

پاسخ سازه‌های جداسازی شده با درز لرزه‌ی ناکافی

مصطفی مسعودی* (استادیار)

مونا قلعه نوی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۹) ۲ - ۳۶، شماره ۱/۲، ص. ۹۷-۸۵

نوشتر حاضر، به بررسی عملکرد لرزه‌ی سازه‌های جداسازی شده‌ی پرداخته است، که در پی فلسفه‌ی نوین برای طراحی لرزه‌ی کم هزینه‌ی، الزامات آیین‌نامه‌ی درز لرزه‌ی مورد نیاز در آنها برآورده نشده است. پاسخ بازه‌ی گسترده‌ی از سازه‌های جداسازی شده و سازه‌های پایه‌گیردار همتای آنها به موجک‌های تحلیلی شتاب پالسی، که بیان‌گر حرکت حوزه‌ی نزدیک گسل است، برای برآورد نیاز لرزه‌ی هنگام برخورد به دیوار یا مانع بازدارنده ارزیابی و سیستم جرم - فنر - میراگر برای شبیه‌سازی برخورد با روش استریومکانیک بکار برده شد. نتایج تحلیل‌های پارامتری نشان می‌دهد که نیاز لرزه‌ی روسازه به دوره‌ی تناوب دیوار بازدارنده، درز لرزه‌ی و ویژگی‌های پالس تحلیلی جنبش زمین وابستگی بسیاری دارد. همچنین با درز لرزه‌ی کمتر از الزامات آیین‌نامه‌ی و انتخاب مناسب ویژگی‌های دینامیکی سامانه‌ی جداسازی شده، سطح عملکرد لرزه‌ی ساختمان‌های مذکور پس از برخورد تقریباً معادل عملکرد سازه‌های پایه‌گیردار همتای آنهاست و می‌توان با پذیرش خسارت در روسازه پس از برخورد در سطح خطر بالا، از فروپاشی کلی جلوگیری کرد و خسارت را از لایه‌ی جداگرها به روسازه منتقل کرد.

واژگان کلیدی: جداسازی لرزه‌ی، درز لرزه‌ی، برخورد، تحریک پالس مانند

حوزه‌ی نزدیک، عملکرد لرزه‌ی.

mmasoudi@kntu.ac.ir
m.g halehnoee@email.kntu.ac.ir

۱. مقدمه

نخستین مفاهیم و نگره‌های جداسازی لرزه‌ی برای کاهش خسارت‌های ناشی از زلزله بیش از یک قرن پیش مطرح^[۱] و به صورت مدرن و امروزی آن از اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی در ژلاندنو و اروپا بکار برده شده است.^[۲-۳] همچنین در ژاپن و آمریکا، نخستین ساختمان‌های جداسازی شده‌ی لرزه‌ی با روش‌های امروزی به ترتیب در سال‌های ۱۹۸۳^[۴] و ۱۹۸۶^[۵] به بهره‌برداری رسیدند. در پی زمین‌لرزه‌های فریولی در ایتالیا ۱۹۷۶، نورتریج در آمریکا ۱۹۹۴، کوبه در ژاپن ۱۹۹۵ و تایوان ۱۹۹۹ و خسارت‌های گسترده در سازه‌هایی که با روش‌های متداول برای زلزله طراحی شده بودند و مقایسه‌ی عملکرد آنها با پل‌ها و ساختمان‌های جداسازی شده، استفاده از این فناوری کارا و مؤثر، رشد چشمگیری یافت و همچنان ادامه دارد.^[۵-۷] البته تاکنون در همه‌ی موارد اشاره شده، شدت جنبش‌های لرزه‌ی به حدی نبوده است که سازه‌های جداسازی شده را حتی تا حدود نزدیک به ظرفیت جابه‌جایی جداگرهای آن آزموده باشد.^[۸-۱۱] همچنین با توجه به شمار کم سازه‌های جداسازی شده در مقایسه با سازه‌های گیردار، موارد کمتری از برخورد و کوبش سازه‌ها به دیوارهای بازدارنده^۱ و یا سازه‌های مجاور آنها گزارش شده است. فقط در یک مورد

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۴/۴، اصلاحیه ۱۳۹۷/۶/۱۴، پذیرش ۱۳۹۷/۶/۲۱

DOI:10.24200/J30.2018.5558.2387

با اعمال پالس‌های تحلیلی به سازه‌های جداسازی شده با جداگرهای اصطکاکی ساده، دوگانه و سه‌گانه بررسی و مشخص کردند که جهت‌پذیری زلزله باعث ایجاد نیازهای لرزه‌ی بیشتری نسبت به جنبش پرتابی می‌شود و در این حالت امکان برخورد با لبه‌ی نیم کاسه‌ی جداگرها برای سرعت‌های بالای جنبش زمین وجود دارد و افزایش دوره‌ی تناوب پالس تحلیلی باعث افزایش نیازهای لرزه‌ی می‌شود. با توجه به اهمیت جابه‌جایی جانبی بیشینه در زلزله‌های بسیار بزرگ و جنبش‌های پالسی حوزه‌ی نزدیک و محدود بودن ظرفیت جابه‌جایی جداگرها، الحان و غنچه (۲۰۱۶)^[۱۶] روشی را برای برآورد عملکرد لرزه‌ی سازه‌های جداسازی شده بر مبنای دو معیار جابه‌جایی جانبی و شتاب طبقات ارائه کردند و نشان دادند که محدود کردن هر دو معیار در جنبش‌های پالسی با دوره‌ی تناوب بالا بسیار دشوار است. نتایج ایشان یافته‌های هال و همکاران (۱۹۹۵)^[۱۳] و جنید و کلی (۲۰۰۱)^[۱۴] را در زمینه‌ی مورد نظر تأیید می‌کند. نکته‌ی قابل توجه، وجود محدودیت‌های ذکر شده در عملکرد لرزه‌ی سازه‌های جداسازی شده بدون برخورد با مانع بازدارنده یا سازه‌های مجاور است. این موضوع باعث کاهش کسر نسبت پیامدهای ناشی از برخورد به دلیل درز لرزه‌ی ناکافی به عملکرد بدون برخورد - که معمولاً تلقی بسیار مطلوبی از آن وجود دارد - خواهد شد.

اگرچه رفتار لرزه‌ی سازه‌های جداسازی شده و ویژگی‌های مکانیکی جداگرهای گوناگون به خوبی شناخته شده و پژوهش‌های بسیاری در باره‌ی آن صورت گرفته است، ولی رفتار آنها در جابه‌جایی‌های بزرگ و هنگام برخورد با هر نوع مانع هنوز نیاز به مطالعات بیشتری دارد. برای نخستین بار هال و همکاران (۱۹۹۵)^[۱۳] مسئله‌ی برخورد با دیوار بازدارنده را برای یک ساختمان سه طبقه‌ی جداسازی شده با دوره‌ی تناوب اصلی ۲/۲۵ ثانیه و منحنی رفتاری سه‌خطی برای طبقات و لایه‌ی جداساز و دوخطی برای دیوار بازدارنده با اندازه‌ی درزهای لرزه‌ی مختلف بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برای کاهش احتمال برخورد، باید درزهای لرزه‌ی بزرگ و میرایی قابل توجهی را برای لایه‌ی جداساز فراهم کرد، که باز هم احتمال تسلیم جانبی طبقات روسازه در نواحی نزدیک به گسل وجود خواهد داشت. پس از آن تسای (۱۹۹۷)^[۱۷] تنها با بررسی یک تیر برشی پیوسته‌ی جداسازی شده‌ی کشسان و همچنین مدل گسسته‌ی ناکشسان آن و فرض‌های مختلف برای سختی و مقاومت دیوار بازدارنده نشان داد که برخورد باعث افزایش بسیار زیاد شتاب در روسازه خطی می‌شود، ولی تسلیم روسازه باعث محدود شدن پاسخ شتاب تیر برشی به‌جز در پای تیر خواهد شد. میرایی دیوار نیز تأثیر زیادی در کاهش پاسخ‌ها ندارد. همچنین تغییر مقاومت و سختی دیوار بازدارنده، تأثیر ناچیزی در توزیع نیاز شکل‌پذیری در ارتفاع تیر دارد. دوره‌ی تناوب روسازه، ۰/۲۲ ثانیه و دوره‌ی تناوب تیر جداسازی شده، ۲ ثانیه انتخاب شده و تمام تحلیل‌ها تنها برای شتاب‌نگاشت ایستگاه‌السنتر، زلزله‌ی سال ۱۹۷۹ امپریال ولی انجام شده بود. ملهوترا (۱۹۹۷)^[۱۸] نیز با بررسی رفتار یک تیر برشی یکنواخت کشسان کاملاً جداسازی شده (سختی و میرایی صفر برای لایه‌ی جداگر) در برخورد با فتر کشسان در سه مرحله‌ی پیش از برخورد، هنگام برخورد و پس از برخورد مشخص کرد که برش پایه می‌تواند بیشتر از وزن تیر شود و مقدار آن با افزایش سرعت برخورد و سختی مانع و تیر برشی افزایش می‌یابد. روش به کار رفته برای مدل‌سازی برخورد در پژوهش‌های یاد شده،^[۱۸، ۱۷، ۱۹] همه حاکی از فرض برخورد کاملاً ناکشسان استریومکانیک با مانع بازدارنده‌ی بی‌جرم بوده است.

مسرور و ماسکید (۲۰۱۳)^[۱۹] در بررسی عملکرد سازه‌ی با جداگر لرزه‌ی، که با دیوار بازدارنده‌ی مجاور خود برخورد کرده بود، دریافتند که هنگام برخورد، شتاب در تمام طبقات و به ویژه در حالت‌هایی که درز لرزه‌ی کمتر است، افزایش

می‌یابد. کو و همکاران (۲۰۱۳)^[۲۰] اثر اندازه‌ی درز لرزه‌ی در عملکرد فروریزش سازه‌های جداسازی شده را بررسی کردند و با ارائه‌ی نمودارهایی، درز لرزه‌ی مورد نیاز برای داشتن سطح عملکردی مورد نظر را تخمین زدند. بر اساس نتایج آنها در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک، نیاز بیشتری برای درز لرزه‌ی نسبت به زلزله‌های حوزه‌ی دور وجود دارد. بنابراین درز لرزه‌ی متداول در ژاپن، که برابر ۶۰۰ میلی‌متر است، لزوماً برای همه‌ی حالت‌ها، با عملکرد مورد نظر تطابق ندارد. همچنین بررسی مذکور نشان‌دهنده‌ی کاهش نیاز درز لرزه‌ی هنگام افزایش مقاومت جانبی برای روسازه‌ی شکل‌پذیر است، در حالی که این افزایش مقاومت برای روسازه‌ی غیرشکل‌پذیر تقریباً بی‌تأثیر است.

