



## پاسخ لرزه ای ساختمان های بتن آرمه با سیستم دوگانه و پایه جداسازی شده در ساختگاه نزدیک به گسل

محمد رضا سیفی اسگ شهر\*، سعید رفیعی

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۴  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۲۳  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

### کلمات کلیدی:

ساختمان بتن آرمه دوگانه  
زلزله حوزه نزدیک  
جداساز لاستیکی-سربی  
ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰  
آیین نامه ۷-۱۶ ASCE/SEI

**خلاصه:** در ساختمان های بتن آرمه بلند مرتبه استفاده از سیستم های جداساز می تواند منجر به افزایش پاسخ سازه شود که برای کنترل این مسئله افزایش سختی ساختمان با استفاده از سیستم های باربر جانبی مانند دیوار برشی پیشنهاد می شود. در مطالعه حاضر، به مقایسه پاسخ لرزه ای ساختمان های بتن آرمه دوگانه با پای ثابت و جداسازی شده با جداساز لاستیکی-سربی تحت رکوردهای حوزه نزدیک با استفاده از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مطابق با ضوابط ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ و آیین نامه ASCE/SEI 7-16 پرداخته شده است. به این منظور ساختمان های بتن آرمه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه که دارای سیستم دوگانه قاب خمشی ویژه همراه با دیوار برشی ویژه بوده و نیز در پلان مشابه و منظم هستند، به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده اند. سازه ۲۰ طبقه به عنوان سازه بلند در این مطالعه در نظر گرفته شده است. نتایج نشان دهنده آن است که پاسخ ساختمان های جداسازی شده شامل میانگین، میانه و صدک های ۱۶٪ و ۸۴٪ در برفت و شتاب طبقات و همچنین میانگین و بیشینه برش پایه کاهش قابل ملاحظه ای نسبت به ساختمان با پای ثابت بر اساس آیین نامه داشته است. نتایج دلالت بر آن دارند که در سازه های جداسازی شده نسبت به سازه های با پای ثابت، بر اساس آیین نامه ASCE نسبت به استاندارد ۲۸۰۰، در برفت حداکثر در سازه ها ۲۳٪ کاهش بیشتر و شتاب و برش پایه میانگین ۱۱٪ کاهش بیشتری نشان داده است. نتایج به دست آمده در این تحقیق می تواند مبنای توسعه ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ برای بررسی پاسخ لرزه ای ساختمان های بتن آرمه جداسازی شده واقع شده در ساختگاه نزدیک به گسل باشد.

### ۱- مقدمه

مسئله اصلی که در طراحی سازه برای تأمین مقاومت لرزه ای آن وجود دارد به حداقل رساندن خسارت های وارد شده به سازه و همچنین اجزاء غیرسازه ای آن است. این مسئله می تواند به ترتیب با کاهش تغییر مکان بین طبقه ای و شتاب طبقات کنترل شود. تغییر مکان بین طبقه ای را می توان با افزایش سختی سازه کاهش داد که در نتیجه آن شتاب طبقات بالا می رود. شتاب طبقات را نیز می توان با کاهش دادن سختی سازه و نرم کردن سیستم سازه ای پایین آورد که در نتیجه آن تغییر مکان بین طبقه ای زیاد می شود. بنابراین باید از ساز و کاری استفاده کرد که این دو عامل را به طور همزمان کاهش دهد. سیستم جداساز لرزه ای می تواند تکنیک مؤثری برای این هدف باشد. این جداسازها بین ستون های پایه ساختمان و پی و یا در بالای ستون های پایه قرار گرفته و با افزایش پریود اصلی ساختمان، نیروهای زلزله ای وارد به سازه را کاهش می دهند. با انتقال محتوای فرکانسی

انرژی ورودی، دستگاه های جداساز منجر به استهلاک شدت زمین لرزه شده و خسارات وارده به اعضای روسازه را کاهش می دهند [۳-۱]. در بین دستگاه های جداساز الاستومریک، جداسازهای لاستیکی-سربی (LRB<sup>۱</sup>) از پرکاربردترین آن ها محسوب می شوند [۴]. این جداسازها از چندین لایه صفحه فولادی کنترل کننده سختی قائم ساخته شده اند که با لاستیک های طبیعی و هسته سربی احاطه می شوند که آن ها نیز تعیین کننده سختی اولیه و محتوای میرایی جداساز هستند. چندین راهنما برای طراحی سازه های جداسازی شده با جداساز LRB ارائه شده است. اردیک و ینیدوگان<sup>۲</sup> [۵] مروری بر فرآیندهای طراحی موجود با ملاحظه منابع عدم قطعیت انجام داده اند. بر اساس این تحقیق، منابع مختلف عدم قطعیت مانند مدل سازی، طراحی و عدم قطعیت رکورد به رکورد بایستی در تحلیل سازه جداسازی شده لحاظ شوند. سیفال<sup>۳</sup> و همکاران [۶] با بررسی جداساز

- 1 Lead Rubber Bearing
- 2 Erdik and Yenidogan
- 3 Saifal

\*نویسنده عهده دار مکاتبات: m.seifi@azaruniv.ac.ir



سختی جداساز و پرپود پالس زلزله‌های نزدیک گسل را بر روی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های جداسازی شده تحت زلزله‌های حوزه نزدیک مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات اشاره شده دلالت بر آن دارند که جداساز لرزه‌ای LRB منجر به بهبود قابل توجه عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها بخصوص برای ساختمان‌های کوتاه مرتبه با دوره تناوب پایین می‌شود. بندری<sup>۷</sup> و همکاران [۱۴] با مطالعه ساختمان بتن‌آرمه ۱۰ طبقه نشان دادند که برای سطوح بزرگ‌تری از شتاب بیشینه زمین، سازه‌های با پایه جداسازی شده می‌توانند متحمل تغییر شکل‌های غیرالاستیک شوند، با این حال اثر غیرالاستیک به صورت قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با سازه با پای ثابت برای زلزله‌های حوزه دور و زلزله‌های حوزه نزدیک با اثر جهت‌پذیری کاهش پیدا می‌کند.

در مورد استفاده همزمان جداساز لرزه‌ای و میراگر در ساختگاه نزدیک به گسل نیز تحقیقاتی انجام شده است [۱۵]. در این مورد بایستی دقت کرد که استفاده از میراگرها برای تولید میرایی بیشتر، پاسخ سازه‌ای تحت زلزله‌های متوسط و شدید ناشی از ساختگاه‌های دور از گسل را دچار مشکل می‌کند. اگر سطح زیادی از میرایی در جابجایی بزرگ رخ داده در نواحی نزدیک به گسل مورد نیاز باشد، سطح میرایی در جابجایی‌های کوچک‌تر بسیار بالاتر خواهد بود. بنابراین سیستم جداساز کارایی خود را در یک ساختمان تحت زلزله متوسط از دست خواهد داد. از قضا میراگرهای جداساز خودشان اگر چه جابجایی را کنترل می‌کنند، ساختمان‌ها را برای حرکات زمین دور از گسل شدید بسیار صلب نموده و انرژی را وارد موده‌های بالاتر می‌کنند که ممکن است انگیزه اصلی استفاده از جداساز که کاهش دررفت روسازه است را دچار مشکل بنماید. به صورت خاص‌تر، تأمین میرایی ویسکوز بیشتر برای جداسازهای LRB دررفت‌های روسازه را در ساختمان‌های در معرض زلزله‌های دور از گسل افزایش می‌دهد. قابل ذکر است که اینجا این مقادیر بزرگ از دررفت در سطوح بالاتر از میرایی، بزرگ‌تر از مواردی هستند که در زلزله‌های حوزه نزدیک رخ می‌دهند [۱۵]. در تحقیقی دیگر نشان داده شده است که اگر میرایی زیادی در سازه ایجاد شود، با اینکه جابجایی‌ها در بالای جداسازها می‌تواند به صورت اساسی کاهش داده شود اما مشارکت موده‌های ارتعاش بالاتر در روسازه افزایش می‌یابد و اگر این مشارکت بالا باشد می‌تواند به افزایش قابل توجه دررفت‌های بین طبقه‌ای و شتاب‌های کف منجر شود [۱۶].

بسیاری از تحقیقات برای بررسی اثر استفاده از جداساز لرزه‌ای به مدل‌سازی سازه‌های یک درجه آزادی [۹]، سازه با دو درجه آزادی [۱۷]،

لرزه‌ای برای ساختمان‌های با اهمیت کم تا متوسط نشان دادند که جداساز می‌تواند نیروی لرزه‌ای را همراه با مقداری صرفه‌جویی در هزینه سازه‌ای ساختمان کاهش دهد. ردی<sup>۱</sup> و همکاران [۷] اثر جداساز لرزه‌ای با LRB را در ساختمان‌های چند طبقه بتن مسلح بررسی نمودند. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که سازه جداسازی شده پرپود بلندتری نسبت به سازه با تکیه‌گاه ثابت دارد. برش پایه نیز به صورت قابل توجهی در صورت استفاده از جداساز نسبت به سازه با تکیه‌گاه ثابت کاهش نشان داده است. کانسلارا و دی آنجلیس<sup>۲</sup> [۸] دو سیستم جداسازی پایه را برای ارزیابی ساختمان‌های بتن مسلح چند طبقه نامنظم در پلان مورد تحلیل قرار دادند. نتایج تحقیق دلالت بر آن داشت که جداسازهای LRB در مقایسه با جداسازهای لاستیکی با میرایی بالا ( $HDRB^3$ )، ظرفیت اتلاف انرژی حدوداً ۱۵ الی ۳۰ درصد بیشتری نشان می‌دهند.

زلزله‌های حوزه نزدیک با پالس‌های سرعت با پرپود بلند یک نگرانی اصلی در تحلیل سازه‌های جداسازی شده هستند، چون این نوع از حرکات زمین منجر به پاسخ بزرگ در هر دو سیستم روسازه و جداساز می‌شوند. این حرکات زمین دارای پتانسیل ایجاد تغییر شکل‌های غیرخطی به ویژه برای لرزه‌های بزرگ‌تر از سطح طراحی در روسازه هستند [۹]. مشخصه‌ای از زلزله‌های حوزه نزدیک که قویاً سیستم‌های جداساز لرزه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد، وجود پالس‌هایی با زمان تداوم بلند است. حرکات زمین ممکن است یک یا چند پالس جابجایی با سرعت بیشینه ۰/۵ متر بر ثانیه و مدت زمان تداوم ۱ تا ۳ ثانیه داشته باشند. این پالس‌ها تأثیر زیادی بر روی سیستم جداساز با زمان تناوب در این محدوده دارند و می‌توانند منجر به جابجایی بزرگی در جداساز شوند [۹]. هال<sup>۴</sup> و همکاران [۱۰] نشان داده‌اند که ساختمان‌های جداسازی شده تحت زلزله‌های حوزه نزدیک آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به زلزله‌های حوزه دور دارند. از این رو مشخصات بهینه جداساز LRB برای سازه‌ها تحت زلزله حوزه نزدیک پیشنهاد داده شده است [۱۱]. پانت و ویجیویکرماس<sup>۵</sup> [۱۲] عملکرد لرزه‌ای یک ساختمان جداسازی شده چهار طبقه را تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک مقایسه کرده و نشان دادند که حرکات حوزه نزدیک به گسل منجر به تقاضاهای بزرگ‌تر در سیستم جداساز و همچنین روسازه می‌شوند. حاصلی و پورشا<sup>۶</sup> [۱۳] اثرات

- 1 Reddy
- 2 Cancellara and De Angelis
- 3 High Damping Rubber Bearing
- 4 Hall
- 5 Pant and Wijeyewickrema
- 6 Haseli and Poursha

برای محدود نمودن مشارکت مودهای بالاتر وضع شده‌اند. در یک تحقیق مربوط به کشور ژاپن حداکثر ارتفاع سازه‌های جداسازی شده حدوداً ۶۰ متر پیشنهاد داده شده است [۲۵]. در تحقیقی دیگر حداکثر نسبت ابعادی (نسبت ارتفاع به بعد حداقل پلان) برای استفاده از جداساز LRB در ساختمان‌ها پیشنهاد داده شده است [۲۶]. در این تحقیق نشان داده شده است که شرایط خاک ساختگاه و زمان تناوب اصلی ساختمان جداسازی شده پارامترهای مهم در حداکثر نسبت ابعادی هستند. برای مثال به ازای زلزله با بیشینه شتاب زمین معادل با  $g/0.63$  نشان داده شده است که برای شرایط خاک سخت، نیمه سخت و سست ساختگاه، حداکثر نسبت ابعادی برای استفاده از جداساز LRB به ترتیب برابر ۱۰، ۲/۵ و ۱ است. نمونه‌ای از ساختمان‌های بلندمرتبه جداسازی شده برج مسکونی ۴۱ طبقه هزار<sup>۲</sup> در ژاپن [۲۷] و ساختمان ۳۳ طبقه مرکزی نونوا<sup>۳</sup> در شیلی [۲۸] است.

