوبی، سنگی، کمتر از ۱۰ متر رسوبی به همراه سنگ و بین ۱۰ الی ۶۰ متر رسوب روی سنگ را به ترتیب ۷/۵۷ و ۱۴/۳۰ و ۱۰/۴۴ و ۱۱/۷ تعیین نمودند. مقادیر نشان می دهند که نسبت  $A/V$  برای ساختگاه های سنگی اساساً بیشتر از ساختگاه رسوبی می باشد. نسبت های ارائه شده برای دو ساختگاه با لایه های رسوبی روی سنگ بین دو مقدار ساختگاه سنگی و رسوبی است. اگرچه مقدار متوسط نسبت  $A/V$  برای دو ساختگاه رسوبی روی سنگ به یکدیگر نزدیک هستند، اما ساختگاه های با لایه های رسوبی ضخیم تر نسبت های  $A/V$  بزرگ تری را تولید می نمایند که برخلاف انتظار است. بنابراین، از آنجایی که رویداد ضعیف تر در محتوای فرکانسی غنی می باشد، لذا مقدار شتاب  $A$  را بیشتر از سرعت ( $V$ ) تحت تأثیر قرار می دهد. لذا نسبت  $A/V$  محاسبه شده از زلزله های کوچک دارای مقادیر بیشتری می باشد.

### ۳-۴. نسبت شتاب به سرعت زمین لرزه ( $A/V$ )

در آیین نامه های اولیه مهندسی زلزله، حداکثر شتاب افقی زمین پارامتری است که معمولاً برای طراحی استفاده می شود و یک تخمین واقعی از سرعت زمین از نسبت های متوسط  $V/A$  گروه با حداکثر شتاب بزرگتر زمین به دست می آید. به کمک ضرایب بزرگنمایی مناسب، حداکثر شتاب و سرعت زمین جهت ساخت طیف طراحی الاستیک استفاده می شود.

در تاریخچه تحقیقات مهندسی زلزله، به طور معمول جهت تأکید بر اثر شرایط خاک محل بر پارامترهای زمین لرزه استفاده می شد. موهراز و همکاران (۱۹۷۲) با استفاده از ۱۴ رکورد واقعی و قائم زمین لرزه ها، نسبت  $V/A$  را برای ساختگاه های سنگی و رسوبی محاسبه و متوسط گیری نمودند. مقدار متوسط به دست آمده برای نسبت  $A/V$  برای ساختگاه های سنگی و رسوبی به ترتیب ۱۳/۷۹ و ۸/۰۵ بود. همچنین در تحقیقی دیگر، موهراز و همکاران (۱۹۷۲) مقدار نسبت  $A/V$  را از ۵۴ رکورد زلزله

جدول ۱. مشخصات رکوردهای انتخابی

ردیف	زلزله	سال	ایستگاه	مؤلفه	بزرگا ( $M_w$ )	فاصله تا گسل (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	PGA / PGV
۱	Tabas	۱۹۷۸	Tabas	TR	۷/۴	۳	۰/۸۵	۹۱/۴	۹۵/۰۶	۰/۹۱
۲	Loma Prieta	۱۹۸۹	LGPC	00	۷/۰	۱/۳	۰/۵۶	۹۴/۷۱	۴۱/۱۳	۰/۵۸
۳	Cape Mendocino	۱۹۹۲	Petrolia	90	۷/۱	۹/۵	۰/۷۶	۵۹/۶۸	۲۸/۹۹	۰/۷۸
۴	Kocali	۱۹۹۹	Duzce	DZC180	۷/۴	۱۲/۷	۰/۳۱۲	۵۸/۸	۴۴/۱۱	۰/۵۲
۵	Imperial Valley	۱۹۷۹	ELCentro Array #2	H-E02140	۶/۵	۱۶/۱	۰/۵۲	۳۱/۵	۱۴/۳۴	۱/۶۲
۶	Northridge	۱۹۹۴	Sylmar	360	۶/۷	۶/۴	۰/۷۱	۷۹/۳	۳۱/۹۲	۰/۸۸
۷	Bam	۲۰۰۳	Bam	L1	۶/۵	۷	۱/۰۹	۸۷/۲۶	۸۹/۲۴	۱/۲۲

بر پایه آن انجام می‌شود. به طور واضح‌تر، طیف پاسخ شتاب، حداکثر شتاب زمین (حداکثر شتاب مؤثر<sup>۱</sup>، EPA) را نمایش داده که پاسخ حداکثر را تولید می‌نماید، و شکل آن منعکس‌کننده محتوای فرکانسی تحریک می‌باشد.

تعداد ۷ رکورد زلزله انتخاب گردید که مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است. طیف پاسخ شتاب، سرعت و تغییرمکان این زمین‌لرزه‌های مقیاس شده در شکل‌های ۶ الی ۸ به ترتیب نشان داده شده است.