کان و همکاران (۲۰۰۹)^[۲۱] مدل‌های برخورد متفاوتی را در مطالعات خود در نظر گرفتند و دریافتند که طبقات پایین‌تر، نیاز شکل‌پذیری بیشتری دارند و بیشتر تحت تأثیر برخورد به ویژه در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک هستند. این موضوع بستگی به محتوای بسامدی زمین‌لرزه دارد. مورونیکلا و همکاران (۲۰۱۷)^[۲۲] اثر جهت‌پذیری زلزله و خروج از مرکزیت^۵ را در پاسخ سازه‌های جداسازی شده بررسی کردند و نشان دادند برخورد در سازه‌هایی که خروج از مرکزیت دارند، آثار نامطلوب بیشتری دارد. همچنین مشخص شد که رانش میان طبقه‌ی به شدت وابسته به جهت‌پذیری زلزله است. کمودوموس و همکاران (۲۰۰۷)^[۲۳] تأثیر پارامترهای مهمی مانند سختی دیوار را در شتاب طبقات و رانش میان طبقه‌ی مطالعه کردند و دریافتند که برخلاف رانش میان طبقه‌ی، میزان شتاب در طبقات وابستگی بسیاری به مقدار سختی دیوار بازدارنده دارد. مطالعاتی که توسط دیما (۲۰۰۰)^[۲۴]، ماتساگاکا و جنید (۲۰۰۳)^[۲۵]، آگاروال و همکاران (۲۰۰۷)^[۲۶] پنت و ویجویکراما (۲۰۱۲)^[۲۷] انجام شده است، نشان دهنده‌ی اهمیت پدیده‌ی برخورد در سازه‌های جداسازی شده و پارامترهای طراحی، مانند: درز لرزه‌ی، سختی دیوار، نوع جداگر، میرایی، دوره‌ی تناوب جنبش پالسی و جرم دیوار است.

پژوهش‌های اخیر^[۲۸-۳۱] نشان داده است که خطر فروپاشی در روسازه‌های جداسازی شده با سختی بالا مانند قاب‌های مهاربندی نسبت به قاب‌های خمشی که سختی کمتری دارند، بیشتر است و افزایش مقاومت جانبی کمک زیادی به کاهش احتمال فروپاشی سیستم‌های سخت نمی‌کند، که به دلیل ایجاد نیاز شکل‌پذیری بسیار زیاد در سیستم‌های سخت پس از برخورد است. در این موارد، فقط افزایش ظرفیت جابه‌جایی جداگرها و پرهیز از برخورد، احتمال فروپاشی را کاهش می‌دهد. در مورد جداگرهای لغزشی دوگانه^۶ جرم روسازه، ضریب اصطکاک سطوح لغزش و شعاع نیم‌کاسه‌های جداساز و شعاع انحنا آنها، تأثیر زیادی در ساز و کار خرابی جداگرها در اثر برخورد با لبه‌های محدودکننده‌ی حرکت جانبی^۷ - که در دور نیم کاسه‌های جداگرهای لغزشی متداول در آمریکا قرار گرفته است - دارد.^[۳۲] در مورد اخیر، مدل‌سازی برخورد با موازی کردن فتر غیرخطی هرگز با میراگر انجام شده است.^[۳۳]

با توجه به موارد یاد شده و گسترش سازه‌های جداسازی شده‌ی لرزه‌ی به ویژه در مناطق لرزه‌خیز جهان، نگرانی‌ها در مورد عملکرد لرزه‌ی سازه‌های مذکور در زلزله‌های بسیار بزرگ (MCE)^۸ بیشتر شده است. بنابراین الزامات آیین‌نامه‌ی، سازه‌های با جداگر لرزه‌ی باید درز لرزه‌ی مشخصی از سازه‌های مجاور خود داشته باشند، تا از هرگونه برخورد جلوگیری شود، وگرنه افزایش نیاز جابه‌جایی و نیروی هنگام برخورد ممکن است از ظرفیت روسازه بسیار فراتر رود. در چنین شرایطی برتری به کارگیری جداسازی لرزه‌ی نسبت به روش‌های طراحی لرزه‌ی متداول ممکن است کاهش چشمگیری یابد.^[۱۳] از طرفی در بسیاری موارد، ارزش بالای زمین و

گسترده‌یی از پارامترهای مؤثر است. نظر به مطالعات و بررسی‌های صورت گرفته در مراجع یاد شده و این‌که دیدگاه مطرح شده هنوز در آغاز راه است، برای جلوگیری از پیچیده شدن موضوع، با ارائه‌ی یک مدل بنیادی، رفتار کلی سازه‌های جداسازی شده بر اساس فلسفه‌ی مورد اشاره در ادامه بررسی خواهد شد و مواردی، مانند اثر پیچش، مودهای بالاتر روسازه، آثار ناشی از در نظر گرفتن ویژگی‌های پیشای^{۱۲} جنبش‌های لرزه‌یی و جهت‌پذیری زلزله، نیاز به مطالعات بیشتری دارد. با این روش، امکان بررسی تأثیر پارامترهای مهم در طراحی اولیه‌ی مشخصات دینامیکی سامانه‌ی جداسازی شده برای برخورد کنترل شده با مانع بازدارنده ایجاد می‌شود و طرح از همان آغاز درخواهد یافت که برای کدام ویژگی‌های دینامیکی روسازه و سامانه‌ی جداسازی، امکان بهتری برای پایین نگاه داشتن نیازهای لرزه‌یی وجود دارد.

۲. مدل‌سازی برخورد

برخورد لرزه‌یی یا کوبش، که در آن نیروهای حاصل از برخورد در مدت زمان کوتاهی ظاهر می‌شود، به دو دسته‌ی کلی استریومکانیک^{۱۳} و نیروی پیوسته^{۱۴} تقسیم‌بندی می‌شود.^[۱۹،۱۸]

۲.۱. مدل استریومکانیک

با توجه به مطالعات کم و اطلاعات ناکافی در باره‌ی چگونگی و کیفیت برخورد و جدایش زیرسازه با دیوار بازدارنده، به جای استفاده از مدل‌های پیچیده، ساده‌ترین مدل که رویکرد استریومکانیک است، انتخاب شد. این رویکرد بر اساس فرض برخورد آبی و قانون پایستگی انرژی و تکانه است. در این مدل از ضریب برجهندگی (e)، برای به دست آوردن سرعت اجسام پس از برخورد بر اساس سرعت آنها پیش از برخورد استفاده می‌شود. با فرض برخورد دو جسم به جرم‌های m_1 و m_2 با سرعت‌های اولیه‌ی v_1 و v_2 و با استفاده از معادلات ۱ الی ۳، سرعت اجسام پس از برخورد (v'_1 و v'_2)، به دست می‌آید.

$$v'_1 = v_1 - (1 + e) \frac{m_2 (v_1 - v_2)}{m_1 + m_2} \quad (1)$$

$$v'_2 = v_2 + (1 + e) \frac{m_1 (v_1 - v_2)}{m_1 + m_2} \quad (2)$$

$$e = \frac{v'_2 - v'_1}{v_1 - v_2} \quad (3)$$

در یک برخورد کاملاً ناکشسان ($e = 0$)، دو جسم پس از برخورد با سرعت یکسان و در یک جهت حرکت می‌کنند. در حالی که $e = 1$ ، نشان‌گر یک برخورد کاملاً کشسان است و اجسام پس از برخورد در خلاف جهت یکدیگر حرکت می‌کنند. آنانگوستوپولوس و اسپیلیوپولوس (۱۹۹۲)^[۴۸]، برای شبیه‌سازی برخورد سازه‌ها ضریب برجهندگی را در محدوده‌ی ۰٫۵ تا ۰٫۷۵ در نظر گرفتند. پادراکاکیس و همکاران (۱۹۹۱)^[۴۹] و جانکوسکی و همکاران (۱۹۹۸)^[۴۰]، برای سازه‌های بتنی مقدار ضریب مذکور را برابر ۰٫۶۵ پیشنهاد دادند. کو و همکاران (۲۰۱۳)^[۴۰] با مطالعات آزمایشگاهی بر روی یک پل فولادی، عدد ۰٫۴ را برای سازه‌های فولادی پیشنهاد دادند. در پژوهش حاضر، به دلیل بیشتر بودن مجموع جرم روسازه و زیرسازه از جرم دیوار بازدارنده فرض بر آن است که هنگام برخورد، مجموعه در راستای حرکت زیرسازه به حرکت خود ادامه می‌دهد و به بیانی دیگر $e = 0$ و برخورد ناکشسان است.

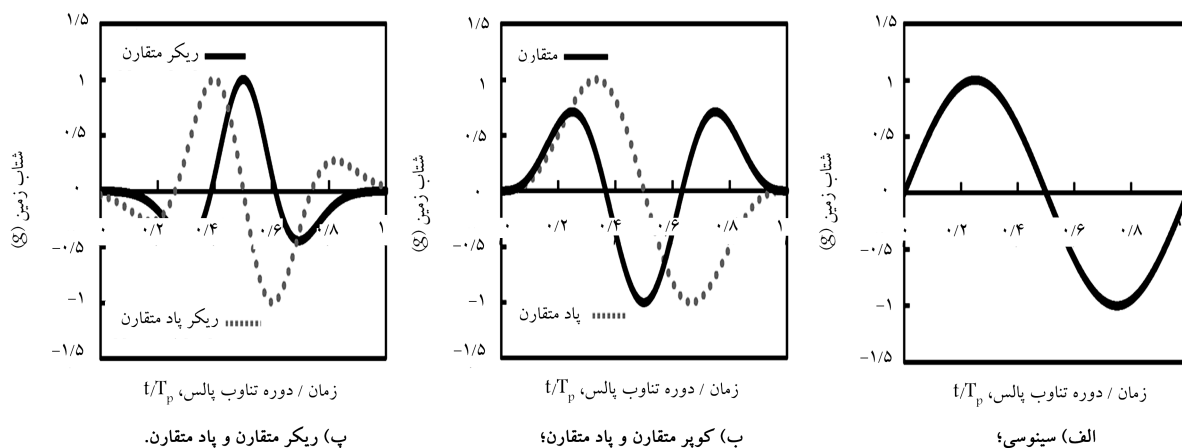
محدودیت‌های شهری، در نظر گرفتن درز لرزه‌یی بزرگی که الزامات آیین‌نامه‌یی را برآورده سازد و در زلزله‌های بسیار بزرگ، اجازه‌ی برخورد لایه‌ی جداسازی شده با دیوارهای بازدارنده را ندهد، اگر ناممکن نباشد، دشوار و پرهزینه است. در مقایسه با سازه‌های پایه گیردار، جابه‌جایی جانبی نیاز بیشتر در تراز جداگرها متمرکز می‌شود و روسازه مانند یک جسم صلب حرکت می‌کند.^[۴۳] افزون بر این، جداگرها در بیشینه جابه‌جایی جانبی هنگام زلزله‌های بسیار بزرگ باید زیر بارهای گرانشی پایدار بمانند.^[۳۳] این عوامل موجب استفاده از جداگرهایی پرهزینه در طراحی لرزه‌یی می‌شود، که خود از کاربرد فراگیر این فناوری برای بسیاری از ساختمان‌ها جلوگیری می‌کند.^[۴۲] بر اساس فلسفه‌ی آیین‌نامه‌های طراحی، سامانه‌های جداسازی شده باید در زلزله‌های متوسط عملکرد قابلیت بهره‌برداری بی‌وقفه (IO)^۹ و در زلزله‌های بسیار بزرگ، عملکرد آستانه‌ی فروریزش (CP)^{۱۰} را حفظ کنند. بنابراین روسازه، سطوح عملکردی میانی را که در محدوده‌ی قابلیت بهره‌برداری بی‌وقفه و آستانه‌ی فروریزش قرار دارد، تجربه نمی‌کند. این رفتار با اهداف عملکردی آیین‌نامه‌یی که برای ساختمان‌های متداول با اهمیت عادی در نظر گرفته شده، متفاوت است.