می‌توان از طریق افزایش سختی سازه‌های بلند مرتبه رفتار مناسب‌تری در سازه‌های بلند مرتبه بتنی جداسازی شده بخصوص در نواحی نزدیک به گسل به دست آورد. یک راهکار به کارگیری دیوار برشی و استفاده از سیستم دوگانه در سازه‌های بتن‌آرمه بلند مرتبه است [۱۹]. در این راستا جداسازی لرزه‌ای سازه دیوار برشی با استفاده از جداسازهای الاستومریک مستطیلی مسلح شده با فایبر انجام شده و عملکرد آن بررسی است [۲۹]. عملکرد لرزه‌ای سازه با دیوار برشی پیش ساخته با پایه جداسازی شده مورد بررسی قرار گرفته است [۳۰]. بررسی عملکرد لرزه‌ای یک ساختمان بتن آرمه ۴۰ طبقه با سیستم دوگانه قاب خمشی با دیوار برشی با پایه جداسازی شده با LRB انجام شده است [۳۱]. اثر رکوردهای زلزله حوزه نزدیک با مشخصه‌های جهت‌پذیری و تغییر مکان ماندگار بر روی پاسخ لرزه‌ای ساختمان ۱۰ طبقه بتن‌آرمه با و بدون دیوار برشی با پایه جداسازی شده بررسی شده است [۳۲]. تمامی تحقیقات اشاره شده نشان دهنده بهبود عملکرد سازه‌های با دیوار برشی با پایه جداسازی شده نسبت به سازه‌های بدون دیوار برشی دارند. راهکار دیگر استفاده از میان‌قاب‌های بنایی با توزیع منظم در ارتفاع سازه‌های بتن‌آرمه قاب خمشی است که منجر به افزایش سختی سازه و تأثیر بیشتر جداسازها می‌شوند [۳۳]. البته توزیع نامناسب این میان‌قاب‌ها می‌تواند منجر به تشکیل طبقات نرم و خرابی قابل توجه در سازه‌های بتنی جداسازی شده تحت زلزله‌های نزدیک به گسل شود.

در مطالعه حاضر، به ارزیابی و مقایسه رفتار سازه‌های بتن‌آرمه دوگانه جداسازی شده با جداسازهای لاستیکی-سربی و سازه‌های با پایه گیردار تحت

سازه با چند درجه آزادی با اجرام متمرکز در کف [۱۸] و سازه‌های دو بعدی [۱۹] پرداخته شده است. اگر چه این مدل‌ها برای ساختمان‌های جداسازی شده به آسانی قابل توسعه هستند، پاسخ لرزه‌ای به دست آمده نمی‌تواند نشان دهنده رفتار واقعی سازه باشد. بنابراین استفاده از رویکرد مدل‌سازی سه بعدی برای شبیه‌سازی رفتار واقعی روسازه حین رخدادهای لرزه‌ای ضروری است. با این رویکرد، ارزیابی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح جداسازی شده تحت تحریک‌های دو جهته انجام شده است [۲۰].

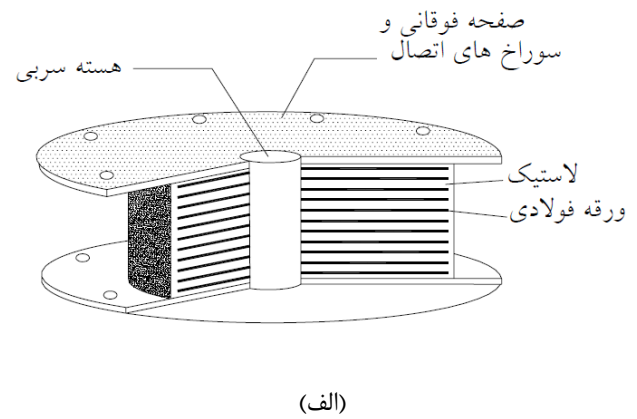
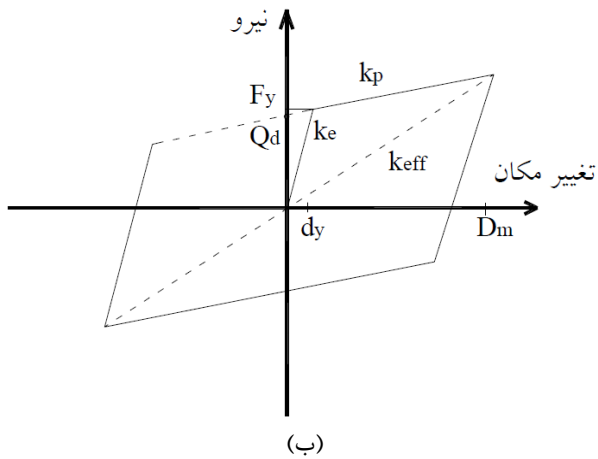
به کارگیری جداساز لرزه‌ای در سازه‌ها منجر به افزایش دوره تناوب آن‌ها می‌شود، حال اگر دوره تناوب خود سازه زیاد باشد (مانند سازه‌های بلندمرتبه)، افزودن جداساز لرزه‌ای تأثیر چندانی بر بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه نداشته و حتی امکان دارد که منجر به افزایش پاسخ سازه نیز شود. گونش و الوجان<sup>۱</sup> [۲۱] با تحلیل دینامیکی غیرخطی ساختمان‌های بلند تحت رکوردهای حوزه نزدیک پالس‌گونه نشان دادند که این رکوردها می‌توانند نسبت به رکوردهای زلزله حوزه دور، تقاضای لرزه‌ای (برش پایه و جابجایی) بزرگ‌تری بر روی سازه ایجاد نمایند. همچنین با ارزیابی نتایج تحلیل‌ها نشان داده شده است که جداساز لرزه‌ای برای ساختمان‌های بلندمرتبه با زمان تناوب بلند زمانی می‌تواند مؤثر و کارا باشد که زمان تناوب اولیه سازه اولیه با اجزای جداساز هر دو در محدوده ۲ تا ۲/۵ ثانیه باشند و همچنین نتایج دلالت بر آن دارند که اگر جداساز لرزه‌ای منجر به زمان تناوب اولیه بزرگ‌تر از ۳ تا ۴ ثانیه شود، تقاضای جابجایی میانگین وارده بر روسازه تحت رکوردهای حوزه نزدیک افزایش قابل توجهی می‌تواند داشته باشد اگر چه نیروی روسازه تا مقداری کاهش نشان خواهد داد [۲۲].

در مورد ارتفاع سازه‌های با جداسازی پایه محدودیت‌هایی وجود دارد. آیین‌نامه ASCE/SEI7-16 [۲۳] برای قاب‌های فولادی معمولی با مهاربندی همگرا حداکثر ارتفاع ۴۸/۴ متر را پیشنهاد داده است. همچنین این آیین‌نامه در صورت استفاده از رویه نیروی جانبی معادل برای تحلیل سیستم جداساز، حداکثر ارتفاع بالاتر از وجه تماس با جداساز را به چهار طبقه یا ۱۹/۸ متر محدود کرده است. به جز این دو مورد اشاره شده، در آیین‌نامه ASCE/SEI7-16 محدودیت دیگری برای ارتفاع سازه‌های جداسازی شده وجود ندارد. در آیین‌نامه NZSEE [۲۴] نیز محدودیت ابعاد برای تحلیل استاتیکی معادل سازه‌های جداسازی شده ساده اعمال شده است. در این حالت حداکثر ارتفاع سازه به چهار طبقه یا ۲۰ متر محدود شده و حداکثر بعد پلان روسازه نیز به ۵۰ متر محدود شده است. این محدودیت‌ها

2 Thousand Tower

3 Nunoa Capital

1 Gunes and Ulucan



شکل ۱. (الف) جداساز لاستیکی با هسته سربی و (ب) رفتار دوخطی با نرم‌شوندگی [۲]

Fig. 1. (a) Lead rubber isolator, (b) bilinear behavior with softening [2]

لاستیکی به منظور ایجاد امکان برای تغییر مکان جانبی سازه به کار رفته و وظیفه تأمین نیروی بازگرداننده به مبدأ را پس از ارتعاش ناشی از زلزله بر عهده دارند. ورق‌های فولادی نازک بین لایه‌های لاستیکی تأمین کننده سختی قائم جداساز هستند. هسته سربی نیز با تسلیم شدن در زمان ارتعاش و تشکیل چرخه‌های هیستریزس پایدار، بخش عمده‌ای از انرژی وارده به سازه در حین زلزله را مستهلک می‌نماید. رفتار هیستریزس این جداسازها را می‌توان به صورت دوخطی (شکل ۱-ب) با سختی اولیه  $(k_e)$  حدود ۹ تا ۱۶ برابر سختی ثانویه پس از تسلیم آن‌ها  $(k_p)$  در نظر گرفت. در این نمودار  $d_y$  تغییر مکان در لحظه تسلیم،  $F_y$  مقاومت تسلیم،  $Q_d$  مقاومت مشخصه،  $k_{eff}$  سختی مؤثر و  $D_m$  بیشینه تغییر مکان جداساز هستند [۲]. در این تحقیق برای هر کدام از ستون‌ها از یک جداساز و برای هر دیوار برشی از دو جداساز استفاده شده است؛ از این سو مشخصات جداسازهای استفاده شده در ستون‌ها و دیوارهای برشی با یکدیگر متفاوت خواهند بود. طراحی این نوع از جداسازها به دو بخش هسته سربی و لاستیکی تقسیم می‌شود. در ابتدا تحلیل این نوع از جداسازها بایستی بر اساس گام‌های زیر انجام شود:

گام ۱- تعیین نیروی قائم بر روی جداساز  $(P_{DL+LL})$ .

گام ۲- تعیین دوره تناوب طبیعی هدف سازه جداسازی شده  $(T_D)$ . در این تحقیق حدود سه برابر دوره تناوب اصلی سازه با پای ثابت استفاده شده است.

گام ۳- تعیین سختی مؤثر جداساز بر اساس رابطه (۱):

زلزله‌های حوزه نزدیک پرداخته شده است. به این منظور سه سازه بتن‌آرمه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه که دارای سیستم دوگانه قاب خمشی ویژه همراه با دیوار برشی ویژه بوده و نیز در پلان مشابه و منظم هستند، در دو حالت جداسازی شده و پایه گیردار طراحی شده‌اند. با توجه به تعریف سازه بلند ارائه شده در مرجع [۱۹]، سازه ۲۰ طبقه به عنوان سازه بلند محسوب شده و با توجه به زمان تناوب بلند آن تأثیر جداسازی بر روی بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه بایستی با دقت بیشتری بررسی شود. یکی از اهداف اصلی این تحقیق بررسی ضوابط آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله ویرایش چهارم استاندارد ASCE/SEI7-۲۸۰۰ [۳۴] و مقایسه آن با سایر آیین‌نامه‌ها مانند ASCE/SEI7-16 به منظور بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بتنی جداسازی شده تحت زلزله‌های حوزه نزدیک است. برای تحلیل مدل‌های غیرخطی سه بعدی توسعه داده شده از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شده است. نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌تواند مبنای توسعه و تصحیح ضوابط ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ برای تحلیل و ارزیابی پاسخ دینامیکی سازه‌های بتن‌آرمه جداسازی شده تحت زلزله‌های حوزه نزدیک باشد.

## ۲- طراحی جداسازها

برای جداسازی پایه در این مطالعه از جداساز لاستیکی با هسته سربی (LRB) استفاده شده است. این جداساز از لایه‌های لاستیکی و فولادی تشکیل شده که به صورت یک در میان به یکدیگر متصل شده و یک هسته استوانه‌ای سربی در مرکز آن قرار گرفته است (شکل ۱-الف). لایه‌های

برشی ( $G$ )، ضریب اصلاحی ( $k$ ) و حداکثر کرنش کششی در زمان گسیختگی ( $\varepsilon_b$ ) برای لاستیک مورد استفاده در جداساز. ضریب شکل جداساز ( $S$ ) با استفاده از رابطه (۶) و مدول فشاری بتن ( $E_c$ ) با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آیند:

$$\frac{E(1+2kS^2)}{G} \geq 400 \quad (۶)$$

$$E_c = E(1+2kS^2) \quad (۷)$$

دقت شود که ضریب شکل جداساز بایستی بزرگ‌تر یا مساوی ۱۰ باشد. گام ۲- طرح اولیه هسته سربی. برای این منظور سطح مقطع هسته سربی ( $A_p$ ) برابر با  $Q_D/f_{pv}$  خواهد بود که در آن  $f_{pv}$  تنش تسلیم سرب است.

گام ۳- تعیین مساحت جداساز ( $A$ ) که برابر با حداکثر مقدار  $A_1$ ،  $A_2$  و  $A_3$  خواهد بود:

- مساحت  $A_1$  بر اساس رابطه (۸) تعیین می‌شود که در آن  $\sigma_c$  فشار مجاز بر روی جداساز است؛

$$A_1 = \frac{P_{DL+LL}}{\sigma_c} \quad (۸)$$

- مساحت  $A_2$  بر اساس رابطه (۹) تعیین می‌شود:

$$A_2 = \frac{18S \times P_{DL+LL}}{E_c \varepsilon_b} \quad (۹)$$

- برای تعیین مساحت  $A_3$ ، ابتدا سختی ارتجاعی تکیه‌گاه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k_r = \frac{k_p}{(1+12 \frac{A_p}{A_1})} \quad (۱۰)$$

$$k_{eff} = \frac{P_{DD+LL}}{g} \left( \frac{2\pi}{T_D} \right)^2 \quad (۱)$$

گام ۴- تعیین نسبت میرایی معادل مؤثر ( $\xi_{eff}$ ). ضریب میرایی معادل مؤثر ( $c_{eff}$ ) بر اساس رابطه زیر قابل تعیین خواهد بود:

$$c_{eff} = \left( \frac{4\pi}{g} \right) \frac{\xi_{eff} P_{DD+LL}}{T_D} \quad (۲)$$

گام ۵- تعیین تغییر مکان طرح ( $D_D$ ) بر اساس رابطه (۳):

$$D_D = \left( \frac{g}{4\pi^2} \right) \frac{S_{M1} \cdot T_D}{B_M} \quad (۳)$$

که در آن  $S_{M1}$  پارامتر شتاب طیفی با ۰.۵٪ میرایی متناظر با زلزله بیشینه و  $B_M$  ضریب عددی برای میرایی مؤثر سیستم جداساز در جایجایی بیشینه طراحی است. این مقادیر بر اساس آیین‌نامه ASCE/SEI7-16 تعیین می‌شوند.