پایه پل با سطح مقطع مستطیلی جهت بررسی انتخاب شدند. دیوارها ارتفاعی برابر ۵ متر و طول ۲ متر داشتند. ضخامت دیوارها ۱۵۰ میلی‌متر بود. ناحیه مرزی به مقدار ۲۰۰ میلی‌متر در دو انتهای دیوار توسعه داده شد. نسبت سطح فولاد خمشی به سطح بتن در المان‌های مرزی برابر ۰/۰۱۵ بود. مقدار فولاد قائم و افقی در جان دیوار به ترتیب برابر ۰/۰۰۲۵ و ۰/۰۰۳۱ بود.

هر نمونه به عنوان یک طره قائم با نیروهای وارده از بالا و بار لرزه‌ای بارگذاری شدند. مدل اجزای محدود نمونه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. در تحلیل‌ها، مقاومت بتن ۳۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد.

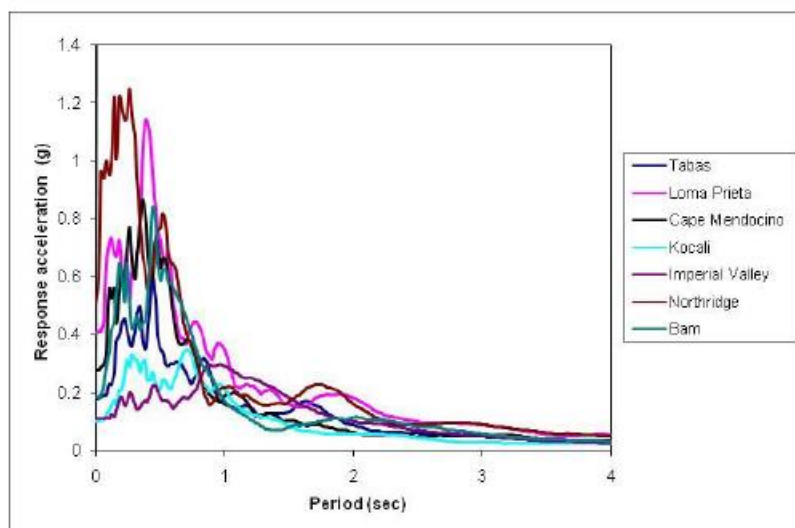
منطق‌های حاکم بر نسبت  $A/V$  این است که افزایش نسبی سرعت با توجه به شتاب، شاخصی از وجود مؤلفه موج-های زمان تناوب بالا بوده که منعکس‌کننده بزرگا و محتوای فرکانسی زلزله بوده و سبب خسارت سازه‌های می‌گردد. زیرا زمان تناوب طبیعی سازه‌های با پی‌رود متوسط و بالا با زمان تناوب این امواج یکسان شده و منجر به بزرگنمایی دینامیک تغییرمکان‌ها می‌شود. لذا، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که نسبت  $A/V$  که بر حسب پارامترهای زمین‌لرزه تعریف می‌شود، را می‌توان جهت تمایز زمین‌لرزه‌ها بر طبق محتوای فرکانسی استفاده نمود.

#### ۴. انتخاب زمین‌لرزه‌ها و سازه‌های مورد بررسی

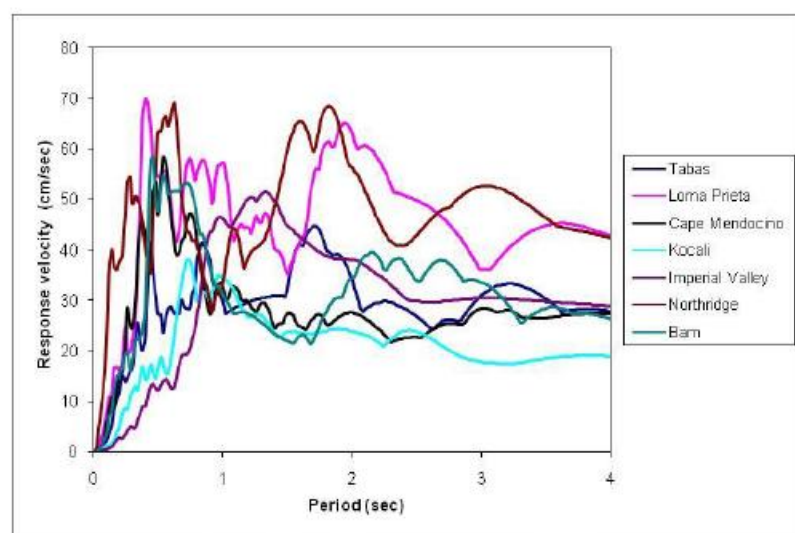
هدف کلی در انتخاب زمین‌لرزه، انطباق طیف پاسخ الاستیک در یک نسبت میرایی خاص به منظور ارائه پتانسیل خطر لرزه‌ای تعریف‌شده توسط مشخصه‌های ساختگاه و منبع زلزله است. در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود، زلزله طراحی بر اساس شکل هموار طیف پاسخ شتاب مشخص شده و شدت تحریک زمین‌لرزه تنها با یک پارامتر، حداکثر شتاب افقی زمین (PGA) تعیین می‌شود. در کارهای مهندسی، پتانسیل خسارت زمین‌لرزه بر اساس PGA ارزیابی شده و مقیاس نمودن زمین‌لرزه‌ها