برابر آیین‌نامه‌ی ۷-۱۶، ASCE/SEI 7-10^[۴۵]، برای کاهش نیروهای لرزه‌یی، ضریب رفتار روسازه برابر با بیشینه‌ی $\frac{1}{8}$ ضریب رفتار (R)^{۱۱} سیستم روسازه با فرض پایه‌ی گیردار و ۲ در نظر گرفته می‌شود. همچنین باید تمام الزامات طراحی لرزه‌یی، شامل: جزئیات شکل‌پذیری سیستم سازه‌یی پایه‌ی گیردار، برای سیستم جداسازی شده‌ی همتای آن نیز رعایت شود. بنابراین ظرفیت لرزه‌یی روسازه تا برخورد تاوه‌ی روی جداگرها به دیوار و یا مانع بازدارنده‌ی اطراف آن تحت یک زلزله‌ی بسیار بزرگ (تقریباً با دوره‌ی بازگشت ۲۵۰ سال) بدون استفاده باقی می‌ماند. در نوشتار حاضر، به فلسفه‌یی نوین برای طراحی سازه‌های جداسازی شده با درز لرزه‌یی کمتر و در نتیجه با جداگرهای کم‌هزینه‌تر به دلیل ظرفیت جابه‌جایی کمتر پرداخته شده است. بر این اساس، سازه تا پیش از برخورد با دیوارهای بازدارنده، دارای ویژگی‌های لرزه‌یی یک سازه‌ی جداسازی شده است، ولی پس از برخورد باید ویژگی‌های دینامیکی سامانه‌ی جداسازی شده و روسازه چنان انتخاب شده باشد که با وجود درز لرزه‌یی ناکافی، عملکرد لرزه‌یی نه چندان متفاوتی در مقایسه با سازه‌ی پایه گیردار همتای خود داشته باشد. به این ترتیب سامانه‌ی جداسازی شده با درز لرزه‌یی کمتر از مقادیر آیین‌نامه‌یی، تا پیش از برخورد عملکرد بسیار بهتری از سازه‌ی پایه‌گیردار دارد و سطح عملکردی قابلیت بهره‌برداری را حفظ می‌کند، در حالی که سازه‌ی پایه‌گیردار همتای آن در سطح ایمنی جانبی قرار گرفته است و نیاز به بهسازی گسترده دارد و یا از نظر اقتصادی باید تخریب شود. در زلزله‌های بسیار بزرگ نیز که سازه‌ی جداسازی شده با مانع اطراف خود برخورد می‌کند، در مقایسه با سازه‌ی همتای گیردار و سازه‌ی جداسازی شده‌یی که محدودیتی در حرکت جانبی ندارد، هر سه در سطح عملکردی آستانه‌ی فروریزش قرار می‌گیرند و تفاوت چندان‌ی در عملکرد لرزه‌یی ندارند. بنابراین از این دیدگاه، وجود درز لرزه‌یی ناکافی باعث کنار گذاشته شدن گزینه‌ی جداسازی لرزه‌یی نمی‌شود.

در مطالعات پیشین انجام شده در باره‌ی موضوع برخورد، پژوهشگران به دنبال راهکارهایی برای جلوگیری و یا محدود کردن برخورد سازه‌ها و برآورد نیروهای ناشی از آن بوده‌اند. به عبارتی تنها آثار مخرب ناشی از برخورد را در روسازه برای تعدادی زلزله‌ی خاص و مطالعه‌ی موردی چند سازه بررسی کرده‌اند.^[۴۸] در پژوهش حاضر، برای مطرح کردن فلسفه‌یی نوین در پذیرش برخورد سازه‌های جداسازی شده با درز لرزه‌یی ناکافی، نیاز به بررسی آثار کلی برخورد زیرسازه با دیوار بازدارنده برای بازه‌ی

جدول ۱. پالس‌های تحلیلی.

موجک	معادله	مؤلفه‌ها
سینوسی	$a_p \sin\left(\frac{2\pi}{T_p} t\right)$	دامنه: a_p
کوپر	$a_p \left(\sin\left(m \frac{\pi t}{T_p}\right) - \left(\frac{m}{m+2}\right) \sin\left((m+2) \pi \frac{t}{T_p}\right) \right)$	دوره‌ی تناوب پالس: T_p
ریکر	$a_p \left(1 - \frac{2\pi^2 t^2}{T_p^2} \right) e^{-\left(\frac{\pi^2 t^2}{T_p^2}\right)}$	ضریب یکسان کننده‌ی دامنه: $\beta_R = 1/3.8$
	پاد متقارن	متقارن



شکل ۱. تاریخچه‌ی زمانی شتاب جنبش‌های پالسی تحلیلی زمین.

بر اساس نتایج برای دو سیستم نخست، پاسخ‌ها با هر دو دسته‌ی جنبش واقعی و پالسی، تطابق خوبی دارند، اما برای دو سیستم دیگر نتایج تحت تأثیر تعداد چرخه‌ها و جزئیات بارگذاری لرزه‌ی واقعی هستند. بنابراین در پژوهش حاضر، که به بررسی پاسخ سیستم‌های یک درجه آزاد و دو درجه‌ی آزادی جداسازی شده‌ی کشسان پرداخته شده است، به جای زلزله‌های واقعی با ویژگی‌های پیشا - که لزوماً تأثیر چندانی در مقادیر بیشینه و کمینه‌ی پاسخ‌ها ندارند^[۲۵] - از ۵ موجک که بر اساس ۳ نوع موجک تحلیلی به دست آمده‌اند،^[۲۷] استفاده شده است. معادلات موجک‌های تحلیلی مذکور و پارامترهای آن در جدول ۱ ارائه شده است. با این کار امکان انجام تحلیل ابعادی^{۱۷} بر اساس پارامترهای موجک‌ها فراهم می‌شود، که خود باعث در نظر گرفتن طیف گسترده‌ی از دامنه‌ها و دوره تناوب‌های جنبش زمین خواهد شد و این مزیت تا حدی مشکل اختلاف نظر در ویژگی‌ها و شمارنگاشت‌های واقعی لازم برای تحلیل و چگونگی تفسیر نتایج حاصل از تحلیل‌های پرشمار را برای یک نتیجه‌گیری قابل اعتماد، کم‌رنگ خواهد کرد.

تاریخچه‌ی شتاب موجک‌های یاد شده در شکل ۱ (الف) موجک سینوسی، (ب) موجک کوپر پادمتقارن ($m = 2$)، (پ) موجک کوپر متقارن ($m = 3$) و (ت و ث) به ترتیب موجک ریکر متقارن و ریکر پادمتقارن نشان داده شده و طیف پاسخ جابه‌جایی و شتاب موجک‌های مذکور در قالب متداول و استاندارد مراجع دینامیک سازه،^[۲۸] به صورت ضرایب بزرگ‌نمایی جابه‌جایی R_d و شتاب R_a در شکل ۲ ترسیم شده است. بدیهی است که برای بازه‌ی گسترده‌ی از مقادیر T_p/T_n ، افزایش میرایی منجر به کاهش مقادیر طیفی می‌شود. برای مقادیر بزرگ T_p/T_n ، پاسخ‌های اوج در زمان ارتعاش اجباری رخ می‌دهد و اثر میرایی در پاسخ طیفی ناچیز است. همچنین مقادیر شتاب و جابه‌جایی طیفی موجک ریکر پادمتقارن نسبت به موجک‌های دیگر بیشتر است.

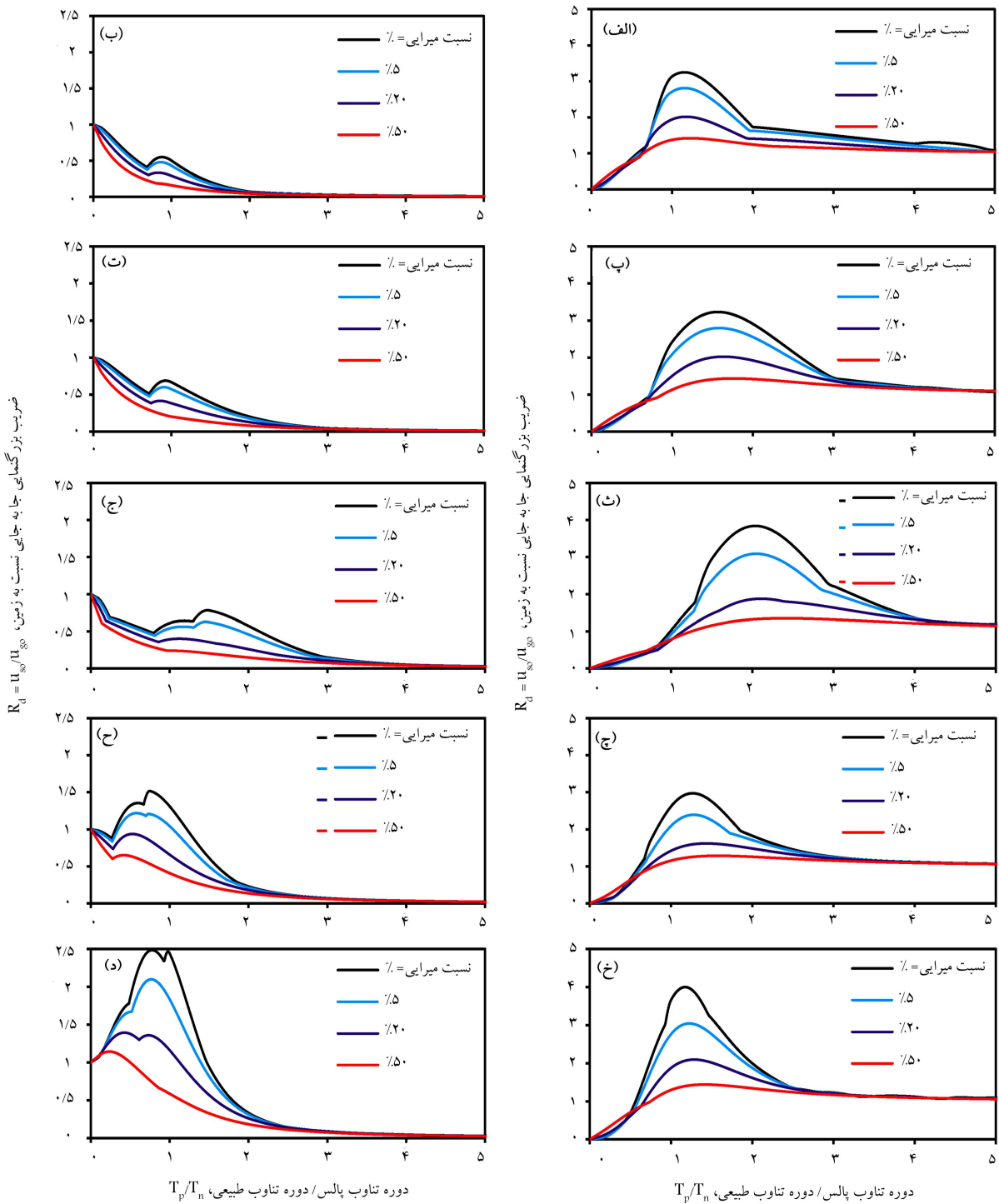
۲.۲. مدل نیروی پیوسته

رویکرد دیگر در مدل‌سازی برخورد، شبیه‌سازی مستقیم نیروهای ناشی از برخورد است، که به وسیله‌ی مدل‌های مختلفی، مانند: مدل کشسان خطی، مدل کلونین، مدل هرتز، مدل غیرخطی کشسان لزوج^{۱۵}، مدل غیرخطی هرتز با میراگر^[۲۶،۳۳] و مدل اصلاح شده‌ی کلونین مدل‌سازی می‌شود.^[۳۶] اطلاعات بیشتر در مطالعات کان و همکاران (۲۰۰۹)^[۲۱] و جانکوسکی و همکاران (۱۹۹۸)^[۴۰] ارائه شده است.