گام ۶- تعیین مقاومت مشخصه جداساز بر اساس رابطه (۴):

$$Q_D = \left( \frac{\pi}{2} \right) k_{eff} \xi_{eff} \cdot D_D \quad (۴)$$

گام ۷- تعیین سختی ثانویه جداساز بر اساس رابطه (۵)؛ سختی اولیه  $k_e$  حدوداً ده برابر سختی ثانویه در نظر گرفته می‌شود.

$$k_p = k_{eff} - \frac{Q_D}{D_D} \quad (۵)$$

بر اساس نتایج تحلیل، مراحل طراحی جداساز بر اساس گام‌های زیر انجام خواهد شد:

گام ۱- تعیین کرنش برشی بیشینه ( $\gamma_{max}$ )، مدول یانگ ( $E$ )، مدول

گام ۷- کنترل حداکثر کرنش برشی جداساز تحت بارهای قائم با استفاده از رابطه زیر:

$$6S \frac{P_{DL+LL}}{E_c \cdot A} \leq \frac{\epsilon_b}{3} \quad (15)$$

گام ۸- قطر هسته سربی بایستی به گونه‌ای انتخاب شود که نسبت ارتفاع مؤثر هسته سربی به قطر آن بیشتر از ۱/۲۵ و کمتر از ۵ باشد.  
گام ۹- کنترل نسبت ارتفاع مؤثر هسته سربی به قطر آن؛ این نسبت بایستی بیشتر از ۱/۲۵ و کمتر از ۵ باشد.

گام ۱۰- تعیین مقدار نیروی برشی طرح در سازه جداسازی شده. این مقدار  $V_s$  برابر با نصف بیشینه دو مقدار برش معرفی شده در روابط (۲۰) و (۲۱) در نظر گرفته می‌شود:

$$V_{b1} = (\sum k_{eff}) D_D \quad (16)$$

$$V_{b2} = \frac{W_T}{g} \left( \frac{2\pi}{T_{DP}} \right)^2 D_D \quad (17)$$

که در آن‌ها  $\sum k_{eff}$  مجموع سختی مؤثر تمامی جداسازها،  $W_T$  وزن کل سازه و  $T_{DP}$  دوره تناوب سازه اصلی می‌باشد. دقت شود که  $V_s$  محاسبه شده بایستی بزرگ‌تر از برش پایه ساختمان با پایه ثابت باشد.  
گام ۱۱- کنترل حداکثر تغییر شکل نسبی برشی بر اثر ترکیب فشار، پیچش و بار جانبی لرزه‌ای با استفاده از رابطه زیر:

$$\gamma_c + \gamma_t + \gamma_{eq} \leq \frac{\epsilon_b}{1.33} \quad (18)$$

حداکثر کرنش برشی جداساز ناشی از فشار ( $\gamma_c$ )، پیچش ( $\gamma_t$ ) و بار جانبی ( $\gamma_{eq}$ ) به صورت روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\gamma_c = 6S \frac{P_{DL+LL+EQ}}{E_c \cdot A_{re}} \quad (19)$$

بر این اساس حداقل سطح مقطع کاهش یافته برای احتراز از گسیختگی برشی در جداساز مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A_{sf} = \frac{k_r \cdot t_t}{G} \quad (11)$$

که در آن  $t_t$  ضخامت کل جداساز لاستیکی صرف نظر از ضخامت ورق‌های فوقانی و تحتانی است که برابر با  $D_D / \gamma_{max}$  خواهد بود. بنابراین قطر تکیه‌گاه برابر با  $d = \sqrt{4A_{sf} / \pi}$  خواهد بود. حال برای جداساز دایروی مساحت  $A_3$  بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A_3 = \frac{d^2}{4} (\beta - \sin \beta) \quad (12)$$

که در آن  $\beta = 2 \cos^{-1} \left( \frac{D_D}{d} \right)$  است. سپس با محاسبه بیشینه  $A_1$ ،  $A_2$  و  $A_3$ ، سطح مقطع تکیه‌گاه ( $A$ ) و قطر آن ( $d$ ) محاسبه می‌شود. مقدار  $A_3$  بر حسب مقدار قطر محاسبه شده نهایی برای تکیه‌گاه برابر با سطح مقطع کاهش یافته  $A_{re}$  خواهد بود.

گام ۴- تعیین ضخامت یک لایه لاستیک ( $t_r$ ) به صورت  $d/4S$  و تعداد لایه‌های لاستیکی ( $N$ ) به صورت  $t_t / t_r$ .

گام ۵- تعیین ضخامت ورق‌های فولادی و ارتفاع کل جداساز. با این فرض که ضخامت ورق‌های فوقانی و تحتانی برابر و مساوی  $t$  باشد، ضخامت ورق‌های فولادی از رابطه زیر قابل تعیین خواهد بود:

$$t_s = \frac{4t \times P_{DL+LL}}{A_{re} \cdot f_y} \quad (13)$$

که در آن  $f_y$  مقاومت جاری شدن فولاد است. دقت شود که ضخامت لایه‌های فولادی بایستی بزرگ‌تر یا مساوی ۲ میلی‌متر باشد. بنابراین ارتفاع کل جداساز برابر با  $t_t + N t_s + 2t$  خواهد بود.  
گام ۶- کنترل کمانش جداساز با استفاده از رابطه زیر:

$$\frac{P_{DL+LL}}{A} \leq \frac{G \cdot S \cdot d}{2.5 t_t} \quad (14)$$

سازه در جدول ۱ گزارش شده‌اند. در این تحقیق تحلیل و طراحی اولیه بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۳۵] و آیین‌نامه ACI318-14 [۳۶] و برای تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی سازه‌ها از نرم‌افزار ETABS استفاده شده است. برای انجام تحلیل دینامیکی طیفی بایستی دقت شود که بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰، در مواردی که برش پایه ناشی از تحلیل دینامیکی طیفی کمتر از برش پایه به دست آمده از تحلیل استاتیکی معادل باشد، مقادیر بازتاب‌ها بایستی در ۸۵ درصد نسبت برش پایه استاتیکی به دینامیکی ضرب شوند در حالی که در آیین‌نامه ASCE، برش دینامیکی بر اساس ۱۰۰ درصد برش استاتیکی مقیاس می‌شود. مشخصات مقاطع طراحی شده برای هر سازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه در پیوست به ترتیب در جداول ۱-پ، ۲-پ و ۳-پ گزارش شده‌اند. زمان تناوب به دست آمده برای سازه‌ها در جدول ۲ گزارش شده است. بر اساس مراحل اشاره شده در بخش ۲، جداسازهای LRB برای ستون‌ها و دیوارهای برشی سازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه معرفی شده در این بخش طراحی شده‌اند. برای دیوار برشی از چهار جداساز (دو جداساز در ابتدا و انتها و دو جداساز در فواصل یکسان از دهانه دیوار برشی) استفاده شده است. در این تحقیق برای طراحی جداسازها از لاستیک با سختی ۵۵ بر اساس نشریه ۵۲۳ استفاده شده است. مشخصات مورد استفاده برای طراحی جداسازها بر اساس پارامترهای توضیح داده شده در بخش ۲، در جدول ۳ ارائه شده‌اند. نتایج طراحی این جداسازها در جداول ۴-پ و ۵-پ پیوست مقاله گزارش شده است.

برای مدل‌سازی دال از دیافراگم صلب استفاده شده است که شامل دو درجه آزادی انتقالی در صفحه دال و یک درجه دورانی حول محور قائم بر صفحه خواهد بود. در نرم‌افزار ETABS برای ملاحظه رفتار غیرخطی تیرها و ستون‌ها از مدل پلاستیسیته متمرکز استفاده شده است. در این مدل از یک المان الاستیک میانی و دو مفصل پلاستیک فایبر در دو انتهای آن‌ها استفاده می‌شود. برای هر فایبر در مقطع عرضی مفصل فایبر، منحنی تنش-کرنش غیرخطی مصالح بتن و فولاد استفاده می‌شود. با جمع رفتار تمامی فایبرها در سطح مقطع و ضرب در طول مفصل پلاستیک رابطه لنگر-انحناء به دست می‌آید. رفتار برشی در مدل فایبر مدل نمی‌شود و به صورت معمول با مدول برشی الاستیک در نظر گرفته خواهد شد. مفصل پلاستیک فایبر M3 در تیرها برای تنها محور اصلی خمش و مفصل پلاستیک فایبر P-M2-M3 در ستون‌ها برای هر دو محور اصلی خمش در نظر گرفته می‌شوند که بر پایه اندرکنش نیروی محوری و خمش دو محوره در موقعیت قرارگیری مفاصل هستند. برای تعیین مشخصات مفاصل پلاستیک تیرها از جدول ۱۰-۷

$$\gamma_i = \frac{d^2}{2t_i t_r} \left( \frac{12 D_D e}{b^2 + l^2} \right) \quad (20)$$

$$\gamma_{eq} = \frac{D_D}{t_i} \quad (21)$$

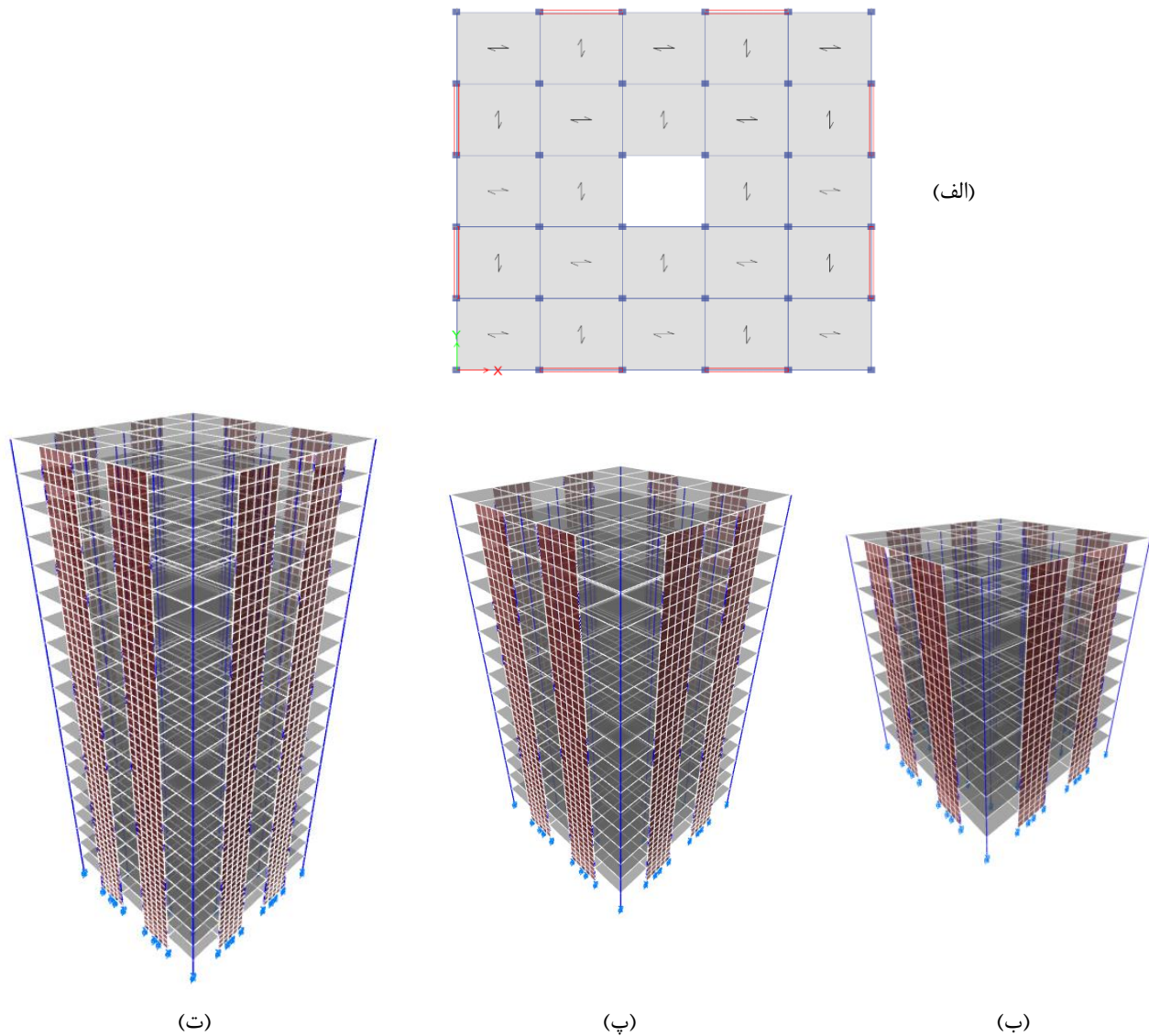
که در آن‌ها  $P_{DL+LL+EQ}$  بار قائم بر روی جداساز با ملاحظه اثر نیروی زلزله،  $e$  خروج از مرکزیت حقیقی سازه در تراز جداسازی به اضافه ۵ درصد بعد سازه عمود بر راستای زلزله مورد نظر به عنوان خروج از مرکزیت تصادفی،  $b$  و  $l$  ابعاد سازه هستند.

