

نوع مقاله: یادداشت پژوهشی

چکیده

هدف این پژوهش مطالعه تحلیلی سیستم جداسازی کف طبقات به‌عنوان یکی از روش‌های کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌هاست. بدین‌منظور با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی رفتار یک ساختمان فلزی ده طبقه جداسازی شده با این روش مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق از هفت زوج شتاب‌نگاشت زلزله‌های دور از گسل استفاده به عمل آمده و رفتار نمونه‌هایی از سازه‌های جداسازی شده با سازه‌ای مشابه بدون سیستم جداسازی از کف مقایسه گردیده است. مدل‌های به کار گرفته شده شامل سازه‌های جداسازی شده با و بدون متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی در لایه ایزولاتور است. متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی در جداسازی کف در محل تلاقی کف طبقات با ستون‌ها به‌منظور جلوگیری از برخورد شدید کف به ستون در هنگام زلزله‌های شدید جانمایی شده است. نتایج تحلیل‌های انجام پذیرفته در کل مبین نقش مؤثر جداسازی لرزه‌ای در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها است. سازه‌های طراحی شده به این شیوه دارای عملکرد لرزه‌ای بالاتر از سازه‌های مشابه بدون سیستم جداساز بوده‌اند. به‌عنوان مثال در مواردی تغییر مکان متوسط طبقه آخر تا حدود ۶۰ درصد و تغییر مکان نسبی طبقات تا محدوده ۵۰ درصد کاهش وجود داشته است. همچنین شتاب سازه و خصوصاً کف طبقات تا میزان بالایی کاهش داشته است. بر اساس این نتایج می‌توان با حفظ عملکرد سازه به کاهش حدود ۱۸ درصد در مصرف فولاد همراه با سطح عملکرد بالاتر در زمینه شتاب کف دست یافت. در این تحقیق همچنین نشان داده شد که با استفاده از متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی می‌توان جابه‌جایی نسبی کف به سازه را تا محدوده ۳۳ درصد در هنگام وقوع زمین‌لرزه‌ی شدید کاهش داد. البته این امر سبب افزایش تغییر مکان نسبی و شتاب طبقات، متناسب با نوع متوقف‌کننده تغییر مکانی به کار رفته خواهد شد.

واژگان کلیدی: جداسازی کف طبقات، جداسازی جرمی، متوقف‌کننده‌ی تغییر مکانی، جداسازی لرزه‌ای، تحلیل تاریخچه‌ی زمانی.

بررسی کاربرد جداگرهای لرزه‌ای در طبقات و تأثیر متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی بر عملکرد سازه در زلزله‌های شدید

محمدعلی فرازنده

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

منصور ضیائی‌فر (نویسنده مسئول)

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، mansour@iiees.ac.ir

۱- مقدمه

لرزه‌ای که بر اساس استفاده از مقاومت و شکل‌پذیری در اعضای سازه بنیان نهاده شده‌اند در عمل سبب ایجاد تغییر شکل‌های ماندگار بزرگ و خسارات متعاقب آن پس از زمین‌لرزه می‌گردند. در روش‌های جدید طراحی لرزه‌ای با محدود ساختن رفتار شکل‌پذیر در سازه و افزایش انعطاف‌پذیری و جذب انرژی ورودی زمین‌لرزه این خسارات کاهش یافته است [۱]. با این وجود روش‌های گفته شده تاکنون مقبولیت زیادی نداشته‌اند. از دلایل

با توجه به سطح بالای خسارات جانی و مالی وارده به کشور در زلزله‌های اخیر و با توجه به اهمیت زیاد کاهش این خسارات مشخص شده است که روش‌های متداول طراحی لرزه‌ای سازه‌ها در این زمینه در برخی از کاربری‌های مهم از مطلوبیت مناسب برخوردار نیستند. روش‌های جدیدتر طراحی لرزه‌ای اغلب با افزایش انعطاف‌پذیری و اتلاف انرژی در سازه‌ها می‌توانند به عملکردهای لرزه‌ای بالاتری دست یابند. روش‌های سنتی طراحی

طبقات و اسکلت ساختمان اتلاف کننده‌های انرژی جهت کاستن از دامنه حرکت نسبی دو زیر سازه و افزایش ظرفیت میرایی سیستم به کار گرفته می‌شود [۱۲].