۳. پالس تحلیلی

پژوهش‌های انجام شده توسط هال و همکاران (۱۹۹۵)^[۱۳]، ماکریس (۱۹۹۷)^[۴۱]، ماکریس و چنگ (۱۹۹۸)^[۴۲]، وسیلیو و همکاران (۲۰۱۳)^[۴۳]، گرتاس و همکاران (۲۰۰۹)^[۴۴] و بائو و همکاران (۲۰۱۷)^[۴۵] نشان از تأثیر مهم زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در سازه‌های جداسازی شده دارد. وجود جنبش پالس مانند، معمولاً در ابتدای نگاشت‌های حوزه‌ی نزدیک به صورت تک پالس و یا ترکیبی از پالس‌های مختلف موجب ظهور ویژگی‌هایی خاص در رفتار سازه‌ها در مقایسه با نگاشت‌های حوزه‌ی دور می‌شود.

از آن‌جا که ارزیابی عملکرد سازه‌ها در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک، اهمیت بسیاری دارد، پژوهشگران برای شبیه‌سازی این جنبش‌های زمین از پالس یا موجک‌های تحلیلی ساده بر مبنای مطالعات آماری و لرزه‌شناسی آنها استفاده کرده‌اند.^[۲۷،۲۵] گارینی و همکاران (۲۰۱۷)^[۴۶] پاسخ ۴ سیستم دینامیکی ساده را به زمین‌لرزه‌های مختلف و ۲ موجک برآزش شده بررسی کردند. ۴ سیستم مذکور، در برگرنده‌ی نوسان‌گر کشسان یک درجه آزاد، نوسان‌گر کشسان - مومسان^{۱۶}، بلوک صلب لغزان بر سطح مسطح و شیب‌دار با در نظر گرفتن اصطکاک است.



شکل ۲. طیف شتاب و جابه‌جایی جنبش پالسی زمین در حوزه‌ی نزدیک با میرایی‌های مختلف. (الف و ب) سینوسی؛ (پ و ت) کویر پاد مقارن؛ (ث و ج) کویر مقارن؛ (چ و ح) ریکر مقارن؛ (خ و د) کویر مقارن.

شکل ۲. طیف شتاب و جابه‌جایی جنبش پالسی زمین در حوزه‌ی نزدیک با میرایی‌های مختلف.

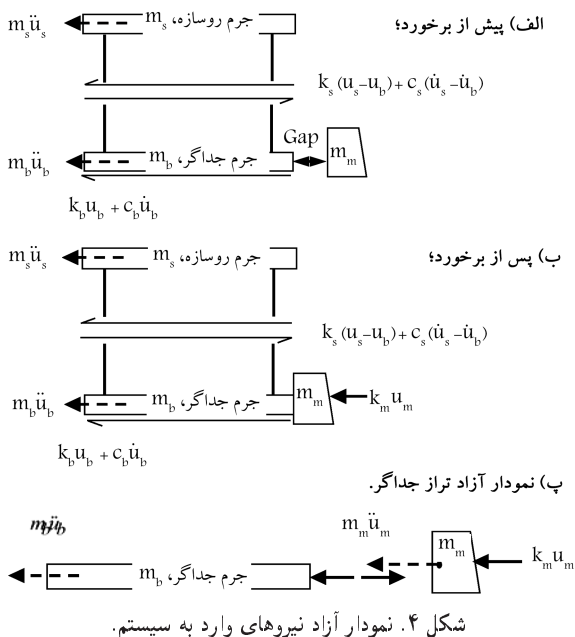
اصلاح شده است. اگرچه برای ساده‌تر شدن مسئله می‌توان دیوار بازدارنده را فقط در یک طرف سازه در نظر گرفت، ولی با توجه به امکان برخوردهای متوالی بین لایه‌ی جداگرها و دیوارهای بازدارنده‌ی موجود در هر دو طرف سازه و ایجاد رفتاری شبیه به پدیده‌ی تشدید پاسخ‌ها به ویژه برای درزهای لریزی کوچکی، [۳۲] در پژوهش حاضر دیوارهای بازدارنده در هر دو طرف سازه در نظر گرفته شده‌اند. برای

۴. مدل‌سازی سیستم جداسازی شده‌ی خطی و برخورد

سیستم دو درجه‌ی آزاد سازه‌ی جداسازی شده شکل ۳ - بدون این‌که دیوار بازدارنده داشته باشد - در انواع مطالعات مربوط به پاسخ سازه‌های اشاره شده کاربرد دارد. [۵۰] در پژوهش حاضر، مدل مذکور برای نشان دادن تأثیر برخورد به دیوار بازدارنده‌ی

جدول ۲. پارامترهای سیستم.

پارامتر سیستم	زمان تناوب طبیعی	بسامد طبیعی
جداگر لرزه‌یی	$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{m_s + m_b}{k_b}}$	$\omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{m_s + m_b}}$
دیوار بازدارنده	$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{m_m}{k_m}}$	$\omega_m = \sqrt{\frac{k_m}{m_m}}$
سازه‌های همتای پایه گیردار	$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{m_s}{k_s}}$	$\omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}}$



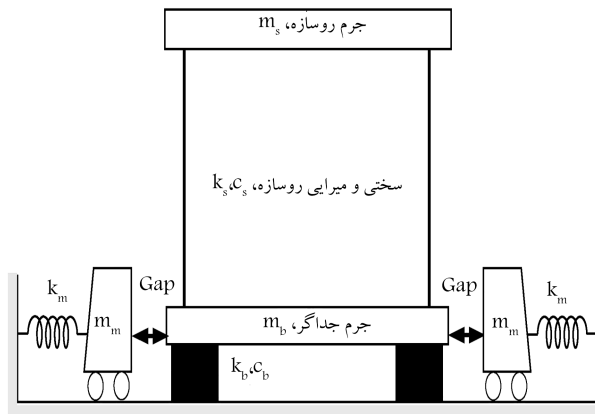
معادله‌های ۴ و ۵ به دست می‌آیند:

$$\begin{bmatrix} 1 - \gamma_s & 0 \\ 0 & \gamma_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_s \end{Bmatrix} + 2\omega_s \begin{bmatrix} \zeta_b \varepsilon \frac{1}{\tau} & 0 \\ 0 & \zeta_s \gamma_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_s \end{Bmatrix} + \omega_s^2 \begin{bmatrix} \varepsilon + \gamma_s & -\gamma_s \\ -\gamma_s & \gamma_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 - \gamma_s & 0 \\ 0 & \gamma_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} 1 - \gamma_s + \gamma_m & 0 \\ 0 & \gamma_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_s \end{Bmatrix} + 2\omega_s \begin{bmatrix} \zeta_b \varepsilon \frac{1}{\tau} + \zeta_m \gamma_m \eta \frac{1}{\tau} & 0 \\ 0 & \zeta_s \gamma_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_b \\ \dot{u}_s \end{Bmatrix} + \omega_s^2 \begin{bmatrix} \varepsilon + \gamma_s + \eta \gamma_m & -\gamma_s \\ -\gamma_s & \gamma_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_b \\ u_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 - \gamma_s + \gamma_m & 0 \\ 0 & \gamma_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (5)$$

که در آنها، u_b و u_s جابه‌جایی روسازه و تراز جداگر نسبت به جابه‌جایی زمین u_g هستند. نمودار آزاد نیروها پیش و پس از برخورد در شکل ۴ مشاهده می‌شود. رابطه‌ی نیرو - جابه‌جایی یک جداگر و مانع کشسان خطی در شکل ۵ مشاهده می‌شود، که در آن F_b نیروی جداگر، gap اندازه درز لرزه‌یی و F_m نیروی فنر دیوار بازدارنده است.

مدل‌سازی برخورد تاوه‌ی روی لایه‌ی جداگرها با دیوار بازدارنده، همان‌گونه که در بخش ۲ ارائه شده است، به صورت استریومکانیک در نظر گرفته شده است. از آنجا که مدت زمان برخورد بین لایه‌ی جداگر و دیوار بسیار کم است، پس از هر بار برخورد، اثر میرایی دیوار بازدارنده در پاسخ دینامیکی را می‌توان نادیده گرفت. در مطالعات تسای (۱۹۹۷) [۱۷] که پاسخ‌های لرزه‌یی تیر برشی جداسازی



شکل ۳. پارامترهای عمومی سازه‌های جداسازی شده‌ی دو درجه آزادی و مانع بازدارنده/دیوار.

شبه‌سازی رفتار سامانه‌های جداسازی شده از مدل روسازه‌ی صلب^{۱۸} (سیستم یک درجه آزادی) و همچنین روسازه‌ی انعطاف‌پذیر^{۱۹} (سیستم دو درجه آزادی) استفاده شده است. پارامترهای سیستم مذکور به همراه معادلات حرکت پیش و پس از برخورد و روابط نیرو - جابه‌جایی جداگر و دیوار بازدارنده در ادامه معرفی شده‌اند.

۱.۴. معادلات حرکت و پارامترهای سیستم

زمان تناوب طبیعی و بسامد زاویه‌یی طبیعی برای جداگر، دیوار بازدارنده و روسازه‌ی همتای با پایه‌ی گیردار در جدول ۲ ارائه شده است.