گام ۱۲- کنترل چرخش جداساز تحت زلزله با استفاده از رابطه زیر:

$$D_D \leq \frac{1}{2} \times \frac{P_{DL+LL+EQ} \cdot d - Q_D \cdot h}{P_{DL+LL+EQ} + k_p \cdot h} \quad (22)$$

### ۳- سازه‌های مورد مطالعه

در این تحقیق از سه سازه بتن‌آرمه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با سیستم مقاوم دوگانه با شکل‌پذیری ویژه استفاده شده است. سازه ۲۰ طبقه به عنوان سازه بلند محسوب می‌شود. محدودیت ارتفاع سیستم‌های مقاوم مختلف بر اساس ASCE/SEI7-16، معیار انتخاب سیستم دوگانه قاب خمشی با دیوار برشی ویژه برای این سازه‌ها می‌باشد. حداقل مشارکت قاب خمشی برای تحمل بارهای جانبی بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ و ASCE/SEI7-16 بایستی برابر ۲۵ درصد بوده و حداقل مشارکت دیوارهای برشی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ بایستی برابر ۵۰ درصد باشد. پلان هر سه سازه یکسان بوده و دارای پنج دهانه ۵ متری در هر دو جهت سازه می‌باشند. ارتفاع تمامی طبقات برابر با ۳/۲ متر است. پلان و نمای این سازه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. این ساختمان‌ها با کاربری مسکونی در شهر تبریز و بر روی خاک نوع ۲ بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ و نوع C بر اساس ASCE/SEI7-16 احداث شده‌اند. سقف تمامی طبقات از نوع تیرچه بلوک بوده و پلان تیربندی در شکل ۲ نشان داده شده است. در طراحی سازه‌ها سقف به صورت صلب در نظر گرفته شده است. بارهای ثقلی و مشخصات مصالح مورد استفاده در طراحی



شکل ۲. (الف) پلان سازه‌ها و نمای سازه‌های (ب) ۱۰ طبقه (پ) ۱۵ طبقه و (ت) ۲۰ طبقه

Fig. 2. (a) Plan of structures, and elevation of structures (b) 10 story, (c) 15 story, (d) 20 story

می‌شود. این مدل خصوصیات پلاستیسیته مزدوج دو تغییر شکل برشی را در نظر گرفته و برای سایر تغییر شکل‌ها از رفتار خطی استفاده می‌کند. برای تعریف رفتار جداساز در این مطالعه تمامی درجات آزادی به غیر از U2 و U3 مقید شده‌اند. برای تعریف سختی و میرایی مؤثر در رفتار خطی و همچنین سختی، مقاومت تسلیم و نسبت سختی پس از تسلیم در رفتار غیرخطی از مبانی توضیح داده شده در بخش ۲ و مشخصات ارائه شده برای جداسازها در جداول ۴-پ و ۵-پ پیوست مقاله استفاده شده است.

آیین‌نامه ASCE41-17 [۳۷] و برای تعیین مشخصات مفاصل پلاستیک ستون‌ها از جداول ۸-۱۰ و ۹-۱۰ این آیین‌نامه استفاده شده است. مفاصل فایبر نسبت به مدل‌های دیگر موجود رفتار واقع‌گرایانه‌تری دارند ولی نیازمند تلاش محاسباتی زیادتری هستند. برای مدل‌سازی رفتار هیستریزس بتن و فولاد به ترتیب از مدل‌های Kinematic و Concrete استفاده شده است. برای مدل‌سازی غیرخطی هندسی نیز خاصیت  $P - \Delta$  در مدل سازه معرفی شده است.

برای مدل‌سازی جداساز LRB از مدل Rubber Isolator استفاده



جدول ۱. بارهای ثقلی و مشخصات مصالح سازه‌های مورد مطالعه

Table 1. Gravity loads and material specifications of studying structures

مقاومت تسلیم میلگرد (MPa)	مقاومت فشاری بتن (MPa)	بار دیوار پیرامونی (kN/m)		بار زنده بام (kN/m <sup>2</sup> )		بار زنده طبقات (kN/m <sup>2</sup> )		بار زنده تیغه‌ها (kN/m <sup>2</sup> )	بار مرده طبقات (kN/m <sup>2</sup> )
		بام	طبقات	ASCE	۲۸۰۰	ASCE	۲۸۰۰		
۴۰۰	۲۵	۲/۸	۷/۱	۰/۹۶	۱/۵	۱/۹۲	۲	۱/۵	۲/۶

جدول ۲. زمان تناوب سازه‌های مورد مطالعه (بر حسب ثانیه)

Table 2. Period of studying structures (sec)

سازه ۲۰ طبقه		سازه ۱۵ طبقه		سازه ۱۰ طبقه	
ASCE	۲۸۰۰	ASCE	۲۸۰۰	ASCE	۲۸۰۰
۲/۲۳	۲/۲۸	۱/۷۶	۱/۷۹	۱/۰۵	۱/۰۷

جدول ۳. مشخصات مورد استفاده برای طراحی جداسازها

Table 3. Utilized specifications for design of isolators

$\sigma_c$ (MPa)	$f_{pv}$ (MPa)	$\epsilon_b$ (%)	$k$	$G$ (MPa)	$E$ (MPa)	$\gamma_{max}$ (%)	$B_M$	$\xi_{eff}$ (%)
۱۰	۱۰/۵	۵۰۰	۰/۶۴	۰/۸	۳/۲۵	۱۵۰	۱/۶	۲۵

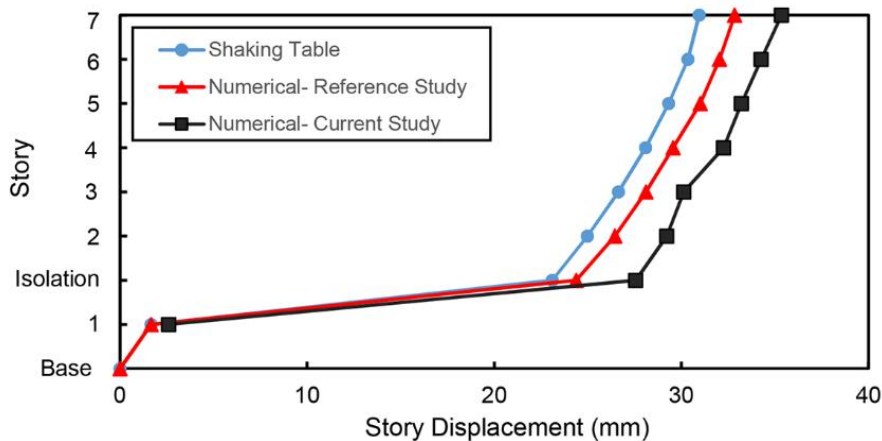
است [۳۹]. در مدل قاب با مقیاس ۱:۵ طول ۲/۷۸ متر، ارتفاع طبقه اول ۰/۹۶ متر و ارتفاع سایر طبقات ۰/۶۶ متر است. سیستم جداساز در فاصله ۰/۲۳ متر پایین‌تر از کف اول روی ستون‌ها نصب شده‌اند. ستون‌های طبقه اول مربعی شکل با بعد ۱۵۰ میلی‌متر بوده و ارتفاع ستون در طبقه اول قاب جداسازی شده به ۷۳۰ میلی‌متر محدود شده است. مقاومت فشاری بتن ۳۸/۴ مگاپاسکال و مقاومت جاری شدن فولاد ۴۰۰ مگاپاسکال هستند. برای مدل‌سازی غیرخطی سازه از فرضیات توضیح داده شده در بالا برای مدل‌سازی تیر و ستون با مفصل پلاستیک فایبر و جداساز با المان Rub-ber Isolator استفاده شده است. از شش جداساز (چهار جداساز LRB و دو جداساز خطی LNR) برای جداسازی طبقه اول استفاده شده است. برای جداساز LRB ارتفاع جداساز و ضخامت لایه لاستیک به ترتیب ۶۰ و ۲۴ میلی‌متر؛ سختی برشی اولیه، سختی افقی معادل و سختی پس از تسلیم به ترتیب ۲/۲۱، ۲۷۶/۰ و ۰/۲۲ کیلونیوتن بر میلی‌متر؛ نیروی تسلیم ۳/۰۲

برای مدل‌سازی غیرخطی دیوار برشی از مدل layered shell استفاده شده است. در این مدل در ضخامت کل دیوار تعدادی از لایه‌ها تعریف می‌شوند که می‌توانند موقعیت، ضخامت، رفتار و مصالح متفاوتی داشته باشند. برای تعریف مصالح بتن از مدل داروین-پکنولد [۳۸] استفاده می‌شود که قادر به در نظر گرفتن اندرکنش خمش و برش در دیوارهای برشی می‌باشد. از این مدل بتن برای تعریف رفتار غشایی و خمشی دیوار در ترکیب با آرماتورهای فولادی واقع شده در هر جهت و موقعیت دلخواه استفاده می‌شود. یکی از مزایای عمده مدل layered shell آن است که کاملاً رفتار غیرخطی مصالح بتن و فولاد را در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سازه در نظر می‌گیرد و جهت ترک‌خوردگی بتن حین بارگذاری می‌تواند تغییر پیدا کند.

برای اعتبارسنجی از روش مدل‌سازی از نتایج میز لرزان و مطالعه عددی بر روی قاب بتن‌آرمه ۷ طبقه با جداساز LRB در طبقه اول استفاده شده

2 Linear Natural Rubber Bearing

1 Darwin-Pecknold



شکل ۳. تغییر مکان طبقات در قاب جداسازی شده تحلیل اعتبارسنجی

Fig. 3. Displacement of stories in isolated frame of validation analysis

که تغییر شکل‌های ایجاد شده منجر به اضافه تنش یا ناپایداری واحدهای جداساز یا سایر المان‌های سازه‌ای نشود. در آیین‌نامه NZSEE نیز در مورد سازه‌های کلی که نامنظمی مشخصی نداشته باشند (مانند سازه‌های مطالعه حاضر)، بلند شدگی جداسازها با حدود مشخصی مجاز دانسته شده است. همچنین در راهنمای طراحی جداساز برای سازه‌ها [۱]، سطوح پایین از بلند شدگی مجاز شمرده شده است. به عنوان یک معیار کمی قابل اعتماد، مقدار تنش کششی مجاز در تکیه‌گاه‌ها تحت زلزله حداکثر MCE برابر ۲ مگاپاسکال پیشنهاد شده است [۴۰]. در این مطالعه بحرانی‌ترین حالت از نظر بلند شدگی در ستون‌های گوشه سازه ۲۰ طبقه به وجود آمده است که بر حسب معیار توضیح داده شده در بالا کمتر از ۲ مگاپاسکال بوده و قابل قبول تلقی شده است. جهت یکنواخت کردن عملکرد روسازه در سازه‌های مورد مطالعه، بایستی سازه روی جداساز با تیرهای قوی به جداساز متصل شوند. برای مدل‌سازی این مسئله در نرم‌افزار گره‌های تراز مربوطه نسبت به یکدیگر مقید شده‌اند تا عملکرد صلب مورد نظر را تأمین نمایند.

#### ۴- مشخصات شتاب نگاشت‌های استفاده شده

طبق آیین‌نامه ASCE/SEI7-16 برای انجام تحلیل تاریخیچه زمانی حداقل به یازده رکورد زلزله نیاز است؛ بنابراین در این مطالعه برای تحلیل تاریخیچه زمانی سازه‌ها از این تعداد رکورد حوزه نزدیک مطابق جدول ۴ استفاده شده است. رکوردها از سایت PEER و از بخش رکوردهای NGA استخراج شده‌اند. طبق ضوابط آیین‌نامه ASCE زلزله‌ها با فاصله

کیلونیوتن و نسبت میرایی معادل ۲۵٪ هستند. برای جداساز LNR سختی افقی معادل ۰/۱۹۸ کیلونیوتن بر میلی‌متر و نسب میرایی ۴٪ هستند. سازه قاب تحت ارتعاش میز لرزان قرار گرفته که پروتکل بارگذاری آن شامل چهار زلزله متوالی در سطح شتاب بیشینه زمین  $g/4$  است. این زلزله‌ها شامل ۳ رکورد ثبت شده طبیعی تا فت<sup>۱</sup>، نورتریج<sup>۲</sup> و السترو<sup>۳</sup> و یک رکورد مصنوعی است. جایجایی طبقات بر اساس آزمایش میز لرزان و مطالعه عددی مطالعه مرجع و همچنین مطالعه حاضر در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج به دست آمده دقت قابل قبولی داشته و اختلاف ایجاد شده می‌تواند ناشی از نحوه مدل‌سازی، مشخصات المان‌های مورد استفاده و نحوه مقیاس کردن رکوردها باشد.

بر اساس آیین‌نامه ASCE ضریب ایمنی در برابر واژگونی کلی در وجه تماس جداساز نباید تحت ترکیبات بارگذاری مورد نیاز کمتر از یک باشد. در ترکیبات بارگذاری تمامی بارهای ثقلی و لرزه‌ای ملاحظه شده و نیروهای لرزه‌ای نیز در محاسبات واژگونی بر اساس زلزله حداکثر MCE محاسبه می‌شوند. در مورد هر سه سازه مورد مطالعه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه محاسبات واژگونی انجام شده و در تمامی موارد حداقل ضریب اطمینان ۱ به دست آمده است. در مورد بلند شدگی جداسازها مطابق با آیین‌نامه ASCE، بلند شدگی موضعی المان‌های جداساز اجازه داده نشده است مگر در حالتی