1 - Effective Peak Acceleration

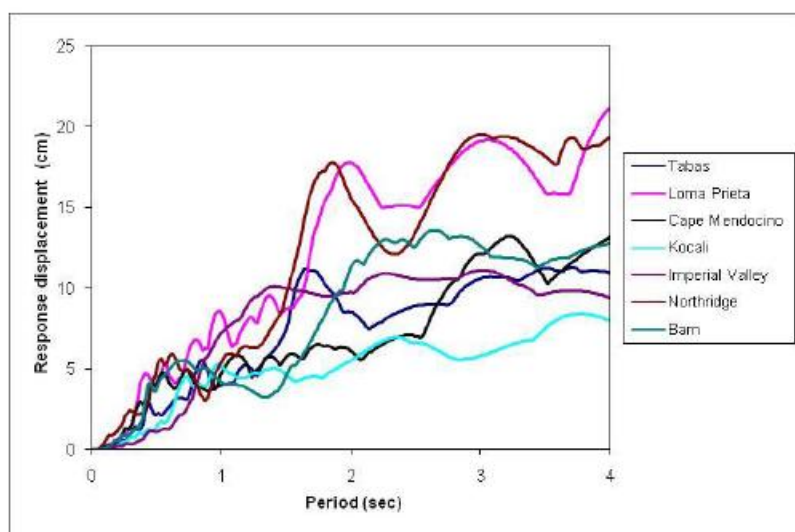
مرتضایی



شکل ۶. طیف پاسخ شتاب زمین لرزه‌های انتخابی



شکل ۷. طیف پاسخ سرعت زمین لرزه‌های انتخابی

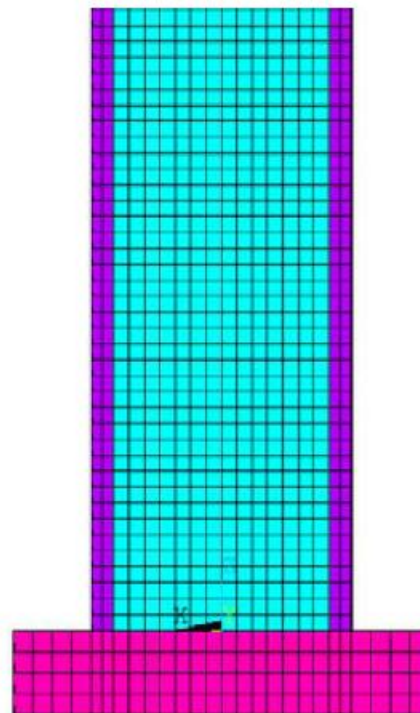


شکل ۸. طیف پاسخ تغییر مکان زمین لرزه‌های انتخابی

مانند تغییر مکان کلی و نسبت تغییر مکان و برش وارده در سطوح تغییر شکل مورد نظر و برای رکوردهای مختلف زمین‌لرزه تعیین شدند. لازم به یادآوری است که مقادیر حداکثر هر پارامتر پاسخ در راستای ارتفاع پایه پل در زمان‌های مختلف اتفاق افتاد.

## ۵. تفسیر نتایج

تأثیرات محتوای فرکانسی زمین‌لرزه‌ها و دقت الگوهای مختلف بار جانبی به‌کار رفته در تحلیل بارافزون به همراه مقایسه با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی ارزیابی شدند. برای این منظور، رفتار کلی پایه پل، نیروهای برش و طول مفاصل پلاستیک به عنوان پارامترهای پاسخ انتخاب شدند.



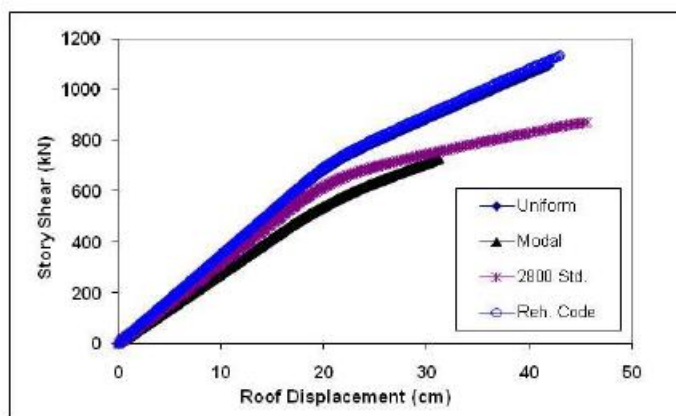
شکل ۹. مدل اجزای محدود نمونه‌های مورد بررسی