سایر پارامترهای استفاده شده در معادلات حرکت به این صورت تعریف می‌شوند:

$$\gamma_m = \frac{m_m}{m_b + m_s}, \gamma_s = \frac{m_s}{m_b + m_s} \quad \text{نسبت‌های جرمی روسازه و دیوار:}$$

$$\varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2}, \eta = \frac{\omega_m^2}{\omega_s^2} \quad \text{نسبت بسامد زاویه‌یی جداگر و دیوار:}$$

که در آنها، m_s وزن روسازه، m_b و m_m به ترتیب جرم تاوه‌ی لایه‌ی جداگر و دیوار بازدارنده هستند. به همین ترتیب، k_b ، k_s و k_m سختی روسازه با پایه‌ی گیردار، لایه‌ی جداگر و دیوار است. در مطالعه‌ی حاضر، $\gamma_s = 0/5$ فرض شده است، که این مقدار بیان‌کننده‌ی یک روسازه‌ی سبک است. [۲۳] همچنین مقدار γ_m ، که همان نسبت جرمی دیوار و خاک پشت آن است، برابر با $0/5$ فرض شده است. ضریب میرایی لزجی روسازه، لایه‌ی جداگر و دیوار به ترتیب c_m ، c_b و c_s است. بنابراین نسبت میرایی سیستم پایه‌ی گیردار، جداگر و دیوار از این روابط به دست می‌آیند:

$$\zeta_s = \frac{c_s}{2m_s \omega_s} \quad \text{نسبت میرایی سیستم پایه گیردار:}$$

$$\zeta_b = \frac{c_b}{2(m_s + m_b)\omega_b} \quad \text{نسبت میرایی جداگر لرزه‌یی:}$$

$$\zeta_m = \frac{c_m}{2m_m \omega_m} \quad \text{نسبت میرایی دیوار بازدارنده:}$$

بر اساس روابط اخیر، معادلات حرکت پیش و پس از برخورد به ترتیب از

تناوب این پالس، جمع جبری مساحت زیر نمودار - که نشان دهنده‌ی ضربه یا تکانه‌ی ورودی به سیستم است - برابر صفر می‌شود؛ در حالی که برای سایر موجک‌ها در پایان یک دوره‌ی کامل تناوب پالس، این اتفاق خواهد افتاد. همچنین برای سیستم‌هایی که نسبت دوره‌ی تناوب پالس به دوره‌ی تناوب سیستم کم است، پاسخ دینامیکی تقریباً متناسب با جمع جبری تکانه‌ی ورودی خواهد بود.^[۲۱،۳۰] بنابراین پاسخ دینامیکی به پالس کوپر متقارن برای نسبت‌های کوچک T_p/T_b نسبت به سایر حالت‌ها پایین‌تر است.

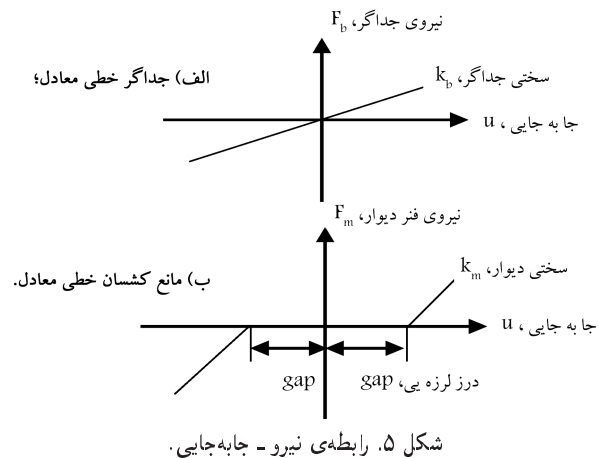
۲.۲.۴. اثر دوره‌ی تناوب دیوار بازدارنده

مقادیر منطقی مختلفی به منظور بررسی مشخصات دینامیکی تأثیر دوره‌ی تناوب طبیعی دیوار بازدارنده هنگام برخورد انتخاب شد و نتایج برای یک درز لرزه‌ی مشخص، که به جابه‌جایی طیفی همپایه شده و برابر با $0.3g$ بوده است، در شکل ۷ مشاهده می‌شود دوره‌تناوب‌های مختلف، نشان‌دهنده‌ی دوره‌ی تناوب مدل خطی معادل T^0 با رفتار ناکشسان غیرخطی دیوار بازدارنده است، که با توجه به سختی وتری^{۲۱} در یک نقطه‌ی عملکردی به دست می‌آید و میرایی معادل برای آن تعیین می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که در هر سطحی از رفتار غیرخطی، پاسخ سیستم واقعی به‌طور تقریبی از تحلیل سیستم خطی معادل آن به دست خواهد آمد، که دست‌کم در مقادیر اوج پاسخ، تطابق خوبی با سیستم غیرخطی همتای آن دارد. این روش مبنای پژوهش‌های بسیاری در مهندسی زلزله بوده است و کاربرد زیادی دارد.^[۵۲،۵۱]

با توجه به نتایج برای تمام بازه‌ی مورد بررسی T_p/T_b ، با افزایش نسبت T_m/T_b ، شتاب‌ها کاهش زیادی می‌یابند و می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر مذکور از ویژگی‌های اساسی سامانه‌ی جداسازی شده پس از برخورد است. همچنین برای یک نسبت ثابت T_m/T_b با افزایش T_p/T_b شتاب سازی جداسازی شده نسبت به سازی همتای پایه‌گیردار افزایش چشمگیری می‌یابد، که نشان‌گر اهمیت زیاد پارامتر مذکور است. بر اساس نتایج تحلیل مدل یک درجه آزادی، برای مقادیر کم درز لرزه‌ی و نسبت سختی بالای دیوار بازدارنده شتاب‌ها پس از برخورد افزایش زیادی دارد، که خود بیان‌گر ناکارایی جداسازی لرزه‌ی در این موارد است. ولی از آن‌جا که این نتایج بر اساس مدل یک درجه آزادی است، برای بررسی بیشتر و جلوگیری از تفسیر اشتباه نیاز به در نظر گرفتن درجه‌های آزادی روسازه است. این کار در ادامه، بر اساس مدل دو درجه آزادی انجام شده است.

۳.۴. تحلیل پارامتری نمایه‌ی دو درجه آزادی

در بخش حاضر، بررسی پارامتری سیستم مانند بخش پیش است، با این تفاوت که نسبت دوره‌ی تناوب روسازه‌ی اعطاف‌پذیر به دوره‌ی تناوب موجک‌ها T_s/T_p ، نیز به شمار پارامترها افزوده شده است. نسبت میرایی لایه‌ی جداساز مانند بخش پیش، 2% است. برای روسازه‌ی اعطاف‌پذیر، میرایی برابر مقدار متداول 5% فرض شده است. نظر به این‌که میرایی روسازه، عدد کوچکی است، می‌توان نتیجه گرفت که نیروی اینرسی جرم روسازه برابر با نیروی کشسان روسازه است؛ و به بیانی دیگر، شتاب مطلق با اختلاف ناچیزی برابر شتاب است. بنابراین نسبت بیشینه‌ی شتاب مطلق روسازه به بیشینه‌ی شتاب مطلق سازگی‌گیردار همتای آن $\ddot{u}_{so}/\ddot{u}_{fo}$ برابر با نسبت بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی روسازه نسبت به لایه‌ی جداساز به بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی سازگی‌گیردار همتای آن $(u_s - u_b)_0/u_{fo}$ است، که به عنوان شاخصی برای مقایسه‌ی سازی جداسازی شده و پایه‌ی گیردار انتخاب شده است. \ddot{u}_{fo} و u_{fo} به ترتیب شتاب و جابه‌جایی طیفی نظیر دوره‌ی تناوب روسازه هستند.



شده را هنگام برخورد به دیوار بازدارنده بررسی کرده بود، با افزایش قابل توجه ضریب میرایی دیوار بازدارنده، شتاب نیاز در تراز پایه و بالای تیر برشی تغییر ناچیزی داشته است. افزون بر این، همان‌طور که در مقدمه به آن اشاره شده است، در مشاهدات ناگارجیا و سان (۲۰۰۱)^[۲۱] مقدار ضریب میرایی برای میراگر در پاسخ مرکز آتش‌نشانی لس‌آنجلس تأثیر چندانی ندارد. با توجه به تأثیر ناچیز میرایی دیوار بازدارنده و در جهت اطمینان این میرایی صفر در نظر گرفته شده است.

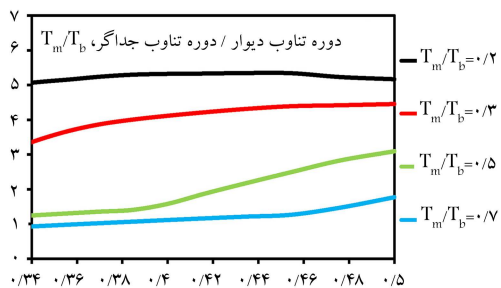
۲.۴. نمایه‌ی یک درجه‌ی آزاد سازه‌های جداسازی شده (مدل آیین‌نامه‌ی)

شبیه‌سازی سیستم‌های جداسازی شده با سیستم یک درجه آزادی (روسازه‌ی صلب) برای طراحی اولیه، شیوه‌ی متداول است. با این‌که در ساده‌سازی ذکر شده نمی‌توان برخی مشخصه‌های پاسخ چون اثر مودهای بالاتر و اندرکنش اینرسی روسازه و لایه‌ی جداگر را مشاهده کرد، در پژوهش حاضر برای ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی ساده‌ی آیین‌نامه‌ی پاسخ‌های مدل یک درجه آزادی جداسازی شده با در نظر گرفتن روسازه‌ی صلب نیز به دست آمده است. به منظور ارزیابی سیستم یک درجه آزادی جداسازی شده هنگام برخورد، برابر توضیحات بخش ۲، رویکرد استریومکانیک انتخاب شده است. شرایط جدایش در رویکرد اخیر، که ساده‌ترین مدل برخوردی بر پایه‌ی ضریب برجه‌نگدی e استوار است، در نظر گرفته شده است. تحلیل‌ها بر اساس پارامترهای تأثیرگذار از جمله اندازه‌ی درز لرزه‌ی و دوره‌ی تناوب دیوار انجام شد. نسبت میرایی برای سیستم یک درجه آزادی جداسازی شده، 2% فرض شده است.

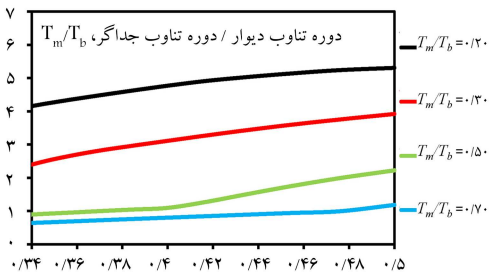
۱.۲.۴. اثر درز لرزه‌ی

نسبت بیشینه‌ی شتاب سیستم به بیشینه‌ی شتاب زمین در نمودارهای شکل ۶ برای پالس‌های جدول ۱ نشان داده شده است. درز لرزه‌ی ناکافی به صورت نسبتی از درز لرزه‌ی موجود به جابه‌جایی طیفی S_d است. بر اساس نتایج برای تمام بازه‌ی T_p/T_b با افزایش درز لرزه‌ی شتاب‌ها کاهش یافته و فقط در موجک سینوسی برای $T_p/T_b > 0.45$ با افزایش T_p/T_b و مقدار درز لرزه‌ی شتاب‌ها از مقادیر مربوط به کمترین درز لرزه‌ی بیشتر شده است. برای مقادیر کم T_p/T_b ، در موجک کوپر متقارن، افزایش درز لرزه‌ی تأثیر چندانی در کاهش شتاب‌ها ندارد.