- 1 Taft
- 2 Northridge
- 3 El Centro

در این آیین‌نامه معادل با طیف پاسخ متناظر با زلزله حداکثر است که برابر با ۱/۵ برابر طیف پاسخ طراحی می‌باشد. احتمال رخداد زلزله حداکثر در ۵۰ سال عمر مفید سازه ۲٪ درصد است (دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال). به دلیل مشکل در حفظ ویژگی‌های پالس سرعت، استفاده از روش تطبیق طیفی برای رکوردهای زلزله حوزه نزدیک مناسب نخواهد بود. بنابراین در این تحقیق از روش مقیاس دامنه استفاده شده است. در این روش برای هر زوج شتاب‌نگاشت افقی زلزله، یک طیف بیشینه جهت ساخته می‌شود. هر شتاب‌نگاشت با ضریب مقیاس یکسان برای هر دو مؤلفه افقی مقیاس می‌شود به گونه‌ای که میانگین طیف بیشینه جهت تمامی رکوردهای زلزله انتخاب شده در مطابقت یا بزرگ‌تر از طیف پاسخ هدف در بازه دوره تناوب مورد نظر باشد. برای هر دوره تناوب در این بازه، متوسط طیف بیشینه جهت برای تمامی رکوردهای زلزله نباید کمتر از ۹۰٪ طیف پاسخ هدف باشد. حد بالای بازه دوره تناوب در این آیین‌نامه بایستی برابر یا بزرگ‌تر از دو برابر بزرگ‌ترین زمان تناوب مود اول ساختمان در جهات افقی اصلی پاسخ باشد. حد بالا در ویرایش‌های قبلی این آیین‌نامه ۱/۵ برابر بزرگ‌ترین زمان تناوب مود اول ساختمان معرفی شده بود که در تحقیق دیگری نشان دادند که این حد برای ارزیابی ساختمان‌های قابی شکل شکل‌پذیر تحت زلزله حداکثر مناسب نیست [۴۴]. حد پایین بازه دوره تناوب نیز به گونه‌ای انتخاب می‌شود که بازه زمان تناوب انتخابی شامل حداقل تعداد مودهای الاستیکی باشد که برای حصول ۹۰٪ مشارکت جرمی در هر جهت افقی اصلی لازم است. این ضابطه به خصوص برای سازه‌های بلند مرتبه مورد مطالعه در این تحقیق اهمیت زیادی خواهد داشت. حد پایین انتخاب شده نباید از ۲۰٪ کوچک‌ترین زمان تناوب مود اول هر دو جهت افقی اصلی پاسخ بزرگ‌تر باشد. لازم به ذکر است که بر اساس آیین‌نامه ASCE، برای سایت‌های نزدیک گسل، هر جفت مؤلفه افقی حرکت زمین باید به جهات موازی و عمود بر گسل مسبب دوران کنند و در این جهات به سازه اعمال شوند. مطابق با توضیحات داده شده، میانگین هندسی شتاب طیفی مؤلفه‌های افقی زلزله‌های انتخاب شده و همچنین طیف‌های طراحی هدف در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس ضوابط توضیح داده شده، برای سازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با پای ثابت و جداسازی شده بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ و آیین‌نامه ASCE مقیاس کردن رکوردهای زلزله به صورت مجزا انجام شده و در تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌های مربوطه مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است برای ملاحظه مشابهت لرزه‌خیزی در طیف‌ها، ابتدا بر اساس آیین‌نامه UFC [۴۵]، شتاب طیفی

۱۵ کیلومتر از گسل فعال با توانایی تولید زلزله با بزرگای بیشتر یا مساوی ۷ و همچنین زلزله‌ها با فاصله ۱۰ کیلومتر از گسل فعال با توانایی تولید زلزله با بزرگای بیشتر یا مساوی ۶، زلزله حوزه نزدیک محسوب می‌شوند. علاوه بر رعایت این ضابطه، نوع گسل امتداد لغز معکوس، بزرگای زلزله محدوده ۶ تا ۸ و سرعت موج برشی بین ۳۷۵ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه سایر معیارها برای انتخاب رکوردهای زلزله در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به تنوع زمان تناوب سازه‌ها سعی شده است که از رکوردها با محتوای فرکانسی و زمان تناوب مشخصه مختلف استفاده شود. یغمایی سابق<sup>۱</sup> و همکاران [۴۱] نشان دادند که نسبت بیشینه شتاب زمین (PGA<sup>۲</sup>) به بیشینه سرعت زمین (PGV<sup>۳</sup>) می‌تواند معیاری مناسب برای ارزیابی لرزه‌های سازه‌های جداسازی شده باشد. برای رکوردهای انتخاب شده این نسبت در محدوده ۵/۴۰ تا ۱۶/۶۷ هرگز قرار ندارند که بر اساس [۴۱] شامل محدوده متوسط تا زیاد از محتوای فرکانسی می‌باشند. بر اساس روش ارائه شده توسط شاهی و بیکر<sup>۴</sup> [۴۲] چهار رکورد شبیه پالس هستند که زمان تناوب پالس آن‌ها نیز در جدول ۴ گزارش شده است. دقت شود که رکوردهای شبیه پالس با کد ۱ در ستون مربوطه از جدول ۴ مشخص شده‌اند. اگر فرکانس مشخصه رکوردهای زلزله در ناحیه فرکانس پایین قرار بگیرد، رکوردهای زلزله اثر زیادی بر روی سازه‌ها با زمان تناوب بلند خواهند داشت و بالعکس [۴۳]. زمان تناوب مشخصه رکوردها به عنوان زمان تناوب متناظر با بیشینه دامنه فوریه رکوردها در جدول ۴ گزارش شده است.

برای مقیاس کردن رکوردهای زلزله انتخاب شده بر اساس استاندارد ویرایش چهارم ۲۸۰۰، هر زوج شتاب‌نگاشت به مقدار حداکثر خود مقیاس شده و طیف هر یک از آن‌ها بر اساس نسبت میرایی ۰.۵٪ تعیین می‌شود. سپس طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب‌نگاشت به دست آمده با استفاده از روش جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب شده و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته می‌شود. هر زوج شتاب‌نگاشت بایستی به نحوی مقیاس شود که برای هر پریود در محدود ۰/۲ تا ۱/۵ برابر زمان تناوب طبیعی ساختمان، مقدار متوسط طیف جذر مجموع مربعات مربوط به تمام زوج مؤلفه‌ها، بیش از ۱۰ درصد از ۱/۳ برابر مقدار متناظر طیف طرح استاندارد کمتر نباشد.

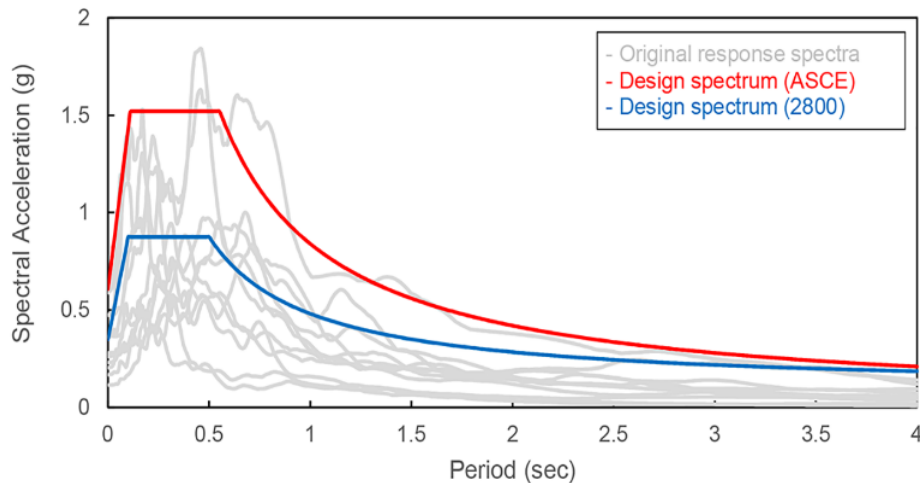
در آیین‌نامه ASCE دو روش مقیاس دامنه و تطبیق طیفی برای تطبیق رکوردهای زلزله با طیف پاسخ هدف وجود دارد. طیف پاسخ هدف

- 1 Yaghmaei-Sabegh
- 2 Peak Ground Acceleration
- 3 Peak Ground Velocity
- 4 Shahi and Baker

جدول ۴. مشخصات رکوردهای حوزه نزدیک مورد استفاده در تحلیل تاریخچه زمانی

Table 4. Characteristics of near field records used in time history analysis

شماره	رکورد	ایستگاه	سال	بزرگا	فاصله (کیلومتر)	PGV/PGA (هرتز)	شبه پالس	زمان تناوب پالس (ثانیه)	زمان تناوب مشخصه (ثانیه)
۱	Park Field	up SAR02	۲۰۰۴	۶/۱۹	۹/۴۹	۱۶/۶۷	۰	-	۰/۷۳
۲	Northridge	Pacoima Kagel Canyon	۱۹۹۴	۶/۶۹	۵/۲۶	۹/۵۲	۱	۰/۷۳	۰/۸۷
۳	Chi-Chi	CHY024	۱۹۹۹	۷/۶۲	۱۰/۹۶	۵/۴۰	۱	۵/۳۴	۴/۰۰
۴	Iwate, Japan	IWTH24	۲۰۰۸	۶/۹	۳/۱	۱۵/۶۳	۰	-	۲/۶۴
۵	Landers	Joshua Tree	۱۹۹۲	۷/۲۸	۱۱/۰۳	۹/۹۰	۰	-	۱/۳۰
۶	Duzce	Lamont1061	۱۹۹۹	۷/۱۴	۱۱/۴۶	۱۰/۶۴	۰	-	۰/۳۳
۷	Montenegro	Ulcinj-Hotel	۱۹۷۹	۷/۱	۱/۵۲	۹/۳۵	۱	۱/۹۷	۰/۶۸
۸	Tabas	Dayhook	۱۹۷۸	۷/۳۵	۱۳/۹۴	۱۴/۹۳	۰	-	۰/۴۴
۹	Loma Prieta	LGPC	۱۹۸۹	۶/۹۳	۳/۸۸	۱۱/۴۹	۰	-	۰/۶۴
۱۰	Kobe	Nishi-Akashi	۱۹۹۵	۶/۹	۷/۰۸	۱۱/۹۰	۰	-	۰/۷۳
۱۱	Kocaeli	Arcelik	۱۹۹۹	۷/۵۱	۱۰/۵۶	۱۴/۷۰	۱	۷/۷۹	۵/۱۲

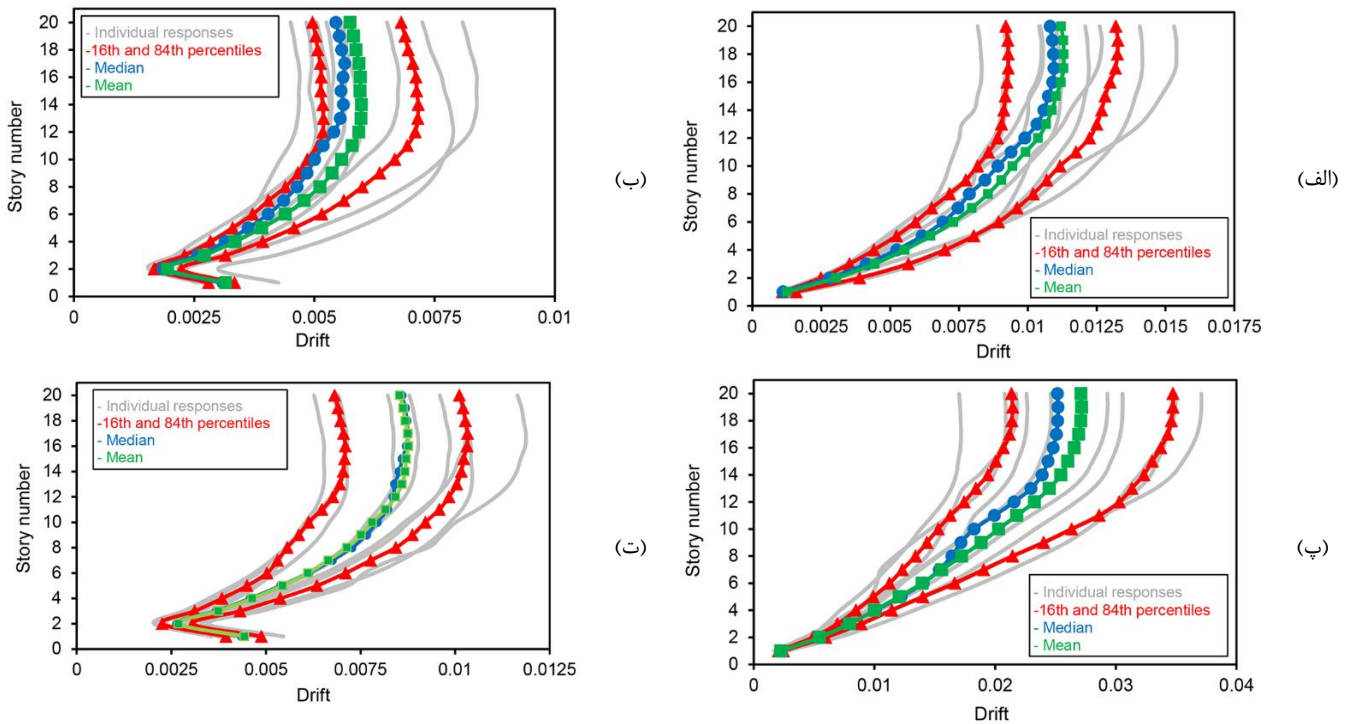


شکل ۴. طیف پاسخ رکوردهای انتخاب شده برای تحلیل تاریخچه زمانی و طیف طراحی آیین نامه ASCE و استاندارد ۲۸۰۰

Fig. 4. Response spectrum of selected records for time history analysis and design spectrum of ASCE code and 2800 standard

استاندارد ۲۸۰۰ است، شتاب طیف طراحی در زمان تناوب کوتاه و ۱ ثانیه به ترتیب  $g$  ۱/۹ و  $g$  ۰/۸۴ به دست می‌آید که در توسعه طیف طراحی ASCE از این پارامترها استفاده شده است.