### ۵-۱. رفتار کلی سازه و منحنی‌های بارافزون

منحنی‌های ظرفیت پایه پل مورد بررسی که نشان‌دهنده میزان برش پایه در مقابل تغییر مکان بام یا به تعبیری نماینده پوش‌های بار-تغییر مکان سازه‌ها بوده و نماینده پاسخ کلی سازه است از تحلیل بارافزون استخراج و در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در این منحنی‌های ظرفیت، نتایج حاصل از توزیعات مختلف بارهای جانبی ارائه شده است. توزیع ارتفاعی الگوهای بار جانبی به همراه منحنی‌های ظرفیت نشان می‌دهد که شکل منحنی ظرفیت به توزیع ارتفاعی الگوی بار جانبی و مشخصه های غیرخطی سازه‌ای بستگی دارد. تحلیل‌های بارافزون با استفاده از الگوی بار جانبی یکنواخت، منحنی‌های ظرفیتی را نتیجه می‌دهند که نسبت به الگوی بار جانبی مثلثی دارای سختی اولیه و ظرفیت برش پایه بیشتر و حداکثر تغییر مکان کمتر است.

به منظور تعیین ظرفیت لرزه‌ای پایه‌های پل مورد بررسی، از تحلیل بارافزون استفاده شد. از آنجایی که رفتار غیرخطی با تغییر الگوی بارهای جانبی تغییر می‌نماید، کراوینکلر و سنویراتا (۱۹۹۸) پیشنهاد نمود که هنگام انجام تحلیل‌های بارافزون از الگوهای مختلف توزیع بار استفاده شود. پنج الگوی متداول بار جانبی به منظور احتمال توزیع نیروهای اینرسی وارد به قاب‌ها در طول زلزله به‌کار گرفته شدند. الگوهای بار جانبی به‌کار گرفته شده شامل الگوی بار جانبی یکنواخت، الگوی بار مدی، الگوی بار جانبی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰، الگوی بار جانبی بر اساس آیین‌نامه بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (۱۳۸۵) و الگوی بار جانبی چند مدی (یا SRSS) هستند. در این مطالعه، شش مدل الاستیک اول ارتعاش جهت محاسبه الگوی بار جانبی چند مدی (یا SRSS) در نظر گرفته شدند.

تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی برای رکوردهای زلزله انجام شدند. مقادیر مطلق حداکثر پارامترهای پاسخ



شکل ۱۰. منحنی ظرفیت پایه پل مورد بررسی

الف- هر تحریک لرزه‌ای منجر به پاسخ سازه‌ای متفاوتی می‌شود.

ب- هیچیک از الگوهای بار جانبی نتوانستند به طور کامل منحنی تغییرمکان دقیق حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای رکوردهای زمین‌لرزه را نتیجه دهند.

ج- پراکندگی‌ها در مقادیر تغییرمکان جانبی برای الگوهای بار جانبی مثلثی در محدوده غیرخطی بزرگتر می‌باشد.

د- توزیع و بزرگای حداکثر تغییرمکان جانبی در راستای ارتفاع پایه پل برای تمامی زمین‌لرزه‌ها نشان‌دهنده اثرهای جاری‌شدگی فولاد در سطوح تغییرشکل نسبی غیرخطی است.

### ۳-۵. طول معادل مفصل پلاستیک

موقعیت نقاط ضعیف و مدهای شکست محتمل که سازه تجربه خواهد نمود در حالت تحلیل‌های لرزه‌ای غیرخطی تعیین می‌شود. مفاصل پلاستیک اساساً عاملی جهت اتلاف انرژی بوده که انرژی ناشی از زلزله را از طریق دوران پلاستیک تلف نموده و سبب بازتوزیع لنگر می‌گردند. لذا، طول مفصل پلاستیک یک پایه پل بتن‌آرمه پارامتری مهم در ارزیابی پاسخ و خسارت سازه تحت زلزله محسوب می‌شود (شکل ۱۲). همانطور که انتظار می‌رفت، مقادیر بالای انحنای در محل مفصل پلاستیک اندازه‌گیری شد. مقادیر انحنای در محل مفصل پلاستیک نه فقط متأثر از تغییرشکل خمشی مفصل پلاستیک می‌باشد، بلکه تحت تأثیر پدیده لغزش- پیوستگی نیز قرار دارد. حداکثر