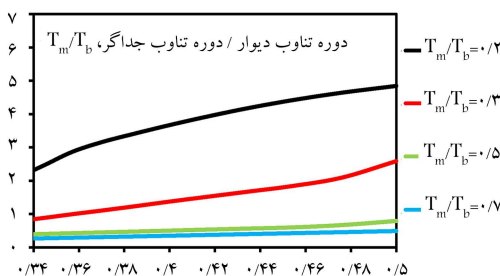
شایان توجه است که برای موجک کوپر متقارن، هنگام رسیدن به نیمه‌ی دوره‌ی



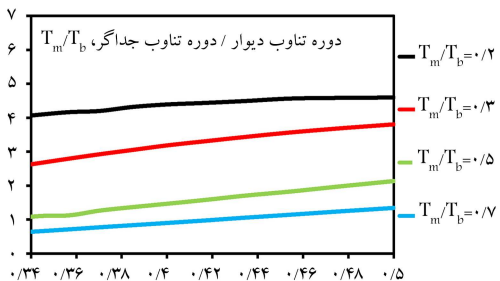
الف) سینوسی؟



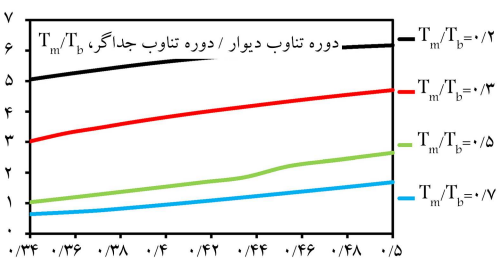
ب) کوپر پاد متقارن؟



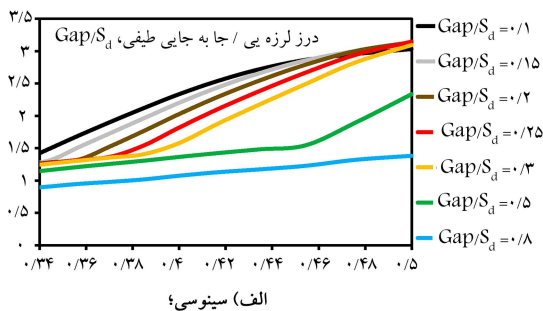
پ) کوپر متقارن؟



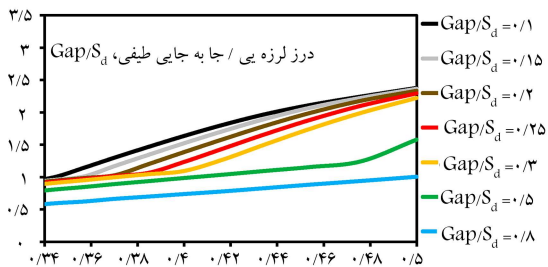
ت) ریکر متقارن؟



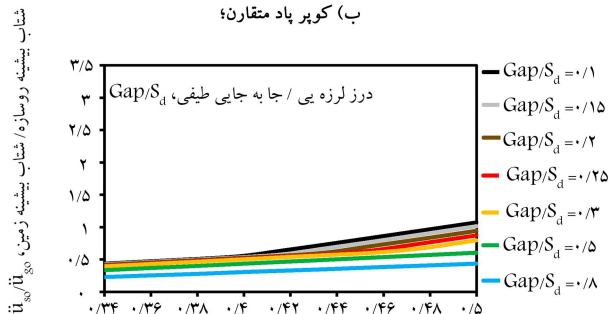
ث) ریکر پاد متقارن.



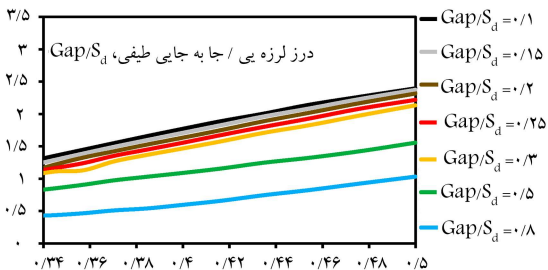
الف) سینوسی؟



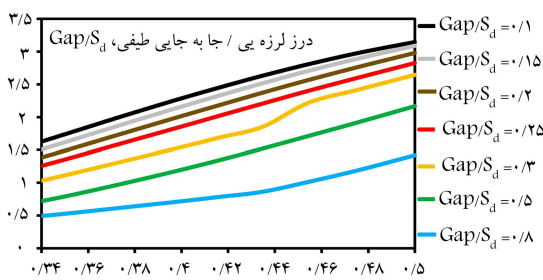
ب) کوپر پاد متقارن؟



پ) کوپر متقارن؟



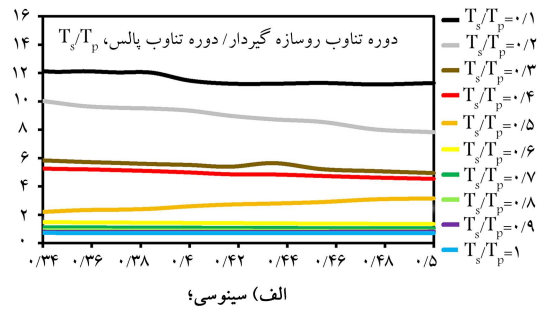
ت) ریکر متقارن؟



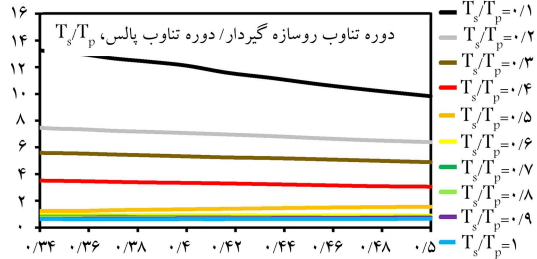
ث) ریکر پاد متقارن.

شکل ۷. پاسخ شتاب طیفی سازه‌های جداسازی شده‌ی خطی یک درجه‌ی آزادی برای $T_p/T_b = 0.5$ ، $\zeta_b = 0.2$ ، $gap/S_d = 0.3$ ، و موجک‌های متفاوت، $T_m/T_b = 0.2$ ، 0.3 ، 0.5 ، 0.7 .

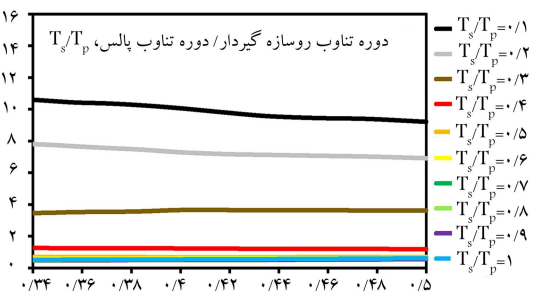
شکل ۶. پاسخ شتاب طیفی سازه‌های جداسازی شده‌ی خطی یک درجه‌ی آزادی برای $gap/S_d = 0.1$ ، 0.15 ، 0.2 ، 0.25 ، 0.3 ، 0.5 ، 0.8 ، و موجک‌های متفاوت، $T_m/T_b = 0.2$ ، 0.3 ، 0.5 ، 0.7 .



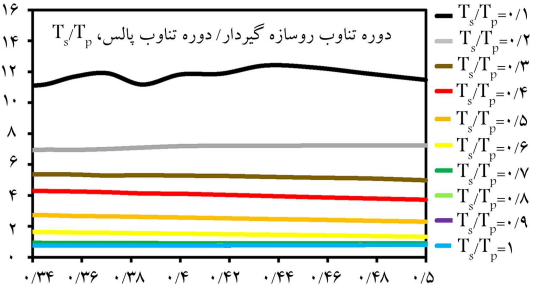
الف) سینوسی؛



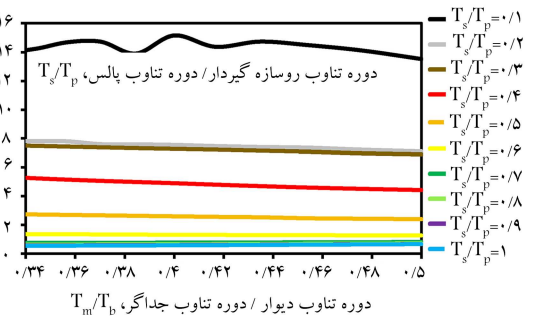
ب) کوپر پاد متقارن؛



پ) کوپر متقارن؛



ت) ریکر متقارن؛



ث) ریکر پاد متقارن.

شکل ۸. پاسخ شتاب روسازه در سازه‌های جداسازی شده خطی دو درجه‌ای آزادی برای T_s/T_p و موجک‌های متفاوت، $Gap/S_d = 0.3$ ، $T_m/T_s = 1$ ، $\zeta_b = 0.2$ ، $\zeta_s = 0.5$ ، $\gamma_m = 0.5$ ، $\gamma_s = 0.5$

۱.۳.۴. اثر دوره‌ی تناوب روسازه با پایه‌ی گیردار نسبت به دوره‌ی تناوب پالس

اثر متغیر حاضر برای هر سه پالس معرفی شده در بخش‌های پیشین در شکل ۸ مشاهده می‌شود، که مطابق آن برای نسبت‌های بزرگ‌تر، T_s/T_p شتاب‌ها کاهش چشمگیری داشته است. در بخش کنونی، برای تمام پالس‌ها شتاب‌های حاصل به شتاب سیستم همتای پایه گیردار همپایه شده‌اند. بر اساس نمودارهای رسم شده برای مقادیر کم، T_s/T_p شتاب روسازه پس از برخورد نسبت به شتاب‌های سازه‌ی همتای پایه گیردار افزایش زیادی داشته است، که فلسفه‌ی پذیرش برخورد در این موارد را به چالش می‌کشد، ولی با افزایش مقدار T_s/T_p به ویژه در مقادیر بیشتر از 0.5 ، شتاب روسازه چنان کاهش یافته است، که در برخی موارد نسبت شتاب پیشینه‌ی روسازه‌ی ذکر شده به شتاب طیفی سیستم همتای پایه گیردار آن، کمتر از واحد می‌شود. به عبارت دیگر، سیستم جداسازی شده‌ی لرزه‌ی با برخورد به دیوار بازدارنده در زلزله‌های بسیار بزرگ، عملکرد بهتری از سازه‌ی همتای پایه گیردار خود دارد.