در زمان تناوب کوتاه و در زمان تناوب ۱ ثانیه برای شهر تبریز به ترتیب  $g$  ۱/۹ و  $g$  ۰/۹ انتخاب شده و بر اساس خاک نوع C آیین‌نامه ASCE که از نظر سرعت موج برشی در تطابق با خاک نوع II در



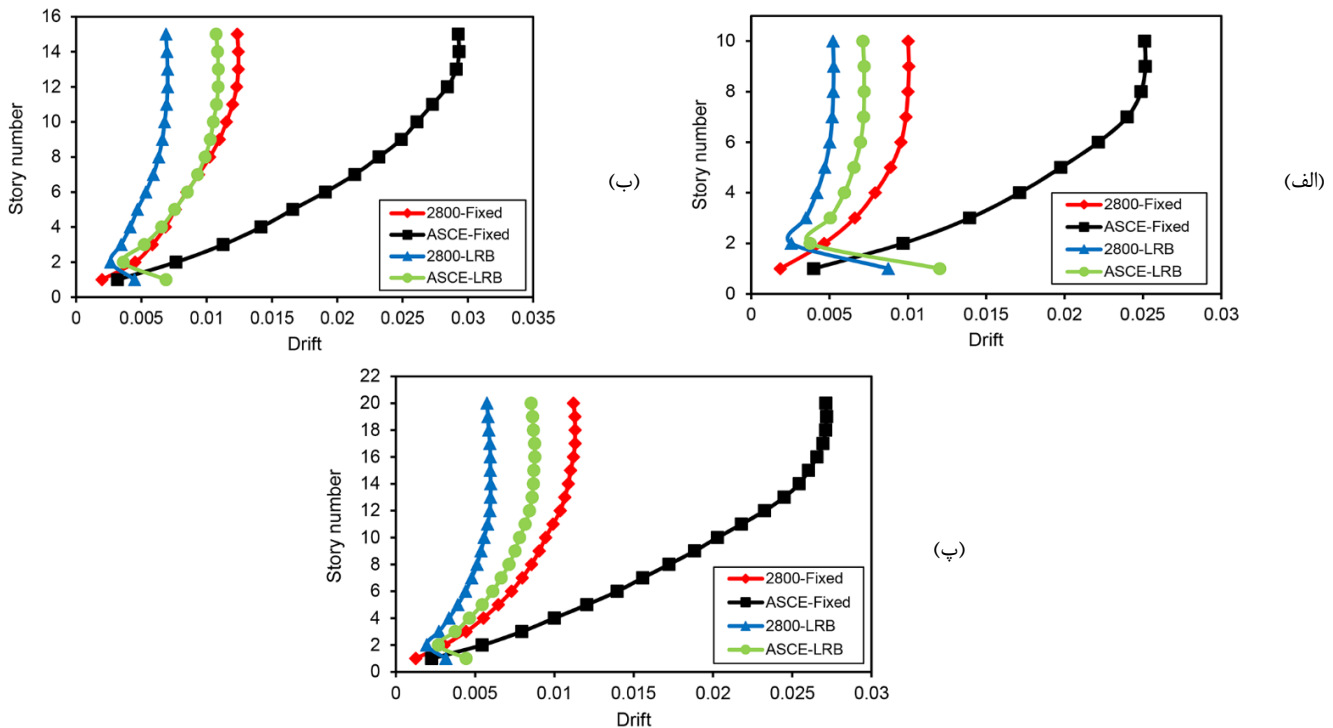
شکل ۵. تاریخچه میانه، میانگین و صدک‌های ۱۶ و ۸۴ درصد دررفت طبقات سازه ۲۰ طبقه (الف) ۲۸۰۰ با پای ثابت، (ب) ۲۸۰۰ جداسازی شده، (پ) ASCE با پای ثابت و (ت) ASCE جداسازی شده

Fig.5. History of median, mean and 16% and 84% percentiles of story drift of 20 story structure (a) 2800 fixed base, (b) 2800 isolated, (c) ASCE fixed base, and (d) ASCE isolated

## ۵- نتایج

افزایش یافته است. به دلیل مشاهده روند مشابه نمودار مربوط به سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه گزارش نشده است. برای سازه ۲۰ طبقه با پای ثابت، مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ دررفت میانگین در طبقه بام حدود ۱/۱ درصد، در طبقه میانی حدود ۰/۹۴ درصد و در طبقه اول حدود ۰/۱۲ درصد است در حالی که مطابق با آیین‌نامه ASCE دررفت میانگین در طبقه بام حدود ۲/۷ درصد، در طبقه میانی حدود ۲ درصد و در طبقه اول حدود ۰/۲۲ درصد است. در مقابل برای سازه ۲۰ طبقه جداسازی شده، مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ دررفت میانگین در طبقه بام حدود ۰/۵۷ درصد، در طبقه میانی حدود ۰/۵۵ درصد و در طبقه اول حدود ۰/۳۱ درصد است در حالی که مطابق با آیین‌نامه ASCE دررفت میانگین در طبقه بام حدود ۰/۸۵ درصد، در طبقه میانی حدود ۰/۷۸ درصد و در طبقه اول حدود ۰/۴۴ درصد است. در نمودار میانگین دررفت طبقات سازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با پای ثابت و جداسازی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و آیین‌نامه ASCE در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج تحلیل برای تمامی سازه‌ها نشان دهنده آن است که دررفت میانگین

در این بخش نتایج مربوط به تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌های معرفی شده، ارائه شده است. برای پایش پاسخ سازه‌ها و مقایسه خروجی‌های به دست آمده بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ و آیین‌نامه ASCE از کمیت‌های دررفت طبقات، شتاب طبقات و برش پایه استفاده شده است. اولین پارامتر تقاضای مهندسی برای انجام مقایسه دررفت طبقات است که معادل با تغییر مکان جانبی نسبی طبقات بوده و برای پایش خرابی سازه‌ای اهمیت خواهد داشت. در شکل ۵ نمودار مربوط به تاریخچه میانگین، میانه و صدک‌های ۱۶٪ و ۸۴٪ دررفت سازه ۲۰ طبقه با پای ثابت و جداسازی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و آیین‌نامه ASCE نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، میانگین، میانه و صدک‌های ۱۶٪ و ۸۴٪ دررفت طبقات سازه ۲۰ طبقه جداسازی شده کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به سازه با پای ثابت داشته است. البته بایستی توجه داشت که جابجایی مرکز طبقات سازه جداسازی شده نسبت به سازه با پای ثابت



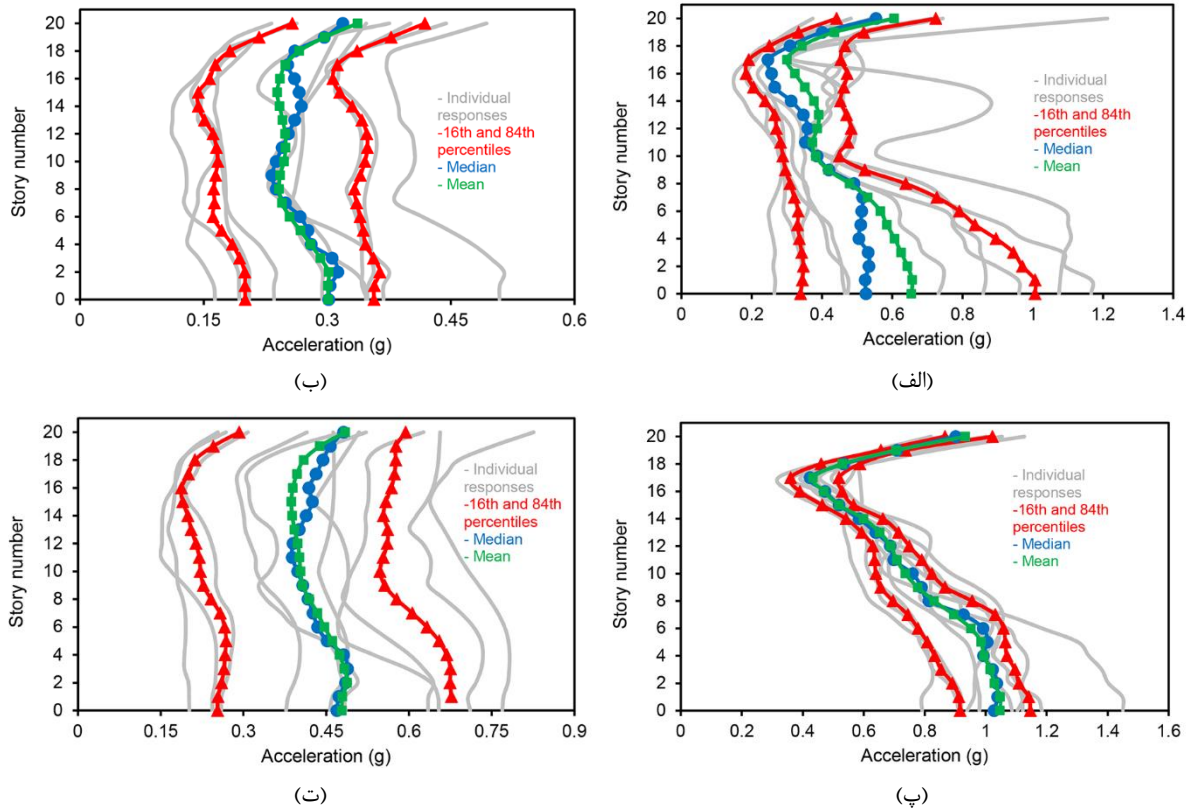
شکل ۶. نمودار میانگین دریفت طبقات به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی بر اساس آیین نامه ASCE و استاندارد ۲۸۰۰ برای سازه‌های با پای ثابت و جداسازی شده (الف) سازه ۱۰ طبقه، (ب) سازه ۱۵ طبقه و (پ) سازه ۲۰ طبقه

Fig. 6. Plot of mean story drift obtained from time history analysis based on ASCE code and 2800 standard for fixed base and isolated structures (a) 10 story, (b) 15 story, and (c) 20 story

می‌شود، میانگین، میانه و صدک‌های ۱۶٪ و ۸۴٪ شتاب طبقات سازه ۲۰ طبقه جداسازی شده کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به سازه با پای ثابت داشته است. به دلیل مشاهده روند مشابه نمودار مربوط به سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه گزارش نشده است. برای سازه ۲۰ طبقه با پای ثابت، مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ شتاب میانگین در طبقه بام حدود  $0.06g$ ، در طبقه میانی حدود  $0.38g$  و در طبقه اول حدود  $0.65g$  است در حالی که مطابق با آیین‌نامه ASCE شتاب میانگین در طبقه بام حدود  $0.93g$ ، در طبقه میانی حدود  $0.74g$  و در طبقه اول حدود  $1.04g$  است. در مقابل برای سازه ۲۰ طبقه جداسازی شده، مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ شتاب میانگین در طبقه بام حدود  $0.33g$ ، در طبقه میانی حدود  $0.24g$  و در طبقه اول حدود  $0.3g$  است در حالی که مطابق با آیین‌نامه ASCE شتاب میانگین در طبقه بام حدود  $0.48g$ ، در طبقه میانی حدود  $0.4g$  و در طبقه اول حدود  $0.47g$  است.

حاصل از آیین‌نامه ASCE حدوداً بیشتر از دو برابر مقدار متناظر بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ است. دلیل اصلی این مسئله اختلاف در نحوه مقیاس کردن رکوردهای زلزله و جهت اعمالی زلزله‌ها در ضوابط دو آیین‌نامه مذکور است که در بخش ۴ توضیحات مربوط به اختلاف ضوابط ارائه شد. در مورد این مسئله لازم به ذکر است که در این نمودار عبارت Fixed متناظر با سازه پای ثابت و LRB متناظر با سازه جداسازی شده است. همچنین نتایج مؤید آن است که دریفت طبقات در سازه‌های جداسازی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ کاهش حدکثر ۴۸ درصدی و بر اساس آیین‌نامه ASCE کاهش حدکثر ۷۱ درصدی نشان داده است.

پارامتر تقاضای مهندسی بعدی برای انجام مقایسه شتاب طبقات است که برای پایش خرابی اعضای غیرسازه‌ای اهمیت خواهد داشت. در شکل ۷ نمودار مربوط به تاریخچه میانگین، میانه و صدک‌های ۱۶٪ و ۸۴٪ شتاب طبقات سازه ۲۰ طبقه با پای ثابت و جداسازی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و آیین‌نامه نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۷ مشاهده



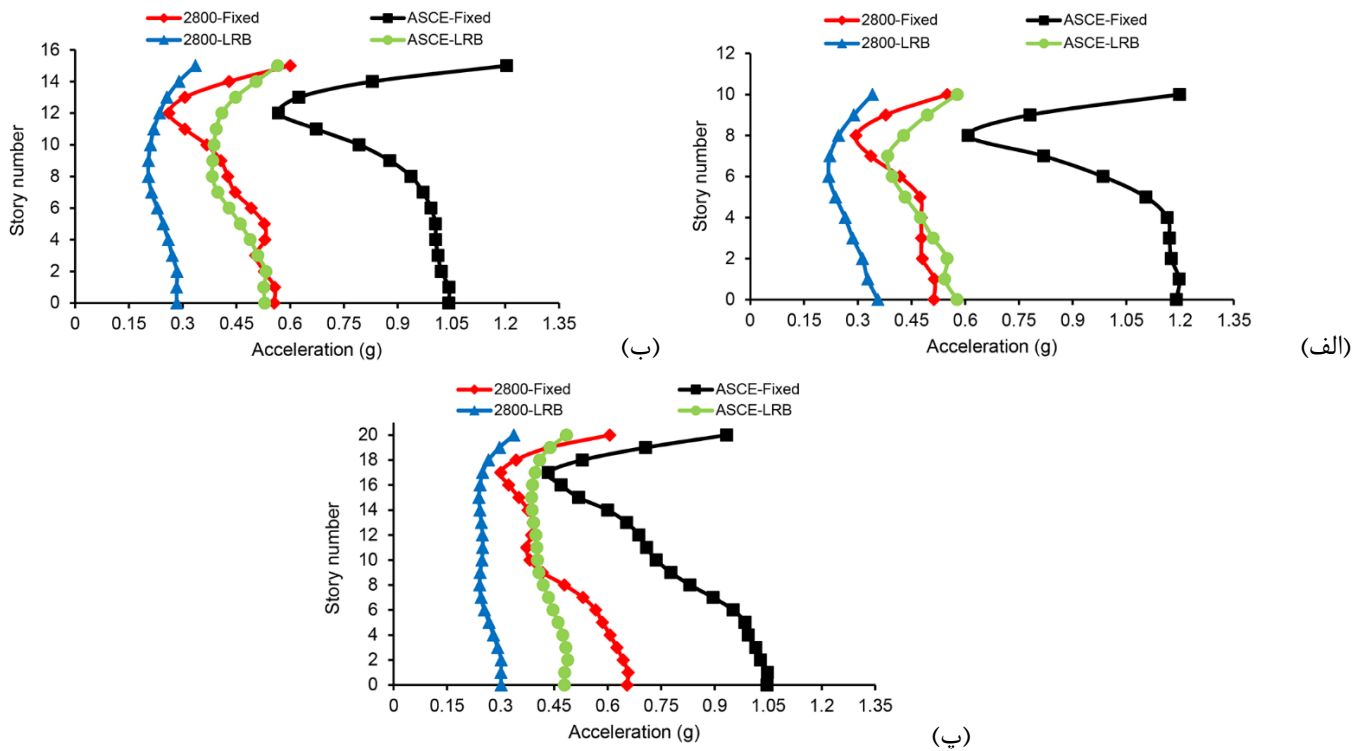
شکل ۷. تاریخچه میانه، میانگین، صدک‌های ۱۶ و ۸۴ درصد شتاب طبقات سازه ۲۰ طبقه (الف) با پای ثابت، (ب) ۲۸۰۰ جداسازی شده، (پ) ASCE با پای ثابت و (ت) ASCE جداسازی شده