پژوهش حاضر به بررسی کاربرد جداگرهای لرزه‌ای در طبقات و تأثیر متوقف کننده‌های تغییر مکانی بر عملکرد این گونه سازه‌ها در زلزله‌های شدید می‌پردازد. بدین منظور از روش تحلیل عددی تاریخچه زمانی برای بررسی رفتار این سازه‌ها استفاده به عمل آمده است. این تحلیل‌ها شامل بررسی چگونگی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مجهز به سیستم جداسازی شده‌ی کف طبقات و همچنین اثر متوقف کننده‌های تغییر مکانی در محدودسازی دامنه حرکت نسبی اسکلت ساختمان و کف طبقات و همچنین تأثیر آن بر روی تغییر مکان‌ها و نیروهای وارده به سازه و همچنین افزایش شتاب در کف طبقات و اسکلت سازه جداسازی شده می‌باشد.

۲- بررسی تحلیلی جداسازی کف طبقات در سازه

در تحقیق حاضر مدلی از یک ساختمان ده طبقه فلزی متقارن با سیستم قاب خمشی مورد بررسی قرار گرفته است. این سازه با فرض صلیب درون صفحه‌ای برای کف طبقات و همچنین وجود رفتار خطی در سازه جداسازی شده مدلسازی و مورد تحلیل تحت اثر زمین لرزه‌های مقیاس شده قرار گرفته است. تحلیل سازه در هنگام عدم وجود متوقف کننده‌های تغییر مکانی با روش تاریخچه زمانی خطی و در هنگام استفاده از متوقف کننده‌های تغییر مکانی با استفاده از روش غیرخطی تاریخچه زمانی صورت پذیرفته است. این سازه در شکل (۱) نشان داده شده است.

سازه اولیه مورد مطالعه سازه‌ای فلزی ده طبقه با سیستم قاب خمشی و فاقد جداگرهای لرزه‌ای است. ابعاد پلان سازه ۱۸ متر با سه دهانه مساوی ۶ متری در هر دو جهت و ارتفاع تمامی طبقات ۳/۵ متر است. این سازه در مرحله بعد با استفاده از جداسازی کف طبقه از اسکلت ساختمان مدلسازی شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. در سومین مدل مورد مطالعه در این تحقیق یک سازه‌ی سبک‌تر با جداسازی کف طبقات مورد تحلیل قرار گرفته که در آن میزان فولاد مصرفی به کار رفته ۱۸ درصد کاهش یافته است.

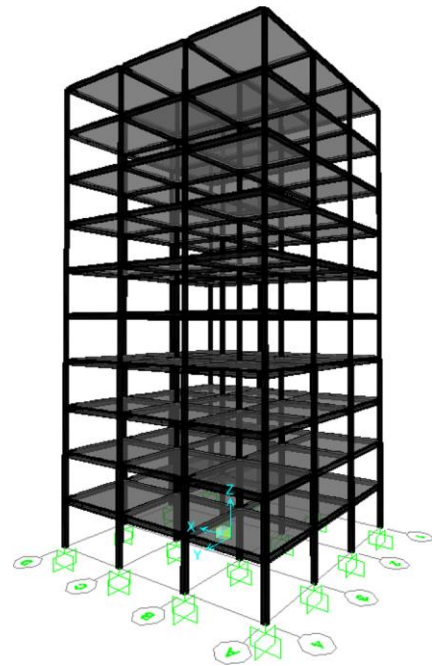
نداشته‌اند. از دلایل این مسئله می‌توان به هزینه‌های بالاتر ساخت این سازه‌ها نسبت به سازه‌های طراحی شده با روش‌های متداول و همچنین عدم آشنایی کارفرمایان و مهندسین با این روش‌های طراحی اشاره کرد [۲].