۲.۳.۴. اثر دوره‌ی تناوب دیوار

پژوهشگران مقادیر مختلف T_m/T_s را برای بررسی اثر پارامتر در رفتار لرزه‌ی سازه‌های جداسازی شده بررسی و پیشنهاد کرده‌اند. برای نمونه‌ی تسای (۱۹۹۷)، [۵۱] عدد 0.29 و کمودوموس و همکاران (۲۰۰۷)، [۲۳] بازه‌ی 0.3 تا 1.3 را پیشنهاد داده‌اند. کو و همکاران (۲۰۱۳)، [۲۰] نیز مقدار ۱ را برای پارامتر ذکر شده به کار برده‌اند. در پژوهش حاضر، سه مقدار 0.6 ، 1 و 1.3 برای بررسی تأثیر دوره‌ی تناوب رفتار خطی معادل دیوار استفاده شد. اثر پارامتر مذکور برای همه‌ی موجک‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. در تمام حالت‌ها مقدار $T_s/T_p = 0.7$ و $Gap/S_d = 0.3$ فرض شده است. با افزایش مقدار T_m/T_s ، شتاب‌ها کاهش یافته و برای یک مقدار T_m/T_s ثابت، با افزایش T_p/T_b به جز برای پالس کوپر متقارن، شتاب‌ها کاهش یافته‌اند. مانند سیستم‌های یک درجه آزادی، سختی دیوار در تحلیل‌های صورت گرفته، تأثیر به سزایی در شتاب سیستم دارد. بر اساس نتایج برای طراحی اولیه با پذیرش برخورد، باید سختی دیوار طوری در نظر گرفته شود که پیشینه‌ی شتاب روسازه پس از برخورد از مقدار موردنظر فراتر نرود.

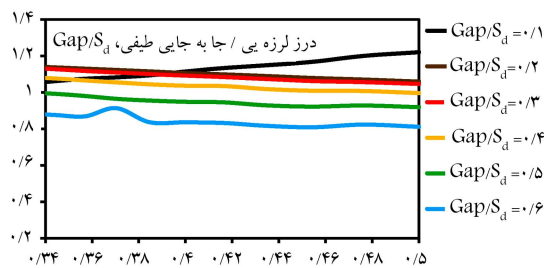
۳.۳.۴. اثر درز لرزه‌یی

تأثیر درز لرزه‌یی در شتاب نیاز روسازه برای $T_s/T_p = 0.7$ و $Gap/S_d = 0.3$ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

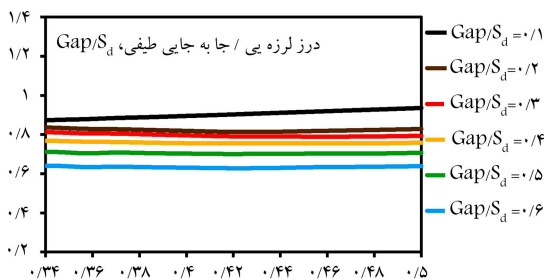
بر اساس نتایج با افزایش درز لرزه‌یی شتاب نیاز روسازه کاهش می‌یابد. برای تمام پالس‌های معرفی شده، مقدار شتاب نیاز در روسازه نسبت به شتاب نیاز در سیستم با پایه‌ی گیردار کمتر از 1.2 معادل با اندازه‌ی درز لرزه‌یی 0.1 است و با افزایش درز لرزه‌یی برای تمام مقادیر T_p/T_b ، شتاب نیاز کاهش می‌یابد. بنابراین با انتخاب یک Gap/S_d بزرگ‌تر اما کوچک‌تر از واحد، روسازه پس از برخورد شتابی کمتر از شتاب سیستم همتای پایه گیردار خود را تجربه می‌کند.

۵. نتیجه‌گیری

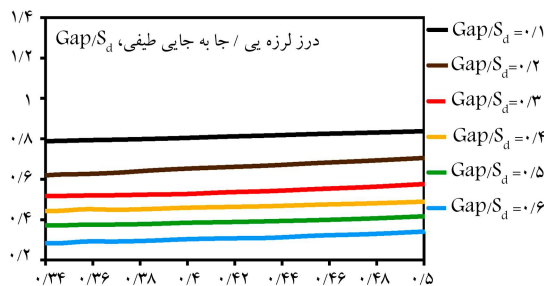
در پژوهش حاضر، پاسخ دینامیکی سازه‌های جداسازی شده با رفتار خطی معادل و با درز لرزه‌یی ناکافی، هنگام برخورد به دیوارهای بازدارنده‌ی اطراف خود بررسی شد. تحلیل‌های دینامیکی با به کار بردن موجک‌های پالسی برای شبیه‌سازی جنبش‌های لرزه‌یی حوزی نزدیک گسل انجام شد. همچنین درز لرزه‌یی ناکافی به صورت نسبتی از فاصله‌ی آزاد لابه‌ی لایه‌ی جداساز تا دیوار بازدارنده به جا به جایی طیفی مدل یک



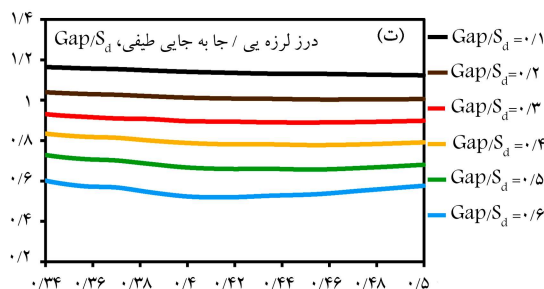
الف) سینوسی؛



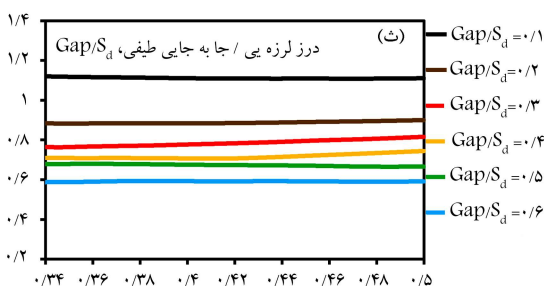
ب) کوپر پاد متقارن؛



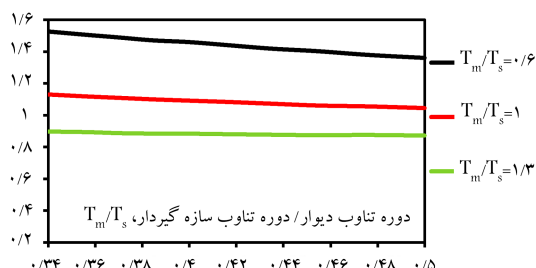
پ) کوپر متقارن؛



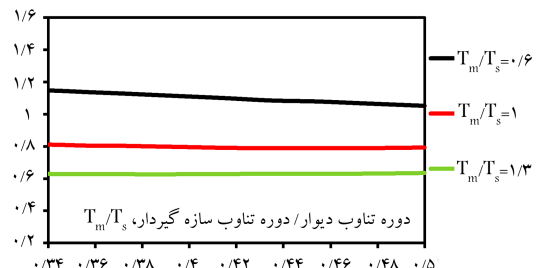
ت) ریکر متقارن؛



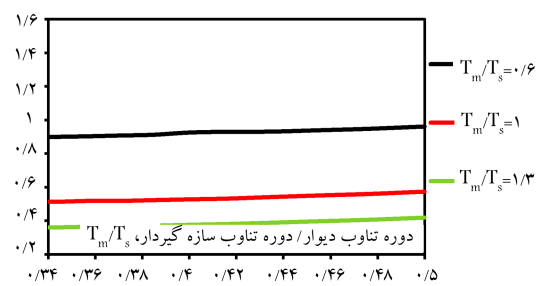
ث) ریکر پاد متقارن.



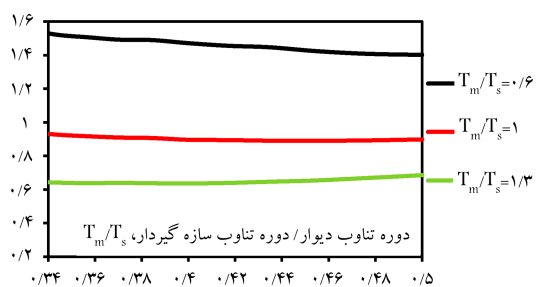
الف) سینوسی؛



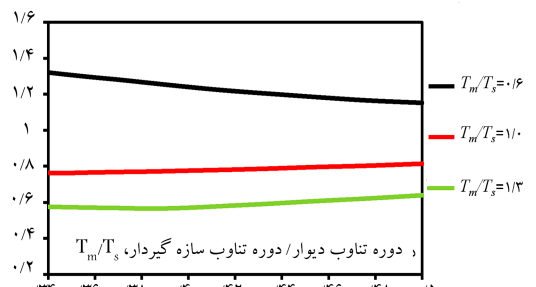
ب) کوپر پاد متقارن؛



پ) کوپر متقارن؛



ت) ریکر متقارن؛



ث) ریکر پاد متقارن.

شتاب پیشینه روسازه / شتاب طبیفی سازه گیردار همستا، $\ddot{u}_{s0}/\ddot{u}_{i0}$

شتاب پیشینه روسازه / شتاب طبیفی سازه گیردار همستا، $\ddot{u}_{s0}/\ddot{u}_{i0}$

شکل ۱۰. پاسخ شتاب روسازه در سازه‌های جداسازی شده‌ی خطی دو درجه آزادی برای $Gap/S_d = 0.3$ و موجک‌های متفاوت، $T_m/T_s = 1$ ، $\zeta_b = 0.2$ ، $\zeta_s = 0.5$ ، $T_s/T_p = 0.7$ ، $\gamma_m = 0.5$ ، $\gamma_s = 0.5$.

شکل ۹. پاسخ شتاب روسازه در سازه‌های جداسازی شده‌ی خطی دو درجه آزادی برای $Gap/S_d = 0.3$ و موجک‌های متفاوت، $T_m/T_s = 1$ ، $\zeta_b = 0.2$ ، $\zeta_s = 0.5$ ، $T_s/T_p = 0.7$ ، $\gamma_m = 0.5$ ، $\gamma_s = 0.5$.

است که با انتخاب مناسب ویژگی‌های دینامیکی و درز لرزه‌ی سازی شده می‌توان با درز لرزه‌ی کوچکی حتی پس از برخورد به دیوار بازدارنده، به عملکردی میان ایمنی جانی و آستانه‌ی فروریزش در سطوح خطر بالا دست یافت و بدیهی است که عملکرد قابلیت بهره‌برداری در سازی جداسازی شده تا پیش از برخورد حفظ می‌شود. بنابراین با استفاده از جداگرهایی با ظرفیت جابه‌جایی کمتر و در پی آن کم‌هزینه‌تر، طرح لرزه‌ی مبتنی بر عملکرد اقتصادی‌تری که برای سطوح خطر لرزه‌ی بالا تا پیش از برخورد تقریباً بدون خسارت باقی بماند و برای زلزله‌های بزرگ‌تر تدریجاً به سطوح عملکردی پایین‌تر سوق کند، قابل دست‌یابی است.

پژوهش حاضر، به عنوان سرآغازی بر دیدگاه پذیرش برخورد در فلسفه‌ی طراحی سازی‌های جداسازی شده‌ی لرزه‌ی انجام گرفته است و با توجه به گستردگی پارامترهای تأثیرگذار هندسی و مکانیکی، نامنظمی جرم، سختی و مقاومت، آثار پیچش، انواع مدل‌سازی برخورد، اثرنگاشت‌های زلزله‌های واقعی و روش‌های احتمالاتی در مهندسی زلزله، نیاز به بررسی بیشتر و مطالعات تکمیلی تا مرحله‌ی پذیرش و کار برد احتمالی دارد.