Fig. 7. History of median, mean and 16% and 84% percentiles of story acceleration of 20 story structure (a) 2800 fixed base, (b) 2800 isolated, (c) ASCE fixed base, and (d) ASCE isolated

نشان داده شده است. برای سازه ۲۰ طبقه با پای ثابت، مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ برش پایه میانگین حدود ۲۴۶۵۸ کیلونیوتن است در حالی که مطابق با آیین‌نامه ASCE برش پایه میانگین حدود ۴۶۹۵۰ کیلونیوتن است. در مقابل برای سازه ۲۰ طبقه جداسازی شده، مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ برش پایه میانگین ۱۲۴۰۰ کیلونیوتن است در حالی که مطابق با آیین‌نامه ASCE برش پایه میانگین حدود ۱۸۵۱۶ کیلونیوتن است. برای سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود. بنابراین نتایج مؤید کاهش قابل ملاحظه برش پایه در سازه‌های جداسازی شده نسبت به سازه‌های با پای ثابت است. همچنین نتایج دلالت بر آن دارد که برش پایه میانگین در سازه‌های جداسازی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ کاهش حداکثر ۴۹ درصدی و بر اساس آیین‌نامه ASCE کاهش حداکثر ۶۰ درصدی نشان داده است.

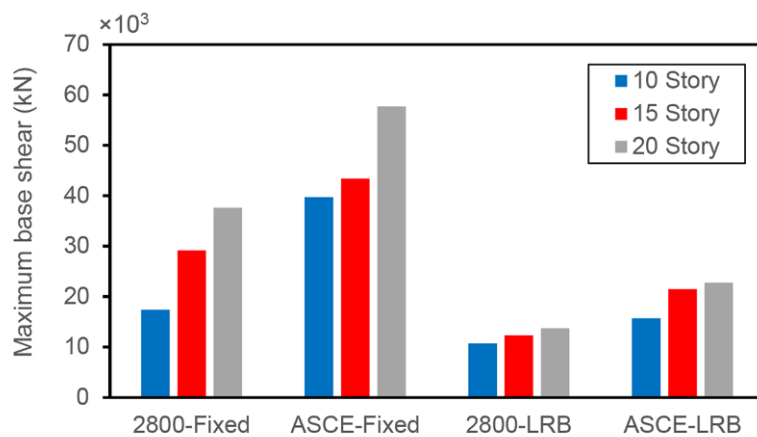
نمودار میانگین شتاب طبقات سازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با پای ثابت و جداسازی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و آیین‌نامه ASCE در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج تحلیل برای تمامی سازه‌ها نشان دهنده آن است که شتاب میانگین حاصل از آیین‌نامه ASCE حدوداً ۵۰ درصد بیشتر از مقدار متناظر بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ است. نتایج دلالت بر آن دارد که شتاب طبقات در سازه‌های جداسازی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ کاهش حداکثر ۴۹ درصدی و بر اساس آیین‌نامه ASCE کاهش حداکثر ۶۰ درصدی نشان داده است.

پارامتر تقاضای مهندسی بعدی برای انجام مقایسه برش پایه است که برای پایش سطح نیروی جانبی وارده بر سازه اهمیت خواهد داشت. در شکل ۹ نمودار مربوط به حداکثر برش پایه سازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با پای ثابت و جداسازی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و آیین‌نامه ASCE



شکل ۸. نمودار میانگین شتاب طبقات به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی بر اساس آیین نامه ASCE و استاندارد ۲۸۰۰ برای سازه‌های با پای ثابت و جداسازی شده (الف) سازه ۱۰ طبقه، (ب) سازه ۱۵ طبقه و (پ) سازه ۲۰ طبقه

Fig. 8. Plot of mean story acceleration obtained from time history analysis based on ASCE code and 2800 standard for fixed base and isolated structures (a) 10 story, (b) 15 story, and (c) 20 story



شکل ۹. نمودار برش پایه بیشینه به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی بر اساس آیین نامه ASCE و استاندارد ۲۸۰۰ برای سازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با پای ثابت و جداسازی شده

Fig. 9. Plot of maximum base shear obtained from time history analysis based on ASCE code and 2800 standard for 10, 15, and 20 story structures with fixed and isolated bases



## ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی دوگانه با پای ثابت و جداسازی شده با جداساز لاستیکی-سربی تحت رکوردهای حوزه نزدیک با روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بر اساس آیین‌نامه‌های ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ و ASCE/SEI 7-16 مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور سه ساختمان بتنی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه که دارای سیستم دوگانه قاب خمشی ویژه همراه با دیوار برشی ویژه بوده و نیز در پلان مشابه و منظم هستند، به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده‌اند. سازه ۲۰ طبقه به عنوان سازه بلند مرتبه محسوب می‌شود. نتایج زیر در این مطالعه حاصل شده است:

۱- مطالعات قبلی نشان داده بود که در سازه‌های بلند با دوره تناوب بزرگ، نه تنها اعمال جداساز منجر به کاهش پاسخ سازه نمی‌شود، بلکه حتی می‌تواند منجر به افزایش پاسخ سازه شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در سازه ۲۰ طبقه مورد بررسی به دلیل استفاده از سیستم دوگانه و افزایش سختی سیستم به دلیل استفاده از دیوار برشی و در نتیجه کاهش دوره تناوب، پاسخ سازه جداسازی شده شامل میانگین، میانه و صدک‌های ۱۶٪ و ۸۴٪ دررفت و شتاب طبقات و همچنین میانگین و بیشینه برش پایه کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به سازه با پای ثابت داشته است.

۲- به دلیل تفاوت در ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ و آیین‌نامه ASCE در مقیاس کردن رکوردهای زلزله مورد استفاده در تحلیل تاریخچه زمانی، پاسخ سازه‌های مورد تحلیل بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ نسبت به آیین‌نامه ASCE به صورت قابل ملاحظه‌ای دست پایین تر بوده و میزان کاهش پاسخ سازه در صورت جداسازی سازه نیز بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ کمتر است.

۳- نتایج نشان می‌دهد که دررفت میانگین حاصل از آیین‌نامه ASCE در سازه‌های با پای ثابت و جداسازی شده حدوداً بیشتر از دو برابر مقدار متناظر بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ است.

۴- نتایج دلالت بر آن دارد که دررفت میانگین طبقات در سازه‌های جداسازی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ کاهش حداکثر ۴۸ درصدی و بر اساس آیین‌نامه ASCE کاهش حداکثر ۷۱ درصدی نسبت به سازه‌های با پای ثابت نشان داده است.

۵- به دلیل ماهیت مختلف رکوردها (از نظر شبه پالس بودن، جهت‌پذیری و ...)، تأثیر رکوردهای زلزله بر روی طبقات مختلف سازه جداسازی شده

متفاوت بوده و توزیع غیریکنواخت برای دررفت سازه در طبقات به دست آمده است. با توجه به اینکه علاوه بر ماهیت رکورد زلزله پارامترهای دیگری مانند مقاومت روسازه، زمان تناوب سازه اصلی و جداساز و همچنین زمان تناوب غالب رکوردهای زلزله می‌توانند روی توزیع غیریکنواخت دررفت در طبقات سازه جداسازی شده تأثیرگذار باشند، لذا بررسی دقیق این مسئله نیازمند تحقیقات بیشتری در آینده با ملاحظه پارامترهای اشاره شده است.

۶- نتایج نشان می‌دهد که شتاب میانگین حاصل از آیین‌نامه ASCE در سازه‌های با پای ثابت و جداسازی شده حدوداً ۵۰ درصد بیشتر از مقدار متناظر بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ است.

۷- نتایج دلالت بر آن دارد که شتاب میانگین طبقات در سازه‌های جداسازی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ کاهش حداکثر ۴۹ درصدی و بر اساس آیین‌نامه ASCE کاهش حداکثر ۶۰ درصدی نسبت به سازه‌های با پای ثابت نشان داده است.

۸- با توجه به تفاوت ناچیز مابین میانگین و میانه پاسخ دررفت و شتاب سازه‌های جداسازی شده، می‌توان از توزیع نرمال برای تحلیل احتمالاتی پاسخ این سازه‌ها و در ادامه توسعه منحنی شکنندگی آن‌ها استفاده کرد که در تحقیقات آینده می‌تواند مدنظر قرار گرفته شود.

۹- نتایج نشان می‌دهد که برش پایه میانگین حاصل از آیین‌نامه ASCE در سازه‌های با پای ثابت حدوداً بیشتر از دو برابر مقدار متناظر بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و در سازه‌های جداسازی شده حدوداً ۶۰ درصد بیشتر است.

۱۰- نتایج نشان دهنده کاهش قابل ملاحظه برش پایه در سازه‌های جداسازی شده نسبت به سازه‌های با پای ثابت است به گونه‌ای که برش پایه میانگین در سازه‌های جداسازی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ کاهش حداکثر ۴۹ درصدی و بر اساس آیین‌نامه ASCE کاهش حداکثر ۶۰ درصدی نشان داده است.

۱۱- نحوه مقیاس کردن رکوردهای زلزله و همچنین نحوه اعمال آن‌ها به سازه‌های جداسازی شده از منابع اصلی ایجاد اختلاف در پاسخ این سازه‌ها بر اساس ضوابط آیین‌نامه ASCE و استاندارد ۲۸۰۰ هستند.

۱۲- نتایج این تحقیق می‌تواند به منظور توسعه ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ در راستای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های جداسازی شده بتن‌آرمه با سیستم مقاوم جانبی دوگانه مورد استفاده قرار گیرد.

## ۷- فهرست علائم

مقدار موردنیاز برای محاسبه نیروی برشی طرح در سازه جداساز	$V_{b2}$	مساحت جداساز	$A$
نیروی برشی طرح در سازه جداسازی شده	$V_s$	مقدار مورد نیاز برای محاسبه مساحت جداساز	$A_1$
وزن کل سازه	$W_T$	مقدار موردنیاز برای محاسبه مساحت جداساز	$A_2$
مقدار موردنیاز برای محاسبه مساحت $A_3$	$\beta$	مقدار مورد نیاز برای محاسبه مساحت جداساز	$A_3$
حداکثر کرنش برشی جداساز ناشی از فشار	$\gamma_c$	سطح مقطع کاهش یافته جداساز	$A_{re}$
حداکثر کرنش برشی جداساز ناشی از بار جانبی	$\gamma_{eq}$	حداقل سطح مقطع کاهش یافته برای احتراز از گسیختگی	$A_{sf}$
کرنش برشی بیشینه جداساز	$\gamma_{max}$	برشی	$b$
حداکثر کرنش برشی جداساز ناشی از پیچش	$\gamma_t$	بعد سازه	$B_D$
حداکثر کرنش کششی در زمان گسیختگی	$\epsilon_b$	ضریب عددی برای میرایی مؤثر سیستم جداساز در جابجایی	$c_{eff}$
میرایی معادل مؤثر جداساز	$\xi_{eff}$	بیشینه طراحی	$d$
تنش مجاز بر روی جداساز	$\sigma_c$	ضریب میرایی معادل مؤثر جداساز	$d_D$
مجموع سختی مؤثر تمامی جداسازها	$\Sigma k_{eff}$	قطر تکیه‌گاه	$D_m$
		تغییر مکان طرح جداساز	$d_y$
		تغییر مکان بیشینه جداساز	$e$
		تغییر مکان در لحظه تسلیم جداساز	$E$
		خروج از مرکزیت حقیقی سازه در تراز جداسازی به اضافه ۵٪ به سازه عمود بر راستای زلزله	$E_c$
		مدول یانگ	$f_{py}$
		مدول فشاری بتن	$f_y$
		تنش تسلیم سرب	$F_y$
		مقاومت جاری شدن فولاد	$G$
		مقاومت تسلیم جداساز	$k$
		مدول برشی	$k_e$
		ضریب اصلاحی	$k_{eff}$
		سختی اولیه جداساز	$k_p$
		سختی مؤثر جداساز	$k_r$
		سختی ثانویه پس از تسلیم جداساز	$l$
		سختی ارتجاعی تکیه‌گاه	$N$
		بعد سازه	$P_{DL+LL}$
		تعداد لایه‌های لاستیکی	$P_{DL+LL+EQ}$
		بار قائم بر روی جداساز	$S_{MI}$
		بار قائم بر روی جداساز با ملاحظه اثر نیروی زلزله	$t$
		شتاب طیفی با ۵٪ میرایی متناظر با زلزله بیشینه	$T_D$
		ضخامت ورق‌های فوقانی و تحتانی	$T_{DP}$
		دوره تناوب طبیعی هدف سازه جداسازی شده	$t_r$
		دوره تناوب سازه اصلی	$t_s$
		ضخامت یک لایه لاستیک	$t_t$
		ضخامت ورق فولادی	$V_{b1}$
		ضخامت کل جداساز	
		مقدار موردنیاز برای محاسبه نیروی برشی طرح در سازه جداساز	