الگوی بار جانبی بر اساس آیین‌نامه بهسازی و الگوی بار جانبی مودال به ترتیب کمترین و بیشترین مقادیر ظرفیت-های برش پایه را نتیجه می‌دهند. استفاده از الگوهای بار جانبی SRSS یا آیین‌نامه‌ای، یک منحنی ظرفیت متوسط حاصل از الگوهای بار جانبی مثلثی برای سازه‌ها را بهتر نتیجه می‌دهد. الگوی بار جانبی یکنواخت اساساً محافظه‌کارانه بوده و به گونه‌ای که ظرفیت برش پایه را در حد بالایی تخمین زده و حداکثر تغییرمکان کلی نیاز را با توجه به الگوهای بار جانبی مثلثی در حد بالایی تخمین می‌زند. با توجه به رفتار دینامیک و پاسخ کلی پایه پل، رفتار کلی سازه که توسط الگوهای بار جانبی مثلثی پیش‌بینی می‌شود بهتر از الگوی بار جانبی یکنواخت است. الگوهای بار جانبی یکنواخت و مثلثی به ترتیب به نظر می‌رسند که حدود بالایی و پایینی رفتار کلی دینامیک تخمینی باشند.

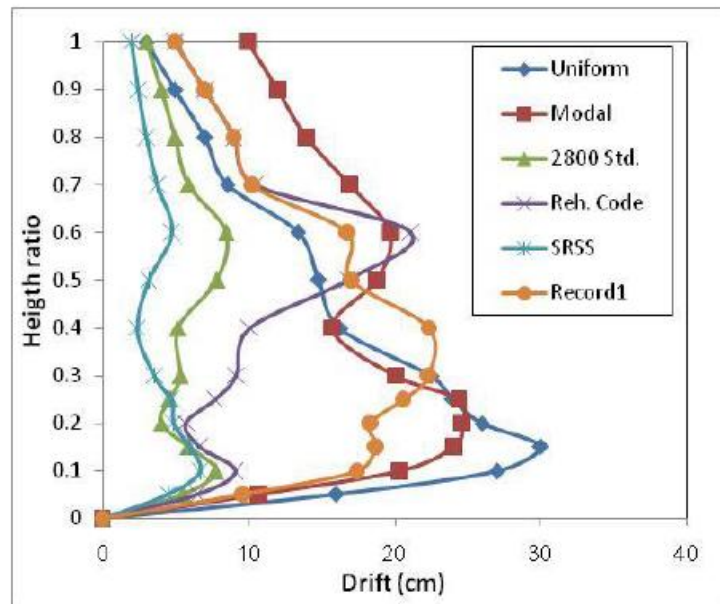
### ۲-۵. تغییرمکان جانبی

خسارت سازه‌ای ارتباط مستقیم با تغییرمکان جانبی پایه پل دارد. تخمین دقیق تغییرمکان جانبی برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای بسیار مهم و تعیین‌کننده است. در شکل ۱۱، تغییرمکان جانبی پایه پل برای چهار رکورد زمین‌لرزه نمایش داده شده است. در مدل‌های مورد بررسی، استخراج و بررسی تغییرمکان جانبی پایه پل منجر به مشاهدات و نتایج زیر گردید:

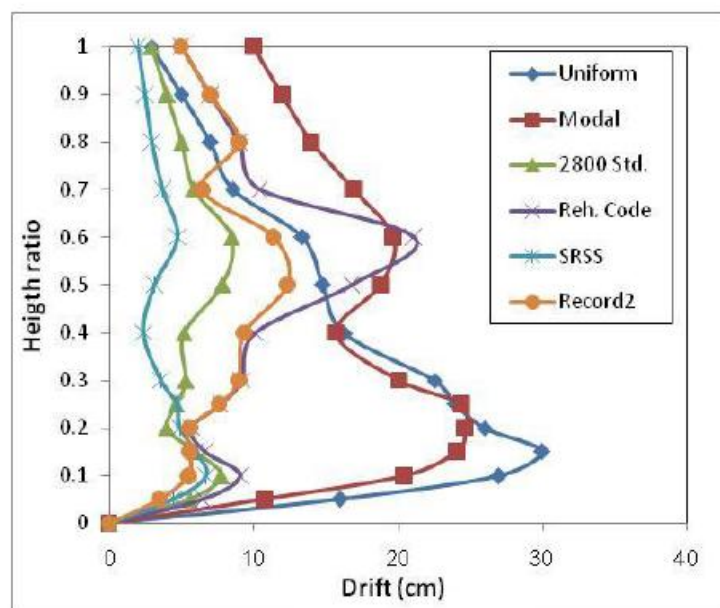
اثر محتوای فرکانسی زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل بر عملکرد لرزه‌ای پایه پل‌های بتن‌آرمه

تحت اثر دو رکورد سازگار بودند و دارای خسارت تقریباً یکسانی بودند.