درجه آزادی سازی جداسازی شده که کمتر از ۱ است ($Gap/S_d < 1$)، در نظر گرفته شد. هر دیوار بازدارنده با یک مجموعه‌ی جرم - فنر - میراگر برای مدل‌سازی برخورد با روش استریومکانیک جایگزین شد.

براساس نتایج به دست آمده از تحلیل نمایه‌ی یک درجه آزاد سامانه‌های جداسازی شده‌ی لرزه‌ی - که عموماً برای طراحی اولیه در آیین‌نامه‌ها تجویز می‌شود - مشخص شد که این مدل در شرایط برخورد و در مقایسه با مدل واقعی‌تر دو درجه آزادی به نتایج قابل اطمینانی منجر نمی‌شود. بنابراین برای تحلیل سازی‌های جداسازی شده در شرایط برخورد باید حتماً درجه‌های آزادی روسازه در نظر گرفته شود.

بررسی و تفسیر نتایج مدل دو درجه آزادی نشان می‌دهد که برای بازه‌ی منطقی از T_p/T_b بیشینه‌ی شتاب نیاز روسازه‌ی انعطاف‌پذیر پس از برخورد نسبت به بیشینه‌ی شتاب نیاز در سازی همتای پایه‌گیردار افزایش چشمگیری به ویژه برای $T_s/T_p > 0.7$ ندارد و حتی در این بازه، کاهش شتاب نیاز در روسازه‌ی انعطاف‌پذیر نسبت به سازی همتای پایه‌ی گیردار خود محسوس است. این یافته‌ها به این معنی

پانویس‌ها

1. moat / stop walls
2. near-field pulse-like ground motions
3. ground motion directionality
4. fling effect
5. mass eccentricity
6. double friction pendulum bearing
7. restraining rims
8. maximum considered earthquake (MCE)
9. immediate Occupancy (IO)
10. collapse prevention (CP)
11. response modification factor (R)
12. random
13. stereomechanics
14. continuous force
15. nonlinear viscoelastic model
16. elastic-perfectly-plastic oscillator
17. dimensional analysis
18. rigid superstructure
19. flexible superstructure
20. equivalent period
21. secant stiffness

منابع (References)

1. Kelly, J.M. "Aseismic base isolation: review and bibliography", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **5**(4), pp. 202-216 (1986).
2. Buckle, I.G. and Mayes, R.L. "Seismic isolation: history, application, and performance- a world view", *Earthq. Spectra*, **6**(2), pp. 161-201 (1990).
3. Skinner, R.I., Robinson, W.H. and McVerry, G.H. "An Introduction to Seismic Isolation", *England, John Wiley & Sons* (1993).
4. Naeim, F. and Kelly, J.M. "Design of seismic isolated structures: from theory to practice", *New York, John Wiley* (1999).
5. Clemente, P. and Martelli, A. "Seismically isolated buildings in Italy: State-of-the-art review and applications", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **119**, pp. 471-487 (2018).
6. Pan, P., Zamfirescu, D., Nakashima, M. et al. "Base-isolation design practice in Japan: Introduction to the post-Kobe approach", *J. Earthq. Eng.*, **9**(1), pp. 147-171 (2008).
7. Bessason, B., Haflioaason, E. and Guomundsson, G.V. "Performance of base isolated bridges in recent south Iceland earthquakes", *In Proceedings of the International Conference on Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, *Cham*, **47**, pp. 122-135 (2019).
8. Kasai, K., Mita, A., Kitamura, H. et al. "Performance of seismic protection technologies during the 2011 Tohoku-Oki earthquake", *Earthq. Spectra*, **29**(S1), pp. S265-S293 (2013).
9. Moroni, M.O., Sarrazin, M. and Soto, P. "Behavior of instrumented base-isolated structures during the 27 February 2010 Chile earthquake", *Earthq. Spectra*, **28**(S1), pp. S407-s424 (2012).
10. Celebi, M. "Successful performance of a base-isolated hospital building during the 17 January 1994 Northridge earthquake", *Struct. Des. Tall Build.*, **5**(2), pp. 95-109 (1996).
11. Nagarajaiah, S. and Sun, X. "Response of base-isolated USC hospital building in northridge earthquake", *J. Struct. Eng.*, **126**(10), pp. 1177-1186 (2000).
12. Nagarajaiah, S. and Sun, X. "Base-isolated FCC building: impact response in Northridge earthquake", *J. Struct. Eng.*, **127**(9), pp. 1063-1075 (2001).
13. Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W. et al. "Near-source ground motion and its effects on flexible buildings", *Earthq. Spectra*, **11**(4), pp. 569-605 (Nov., 1995).

14. Jangid, R.S. and Kelly, J.M. "Base isolation for near-fault motions", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **30**(5), pp. 691-707 (2001).
15. Tajammolian, H., Khoshnoudian, F., Talaei, S. and et al. "The effects of peak ground velocity of near-field ground motions on the seismic responses of base-isolated structures mounted on friction bearings", *Earthq. Struct.*, **7**(6), pp. 1259-1281 (2014).
16. Alhan, C. and Öncü-Davas, S. "Performance limits of seismically isolated buildings under near-field earthquakes", *Eng. Struct.*, **116**, pp. 83-94 (2016).
17. Tsai, H.-C. "Dynamic analysis of base-isolated shear beams bumping against stops", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **26**(5), pp. 515-528 (1997).
18. Malhotra, P.K. "Dynamics of seismic impacts in base-isolated buildings", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **26**(8), pp. 797-813 (1997).
19. Masroor, A. and Mosqueda, G. "Impact model for simulation of base isolated buildings impacting flexible moat walls", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **42**(3), pp. 357-376 (2013).
20. Qu, Z., Kishiki, S. and Nakazawa, T. "Influence of isolation gap size on the collapse performance of seismically base-isolated buildings", *Earthq. Spectra*, **29**(4), pp. 1477-1494 (2013).
21. Ye, K., Li, L. and Zhu, H. "A modified kelvin impact model for pounding simulation of base-isolated building with adjacent structures", *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, **8**(3), pp. 433-446 (2009).
22. Mavronicola, E.A., Polycarpou, P.C. and Komodromos, P. "Spatial seismic modeling of base-isolated buildings pounding against moat walls: effects of ground motion directionality and mass eccentricity", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **46**(7), pp. 1161-1179 (2017).
23. Komodromos, P., Polycarpou, P.C., Papaloizou, L. and et al. "Response of seismically isolated buildings considering poundings", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **36**(12), pp. 1605-1622 (2007).
24. Dimova, S.L. "Numerical problems in modelling of collision in sliding systems subjected to seismic excitations", *Adv. Eng. Softw.*, **31**(7), pp. 467-471 (2000).
25. Matsagar, V.A. and Jangid, R.S. "Seismic response of base-isolated structures during impact with adjacent structures", *Eng. Struct.*, **25**(10), pp. 1311-1323 (2003).
26. Agarwal, V.K., Niedzwecki, J.M. and Van de Lindt, J.W. "Earthquake induced pounding in friction varying base isolated buildings", *Eng. Struct.*, **29**(11), pp. 2825-2832 (2007).
27. Pant, D.R. and Wijeyewickrema, A.C. "Structural performance of a base-isolated reinforced concrete building subjected to seismic pounding", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **41**(12), pp. 1709-1716 (2012).
28. Bao, Y. and Becker, T.C. "Inelastic response of base-isolated structures subjected to impact", *Eng. Struct.*, **171**, pp. 86-93 (2018).
29. Bao, Y. and Becker, T.C. "Effect of design methodology on collapse of friction pendulum isolated moment-resisting and concentrically braced frames", *J. Struct. Eng.*, **144**(11), (2018).
30. Bao, Y., Becker, T.C., Becker, S.T. and et al. "To limit forces or displacements: Collapse study of steel frames isolated by sliding bearings with and without restraining rims", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **112**, pp.203-214 (2018).
31. Khoshnoudian, F. and Hemmati A.T. "Impact of structures with double concave friction pendulum bearings on adjacent structures", *Pro Inst. Civ. Eng. - Struct. Build.*, **167**(1), pp. 41-53 (2014).
32. Bao, Y., Becker, T.C. and Hamaguchi, H. "Failure of double friction pendulum bearings under pulse-type motions", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **46**(5), pp. 715-732 (2017).
33. Muthukumar, S. and DesRoches, R. "A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **35**(7), pp. 811-828 (2006).
34. CEN Technical Committee 250, "Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance – part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings", *European Committee for Standardization, Brussels* (2004).
35. American Society of Civil Engineers, *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16)*, 7th ed. Reston, VA: American Society of Civil Engineers (2017).
36. DesRoches, R. and Muthukumar, S. "Effect of pounding and restrainers on seismic response of multiple-frame bridges", *J. Struct. Eng.*, **128**(7), pp. 860-869 (2002).
37. Anagnostopoulos, S.A. and Spiliopoulos, K.V. "An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **21**(4), pp. 289-302 (1992).
38. Papadrakakis, M., Mouzakis, H., Plevris, N. and et al. "A lagrange multiplier solution method for pounding of buildings during earthquakes", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **20**(11) pp. 981-998 (1991).
39. Jankowski, R., Wilde, K. and Fujino, Y. "Pounding of superstructure segments in isolated elevated bridge during earthquakes", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **27**(5), pp. 487-502 (1998).
40. Makris, N. "Rigidity-plasticity-viscosity: can electrorheological dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **26**(5), pp. 571-592 (1997).
41. Makris, N. and Chang, S.-P. "Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **29**(1) pp. 85-107 (1998).
42. Vassiliou, M.F., Tsiavos, A. and Stojadinović, B. "Dynamics of inelastic base-isolated structures subjected to analytical pulse ground motions", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **42**(14) pp. 2043-2060 (2013).
43. Gazetas, G., Garini, E., Anastasopoulos, I. and et al. "Effects of near-fault ground shaking on sliding systems", *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, **135**(12), pp. 1906-1921 (2009).
44. Bao, Y., Becker, T.C. and Hamaguchi, H. "Failure of double friction pendulum bearings under pulse-type motions", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **46**(5), pp. 715-732 (2017).

45. Garini, E., Makris, N. and Gazetas, G. "Elastic and inelastic systems under near-fault seismic shaking: acceleration records versus optimally-fitted wavelets", *Bull. Earthq. Eng.*, **13**(2), pp. 459-482 (2015).
46. Mavroedis, G.P. and Papageorgiou, A.G. "A mathematical representation of near-fault ground motions," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **93**(3), pp. 1099-1131 (2003).
47. Clough R.W. and Penzien J., *Dynamics of structures*, McGraw-Hill, New York (1975).
48. Chopra, A.K. "Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering", *Global Ed, 4th. Ed.*, Harlow: Pearson Prentice Hall, (2014).
49. Kelly, J.M. "Base isolation: linear theory and design", *Earthq. Spectra*, **6**(2), pp. 223-244 (1990).
50. Priestley, M.J.N., Calvi, G.M. and Kowalsky, M.J. "Displacement-based seismic design of structures", *Pavia, Italy: IUSS Press* (2007).
51. Applied Technology Council, "Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures", *FEMA 440, NEHRP: National Earthquake Hazards Reduction Program, D.C.*, Washington (2005).