## منابع

- [1] F. Naeim, and J.M. Kelly, Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice, John Wiley & Sons: New York, NY, USA, (1999).
- [2] Guideline for Design and Practice of Base Isolation Systems in Buildings, No. 523, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, Islamic Republic of Iran, (2010) (in Persian).
- [3] S. Okamoto, N. Kani, M. Higashino, N. Koshika, M. Kimizuka, M. Midorikawa and M. Iiba, Recent Developments in Seismically Isolated Buildings in Japan, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1(2) (2002) 213-225.
- [4] R.G. Tyler, and W.H. Robinson, High-strain tests on lead-rubber bearings for earthquake loadings, Bulletin of New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 17(2) (1984) 90-105.
- [5] M.A. Erdik, and C. Yenidogan, Comparative evaluation of design provisions for seismically isolated buildings, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 90 (2016) 265-286.
- [6] A.B.M. Saifal, R.R. Husain, M. Jameel, and M.Z. Jumaat, Non-linear time domain analysis of base isolated multi-storey building under site specific bi-directional seismic loading, Automation in Construction, 22 (2012) 554-566.
- [7] M.R. Reddy, N. Srujana, and N. Lingeshwaran, Effect

- pounding-involved response of base-isolated buildings incorporating soil flexibility, *Advances in Structural Engineering*, 16(12) (2013) 2043-2062.
- [18] S. Chimamphant, and K. Kasai, Comparative response and performance of base-isolated and fixed-base Structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 45(1) (2016) 5-27.
- [19] V. Calugaru, and M. Panagiotou, Seismic response of 20-story base-isolated and fixed-base reinforced concrete structural wall buildings at a near-fault site, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(6) (2014) 927-948.
- [20] S. Bhagat, and A.C. Wijeyewickrema, Seismic response evaluation of base-isolated reinforced concrete buildings under bidirectional excitation, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 16(2) (2017) 365-382.
- [21] N. Güneş, and Z.Ç., Ulucan, Nonlinear dynamic response of a tall building to near-fault pulse-like ground motions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(6) (2019) 2989-3013.
- [22] H. Anajafi, K. Poursadr, M. Roohi, and E. Santini-Bell, Effectiveness of seismic isolation for long-period structures subject to far-field and near-field excitations, *Frontiers in Built Environment* (2020) <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.00024>
- [23] ASCE/SEI 7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineering, Washington, D. C, USA, (2016).
- [24] NZSEE, Guideline for the Design of Seismic Isolation Systems for Buildings, New Zealand Society for Earthquake Engineering, (2019).
- [25] P. Pan, D.A.N. Zamfirescu, M. Nakashima, N. Nakayasu, and H. Kashiwa, Base-isolation design practice in Japan: introduction to the post-Kobe approach, *Journal of Earthquake Engineering*, 9(01) (2005) 147-171.
- [26] H.N. Li, and X.X. Wu, Limitations of height-to-width ratio for base-isolated buildings under earthquake, *The structural design of tall and special buildings*, 15(3) (2006) 277-287.
- of base isolation in multistoried reinforced concrete building, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(3) (2017) 878-887.
- [8] D. Cancellara, and F. De Angelis, Assessment and dynamic nonlinear analysis of different base isolation systems for a multi-storey RC building irregular in plan, *Computers and Structures*, 180 (2016) 74-88.
- [9] R.S. Jangid, and J.M. Kelly, Base isolation for near-fault motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(5) (2001) 691-707.
- [10] J.F. Hall, T.H. Heaton, M.W. Halling, and D.J. Wald, Near-source ground motion and its effects on flexible buildings, *Earthquake Spectra*, 11(4) (1995) 569-605.
- [11] R.S. Jangid, Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions, *Engineering Structures*, 29(10) (2007) 2503-2513.
- [12] D.R. Pant, and A.C. Wijeyewickrema, Performance of base-isolated reinforced concrete buildings under bidirectional seismic excitation considering pounding with retaining walls including friction effects, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(10) (2014) 1521-1541.
- [13] S. Haseli, and M. Poursha, Investigation of the seismic responses of base isolated buildings under the influence of near field ground motions, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(3) (2018) 579-596 (in Persian).
- [14] M. Bhandari, S.D. Bharti, M.K. Shrimali, and T.K. Datta, The numerical study of base-isolated buildings under near-field and far-field earthquakes, *Journal of Earthquake Engineering*, 22(6) (2018) 989-1007.
- [15] C.P. Providakis, Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations, *Engineering structures*, 30(5) (2008) 1187-1198.
- [16] F. Mazza, and A. Vulcano, Effects of near-fault ground motions on the nonlinear dynamic response of base-isolated rc framed buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41(2) (2012) 211-232.
- [17] S. Mahmoud, and S. Gutub, Earthquake induced

- Washington, D. C, USA, (2014).
- [37] ASCE/SEI 41-17, Seismic evaluation and retrofit of existing buildings, American Society of Civil Engineering, Washington, D. C, USA, (2017).
- [38] D. Darwin, and D.A. Pecknold, Inelastic model for cyclic biaxial loading of reinforced concrete, University of Illinois Engineering Experiment Station, College of Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, (1974).
- [39] L. Xu, Y. Lin, and Y. Wu, Seismic response analysis of a first-story isolated reinforced concrete frame building with independent columns, *Advances in Structural Engineering*, 23(14) (2020) 3140-3152.
- [40] M. Kikuchi, Y. Kitamura, S. Hayashi, Y. Kawashima, T. Sakaguchi, and C. Yamada, Mechanical characteristics of elastomeric seismic isolation bearings under tension, *Journal of Structural and Construction Engineering (Japan)*, 524 (1999) 57-64.
- [41] S. Yaghmaei-Sabegh, S. Safari, and K.A. Ghayouri, Estimation of inelastic displacement ratio for base-isolated structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47(3) (2018) 634-659.
- [42] S.K. Shahi, and J.W. Baker, An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5) (2014) 2456-2466.
- [43] Y. Cheng, and G.L. Bai, Basic characteristic parameters and influencing factors of long-period ground motion records, *Journal of Vibroengineering*, 19(7) (2017) 5191-5207.
- [44] J.W. Baker, C.B. Haselton, N. Luco, J.P. Stewart, and R.B. Zimmerman, Updated ground motion spectral matching requirements in the 2015 NEHRP recommended seismic provisions, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Christchurch, New Zealand, (2015).
- [45] UFC 3-310-01, Structural Load Data, Unified Facilities Criteria, Department of Defense, USA, (2005).
- [27] T. Komuro, Y. Nishikawa, Y. Kimura, and Y. Isshiki, Development and realization of base isolation system for high-rise buildings, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3(2) (2005) 233-239.
- [28] R. Lagos, R. Boroschek, R. Retamales, M. Lafontaine, K. Friskel, and A. Kasalanati, Seismic isolation of the Nunoa Capital Building, the tallest base isolated building in the Americas, In *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, (2017).
- [29] P.M. Osgooei, M.J. Tait, and D. Konstantinidis, Seismic isolation of a shear wall structure using rectangular fiber-reinforced elastomeric isolators, *Journal of Structural Engineering*, 142(2) (2016) 04015116.
- [30] W. Wang, A. Li, and X. Wang, Seismic performance of base-isolated precast concrete shear wall structure with AHW connections, *Shock and Vibration*, (2018) <https://doi.org/10.1155/2018/963252>
- [31] N. Suwal, P. Warnitchai, and F. Nazam, Seismic base isolation of high-rise RC shear wall building using lead core rubber bearings, *NZSEE 2020 Annual Conference*, New Zealand, (2020).
- [32] S. Bhagat, A.C. Wijeyewickrema, and N. Subedi, Influence of near-fault ground motions with fling-step and forward-directivity characteristics on seismic response of base-isolated buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, 25(3) (2021) 455-474.
- [33] F. Mazza, M. Mazza, and A. Vulcano, Base-isolation systems for the seismic retrofitting of r.c. framed buildings with soft-storey subjected to near-fault earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 109 (2018) 209-221.
- [34] BHRC, Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Tehran: Building and Housing Research Centre, Standard No. 2800, (2014) (in Persian).
- [35] INBC, Design Loads for Buildings. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 6, (2013) (in Persian).
- [36] ACI 318-14, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute,

جدول پ-۱. مشخصات مقاطع سازه ۱۰ طبقه (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

Table P1. Section characteristics of 10 story structure (dimensions in mm)

طبقه	ستون	تیر	دیوار برشی
۱	C450x450-12Φ25	B450x350	W250- Φ20@200
۲	C450x450-12Φ25	B450x350	W250- Φ20@200
۳	C450x450-12Φ25	B450x350	W250- Φ20@200
۴	C450x450-12Φ25	B450x350	W250- Φ20@200
۵	C400x400-8Φ20	B400x300	W250- Φ20@200
۶	C400x400-8Φ20	B400x300	W200- Φ20@200
۷	C400x400-8Φ20	B400x300	W200- Φ20@200
۸	C400x400-8Φ20	B400x300	W200- Φ20@200
۹	C350x350-8Φ18	B350x300	W200- Φ20@200
۱۰	C350x350-8Φ18	B350x300	W200- Φ20@200

جدول پ-۲. مشخصات مقاطع سازه ۱۵ طبقه (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

Table P2. Section characteristics of 15 story structure (dimensions in mm)

طبقه	ستون	تیر	دیوار برشی
۱	C550x550-12Φ25	B500x400	W350- Φ20@180
۲	C550x550-12Φ25	B500x400	W300- Φ20@180
۳	C500x500-12Φ25	B500x400	W300- Φ20@180
۴	C500x500-12Φ25	B500x400	W300- Φ20@180
۵	C500x500-12Φ25	B500x400	W300- Φ20@180
۶	C450x450-12Φ22	B450x350	W250- Φ20@180
۷	C450x450-12Φ22	B450x350	W250- Φ20@180
۸	C450x450-12Φ22	B450x350	W250- Φ20@180
۹	C450x450-12Φ22	B450x350	W250- Φ20@180
۱۰	C450x450-12Φ22	B450x350	W250- Φ20@200
۱۱	C350x350-8Φ22	B350x300	W200- Φ20@180
۱۲	C350x350-8Φ22	B350x300	W200- Φ20@180
۱۳	C350x350-8Φ22	B350x300	W200- Φ20@180
۱۴	C350x350-8Φ22	B350x300	W200- Φ20@200
۱۵	C350x350-8Φ22	B350x300	W200- Φ20@180

جدول پ-۳. مشخصات مقاطع سازه ۲۰ طبقه (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

Table P3. Section characteristics of 20 story structure (dimensions in mm)

دیوار برشی	تیر	ستون	طبقه
W400- Φ20@200	B600x500	C650x650-16Φ32	۱
W350- Φ20@200	B600x500	C650x650-16Φ32	۲
W350- Φ20@200	B600x500	C650x650-16Φ32	۳
W350- Φ20@200	B600x500	C650x650-16Φ32	۴
W350- Φ20@200	B550x500	C600x600-16Φ25	۵
W300- Φ20@200	B550x500	C600x600-16Φ25	۶
W300- Φ20@200	B550x500	C600x600-16Φ25	۷
W300- Φ20@200	B550x500	C550x550-16Φ25	۸
W300- Φ20@200	B550x500	C550x550-16Φ25	۹
W300- Φ20@200	B550x500	C550x550-16Φ25	۱۰
W250- Φ20@200	B500x450	C500x500-12Φ25	۱۱
W250- Φ20@200	B500x450	C500x500-12Φ25	۱۲
W250- Φ20@200	B500x450	C500x500-12Φ25	۱۳
W250- Φ20@200	B500x450	C500x500-12Φ25	۱۴
W250- Φ20@200	B500x450	C500x500-12Φ25	۱۵
W200- Φ20@200	B450x400	C450x450-12Φ20	۱۶
W200- Φ20@200	B450x400	C450x450-12Φ20	۱۷
W200- Φ20@200	B450x400	C450x450-12Φ20	۱۸
W200- Φ20@200	B400x350	C450x450-12Φ20	۱۹
W200- Φ20@200	B400x350	C450x450-12Φ20	۲۰

جدول پ-۴. مشخصات جداسازهای لرزه‌ای برای ستون‌ها

Table P4. Characteristics of base isolators for columns

$k_1$ (kN/m)	$c_{eff}$ (kN.s/m)	$Q_D$ (kN)	$k_{eff}$ (kN/m)	$d_p$ (mm)	$h$ (mm)	$d$ (mm)	سازه
۵۱۳۰	۲۱۸/۹	۱۵۰/۳۰	۹۱۷	۱۳۵	۴۰۰	۵۵۰	۱۰ طبقه
۴۷۷۰	۲۵۰/۷	۱۶۱/۶۲	۷۸۷/۷	۱۴۰	۵۴۰	۶۵۰	۱۵ طبقه
۴۲۲۵	۲۸۱/۷	۱۸۵/۵۵	۷۰۸	۱۵۰	۷۱۰	۷۵۰	۲۰ طبقه

جدول پ-۵. مشخصات جداسازهای لرزه‌ای برای دیوارهای برشی

Table P5. Characteristics of base isolators for shear walls

$k_1$ (kN/m)	$c_{eff}$ (kN.s/m)	$Q_D$ (kN)	$k_{eff}$ (kN/m)	$d_p$ (mm)	$h$ (mm)	$d$ (mm)	سازه
۱۴۳۰	۶۱/۹	۴۰/۴۱	۲۵۹	۷۰	۳۹۰	۳۵۰	۱۰ طبقه
۱۱۸۵	۷۰	۴۶/۳۹	۲۲۰	۷۵	۵۳۰	۴۰۰	۱۵ طبقه
۱۰۶۸	۷۴/۷	۵۲/۷۸	۱۸۸	۸۰	۶۸۰	۴۵۰	۲۰ طبقه

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Seify Asghshahr, S. Rafiei, Seismic Response of Base-isolated Dual-system Reinforced Concrete Buildings at a Near-fault Site, Amirkabir J. Civil Eng., 54(4) (2022) 1607-1630.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19781.7257