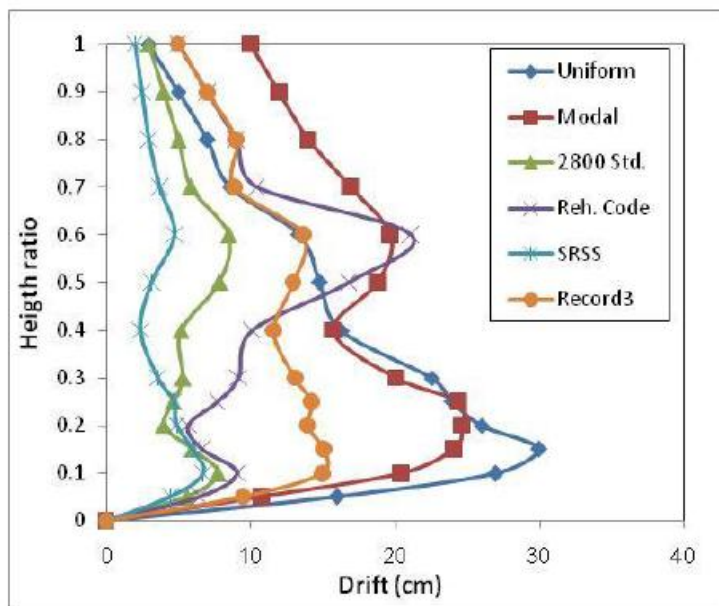
انحنای نهایی در پایه پل تحت رکوردهای طیس و بم قابل مقایسه بوده و دارای خسارت تقریباً یکسانی بودند. نتایج حاصل با ظرفیت‌های شکل‌پذیری تغییر مکانی مدل پل



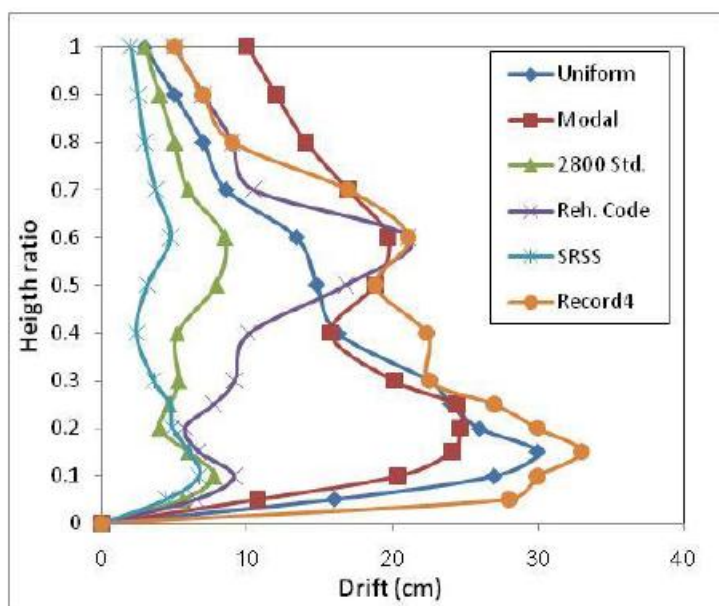
الف. نتایج حاصل از رکورد Imperial-Valley



ب. نتایج حاصل از رکورد Kocali



ج. نتایج حاصل از رکورد Bam



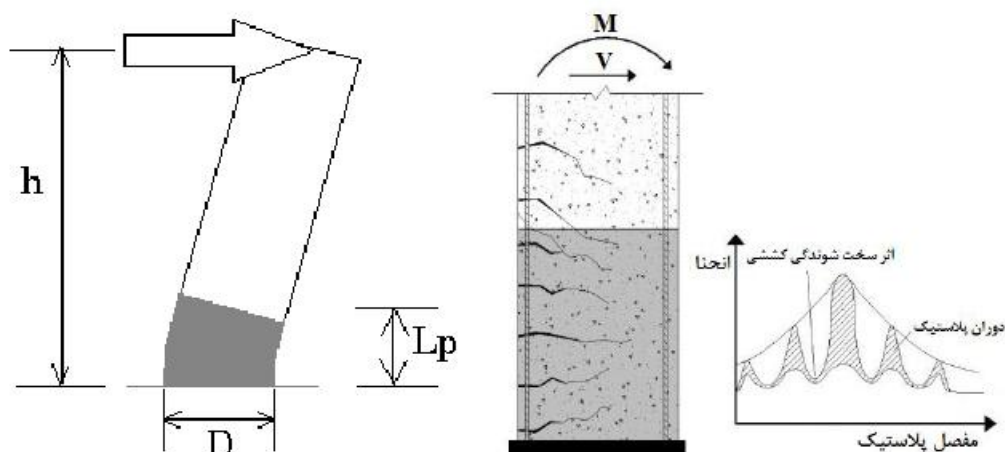
د. نتایج حاصل از رکورد Tabas

شکل ۱۱. منحنی‌های تغییرمکان جانبی حاصل از رکورد: الف) Imperial-Valley، ب) Kocali، ج) Bam و د) Tabas

حداکثر انحنای جانبی پایه پل تحت رکوردهای طبس و بم با یکدیگر قابل مقایسه بود که نشان‌دهنده عملکرد تقریباً مشابه پایه پل تحت این دو رکورد می‌باشد. در رکوردهای نورتریج و امپریال-ولی، حداکثر انحنای فوقانی در حدود ۲۰ الی ۲۵ درصد کمتر از انحنای تحتانی بود که عامل ناشی از دوران پایه پل تحت اثر بارگذاری زیاد می‌باشد.

نتایج حاصل با ظرفیت‌های شکل‌پذیری تغییرمکانی مدل پل تحت اثر دو رکورد سازگار بود. انحنای حداکثر در پایه پل تحت اثر زمین‌لرزه‌های نورتریج، امپریال-ولی و لوماپریتا قابل مقایسه بود، ولی در حدود دوسوم (۰/۶۷) انحنای حاصل از رکوردهای بم و طبس بود. انحنای کمتر که متناسب با ظرفیت‌های شکل‌پذیری تغییرمکانی کمتر هستند، برای این گروه از رکوردها محاسبه گردید.

اثر محتوای فرکانسی زمین لرزه‌های نزدیک گسل بر عملکرد لرزه‌ای پایه پل‌های بتن آرمه



شکل ۱۲. ناحیه مفصل پلاستیک در پایه پل‌های بتن آرمه

که ظرفیت انحنای نهایی  $\phi_u$  و  $\phi_y$  انحنای تسلیم می‌باشد. فرض شد که مرکز دوران در مرکز مفصل پلاستیک باشد. در جدول ۲، مقادیر پارامترهای محاسبه شده جهت تعیین طول مفصل پلاستیک آورده شده است. برای پایه‌های پل تحت اثر زمین‌لرزه‌های طبرس و بم به ترتیب مقادیر ۰/۷۵ و ۰/۸۳ برابر عرض پایه پل به دست آمد. مشاهده می‌شود که تحت اثر زمین‌لرزه‌های با محتوای فرکانسی زیاد، طول مفصل پلاستیک کوچکتری تا حدود ۱۰٪ به دست می‌آید. مقادیر طول مفصل پلاستیک ۰/۹۸، ۰/۹۶، ۱/۱۲ و ۱/۲۷ برابر عرض پایه پل تحت اثر رکوردهای کوچلی، امپریال-ولی، نورتریج و لوماپریتا به دست آمد.

طول مفصل پلاستیک، برای تخمین تغییر مکان‌های جانبی فراتسلیم بر اساس خصوصیات لنگر - انحنای مفصل پلاستیک استفاده می‌شود. به منظور تعیین حساسیت طول مفصل پلاستیک به محتوای فرکانسی زمین‌لرزه‌ها، طول مفصل پلاستیک برای پایه پل تحت اثر هر یک از رکوردها با استفاده از تغییر مکان‌ها و انحنای پلاستیک محاسبه گردید. از روش لنگر سطح برای مرتبط نمودن تغییر مکان‌ها و انحنای، با این فرض که دوران پلاستیک  $\theta_p$  در راستای ناحیه مفصل پلاستیک، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\theta_p = (\phi_u - \phi_y) l_p \quad (7)$$

جدول ۲. پارامترهای محاسبه شده جهت تعیین طول مفصل پلاستیک

رکورد							متغیر
Tabas	Bam	Loma Prieta	Cape Mendocino	Kocali	Imperial Valley	Northridge	
۰/۲۱	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۰۷	$\phi_p$ , Rad/mm
۱۶/۹۱	۱۸/۱۷	۲۱/۱	۲۱	۳۲/۱	۲۶/۷	۲۵/۵	$\Delta_y$ , mm
۱۶۱	۱۹۰	۹۵	۱۱۰	۱۲۱	۹۵	۸۵	$\Delta_u$ , mm
۱۴۸۰	۱۸۹۰	۱۴۷۰	۱۶۱۰	۱۷۲۰	۱۷۲۵	۱۶۹۰	L, mm
۳۵۰	۴۳۰	۳۷۰	۳۹۰	۴۹۰	۵۵۰	۷۵۰	$L_p$ , mm

و هیچیک از الگوهای بار جانبی ثابت نتوانستند تخمینی از رفتار دینامیک کلی را ارائه دهند. الگوهای بار جانبی یکنواخت و مثلثی حدود فوقانی و تحتانی تخمین رفتار کلی دینامیک را ارائه می‌دهند. همانطوری که در

## ۶. نتیجه گیری

نتایج حاصل از تحلیل‌ها و مشاهدات انجام شده روی پاسخ بارافزون پایه پل مورد بررسی نشان می‌دهد که تغییرات الگوهای بار جانبی در ارتفاع قابل ملاحظه نبوده



به دلیل مشخصات متفاوت زمین‌لرزه‌ها، الگوهای مفصل پلاستیک که حاصل تحریکات لرزه‌ای هستند، نشان‌دهنده تغییرات در بین زمین‌لرزه‌ها هستند. نتایج می‌دهد که در یک زمین‌لرزه با محتوای فرکانسی بالا، مفاصل پلاستیک با طول کمتری در پایه پل‌ها شکل می‌گیرد. برای زمین‌لرزه‌هایی که به یک دامنه حداکثر شتاب زمین مقیاس شده‌اند، زمین‌لرزه‌های با محتوای فرکانسی کم، طول مفصل پلاستیک بیشتری را شکل می‌دهند.

منحنی‌های بارافزون نمایش داده شده، تمامی الگوهای بار جانبی ثابت، رفتار دینامیک را تقریباً در تمامی سطوح در حد کمی تخمین می‌زنند. برای پایه‌های مورد بررسی، هر الگوی بار جانبی مثلثی را می‌توان بر طبق آیین‌نامه جهت تخمین پارامترهای پاسخ به‌کار برد، زیرا تفاوت در دقت پیش‌بینی نیازهای حاصل از الگوی بار جانبی مثلثی قابل ملاحظه نبود. الگوی بار جانبی یکنواخت اساساً نیازها را در قسمت‌های پایین‌تر نسبت به قسمت‌های بالاتر، بیشتر تخمین می‌زند.

## ۷. مراجع

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور. ۱۳۸۵. دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، نشریه شماره ۳۶۰.

- Atkinson G. M. and Silva, W. 2000. "Stochastic modeling of California ground motions". *Bull. Seismol. Soc. Am.* 90: 255-274.
- Ay, B. O. and Akkar, S. 2014. "Evaluation of a recently proposed record selection and scaling procedure for low-rise to mid-rise reinforced concrete buildings and its use for probabilistic risk assessment studies". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 43: 889-908.
- Baker, J. W. and Cornell, C. A. 2006. "Spectral shape, epsilon and record selection". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 35: 1077-1095.
- Boore, D. M. and Atkinson, G. M. 2008. "Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s". *Earthq. Spectra* 24: 99-138.
- Cordova, P. P., Deierlein, G. G., Mehanny, S. S. F. and Cornell, C. A. 2000. "Development of a two-parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure". *The 2<sup>nd</sup> US-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering*, PEER Report 2000/10, Hokkaido/Japan, pp. 195-214.
- Housner, G. W. 1959. "Behavior of structures during earthquakes". *ASCE, J. Eng. Mech. Div.* 85(4): 109-129.
- Iervolino, I. and Cornell, C. A. 2005. "Record selection for nonlinear seismic analysis of structures". *Earthq. Spectra* 21(3): 685-713.
- Kazaz, I. and Yakut, A. 2006. "Estimation of global displacement on the basis of spectral acceleration". *7<sup>th</sup> Int. Cong. on Adv. in Civil Eng.*, October 11-13, Istanbul, Turkey.
- Khaled, A., Massicotte, B. and Tremblay, R. 2011. "Cyclic testing of large-scale rectangular bridge columns under bidirectional earthquake components". *J. Bridge Eng.* 16: 351-363.
- Krawinkler, H. and Seneviratna, G. D. P. K. 1998. "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation". *Eng. Struct.* 20: 452-464.
- Malhotra, P. K. 2002. "Cyclic-demand spectrum". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 31(7): 1441-1457.
- Medina R. and Krawinkler, H. 2003. "Seismic Demands for Non-deteriorating Frame Structures and Their Dependence on Ground Motions". PEER Report 2003/15, University of California, Berkeley.
- Mohraz, B., Hall, W. J. and Newmark, N. M. 1972. "A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra". Nathan M. Newmark Consulting Engineering Services, Urbana, Illinois (AEC Report WASH-1255).
- Mortezaei, A. 2012. "Seismic Behavior of Flanged Shear Wall Buildings Subjected to Near-fault Earthquakes Having Forward Directivity". *15<sup>th</sup> World Conf. on Earthq. Eng.*, September 24-28, Lisbon, Portugal.
- Newmark, N. M. and Hall W. J. 1969. "Seismic Design Criteria for Nuclear Facilities". *Proc. of the 4<sup>th</sup> World Conf. on Earthq. Eng.*, Santiago de Chile, Vol. 2, pp. B-4-31.
- Sabetta, F. and Pugliese, A. 1996. "Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions". *Bull. Seismol. Soc. Am.* 86(2): 337-352.
- Shome, N., Cornell, C. A., Bazzurro, P. and do Carballo, J. E. 1998. "Earthquakes, records, and nonlinear responses". *Earthq. Spectra* 14(3): 469-500.
- Stewart, J. P., Chiou, S. J., Bray, J. D., Graves, R. W., Somerville, P. G. and Abrahamson, N. A. 2001. "Ground motion evaluation procedures for performance-based design". *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 22: 765-772.