در روش‌های جدید، افزایش انعطاف‌پذیری سازه همراه با ایجاد پتانسیل اتلاف انرژی در سازه به صورت مختلف صورت پذیرفته است. جداسازی پایه از روش‌های متداول و مؤثر در این ارتباط تلقی می‌گردد [۳]. جداسازی قسمتی از جرم سازه نیز از دیگر روش‌های مطرح شده در این خصوص است [۴]. همچنین مطرح شدن مفهوم جداسازی جرمی^۱ به روشن سازی فلسفه طراحی سازه‌های انعطاف‌پذیر و چگونگی ایجاد ظرفیت بالای اتلاف انرژی در آنها کمک شایانی نموده است [۵-۶]. روش‌های متفاوتی برای افزایش انعطاف‌پذیری و جذب انرژی در سازه‌ها پیشنهاد شده است [۷]. جداسازی کف طبقات ساختمان از سازه‌ی اصلی برای سازه‌های کوتاه تا بلندمرتبه یکی از این روش‌هاست که می‌تواند کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف مانند سازه‌های صنعتی، اتاق‌های حساس به ارتعاش و یا ساختمان‌های اداری و مسکونی داشته باشد [۸-۱۰].

هدف از این نوع جداسازی لرزه‌ای تنها کنترل پاسخ کف طبقه و تجهیزات روی آن نیست بلکه این روش سبب کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه اصلی نیز می‌شود. از آنجایی که قسمت عمده جرم ساختمان‌ها در کف طبقات متمرکز است با جداسازی کف طبقات از اسکلت ساختمانی می‌توان پاسخ لرزه‌ای سازه را کاهش داد [۱۱]. از این رو جداسازی کف طبقات نوعی از جداسازی جرمی است که جرم را در محل تمرکز آن جداسازی می‌کند و از این رو به آن جداسازی محلی^۲ نیز گفته شده است. در این روش جرم اصلی ساختمان که کف طبقات را تشکیل می‌دهد توسط جداسازهای انعطاف‌پذیر به اسکلت اصلی ساختمان متصل می‌شود و بدین ترتیب زیر سازه جرمی^۳ را با دوره تناوب بلند تشکیل می‌دهد. اسکلت ساختمان که عموماً جرم کم و سختی بالایی دارد دارای دوره تناوب کوتاه بوده و زیر سازه سختی^۴ نام گذاری شده است. در این روش مابین کف

۲-۱- مشخصه‌های عمومی سازه‌های مورد بررسی

در این تحقیق مطالعات بر روی ساختمانی ده طبقه واقع در تهران واقع بر خاک تپ ۲ صورت پذیرفته است. بار مرده این سازه ۶۰۰۰ نیوتن بر مترمربع و بار زنده آن ۲۰۰۰ نیوتن بر مترمربع بوده و دیوار پیرامونی آن دارای وزن ۷۰۰۰ نیوتن بر متر بوده است. پوشش سقف‌ها از نوع دال دو طرفه انتخاب شده است. در این تحقیق رفتار اعضای سازه‌ای خطی فرض شده‌اند و مقاطع سازه‌ای به کار رفته به گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا در سطح خطر طراحی متداول آئین‌نامه‌ها عملکرد بالایی برای سازه فراهم سازند. دوره تناوب سه مود اول سازه‌ها بر اساس تحلیل مقادیر مشخصه هر مدل به صورت جداگانه حاصل شده و در جدول (۱) ارائه شده‌اند. با توجه به تقارن هندسی در هر سه مدل، دوره تناوب مودهای حرکتی در جهت‌های x و y با هم برابر می‌باشد.



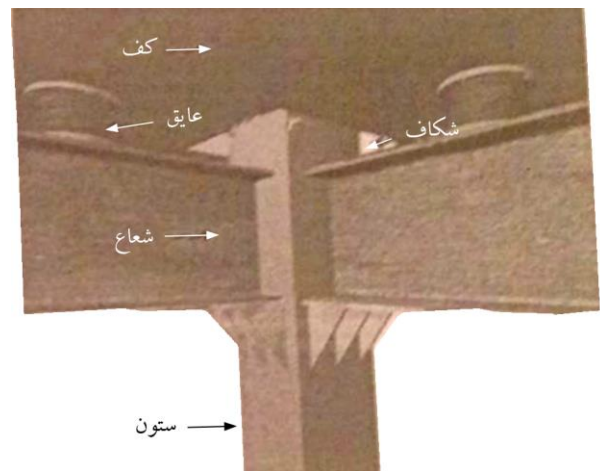
شکل (۱): سازه ده طبقه فلزی با جداسازی کف طبقات.

جدول (۱): دوره تناوب مدل‌های سازه‌ای.

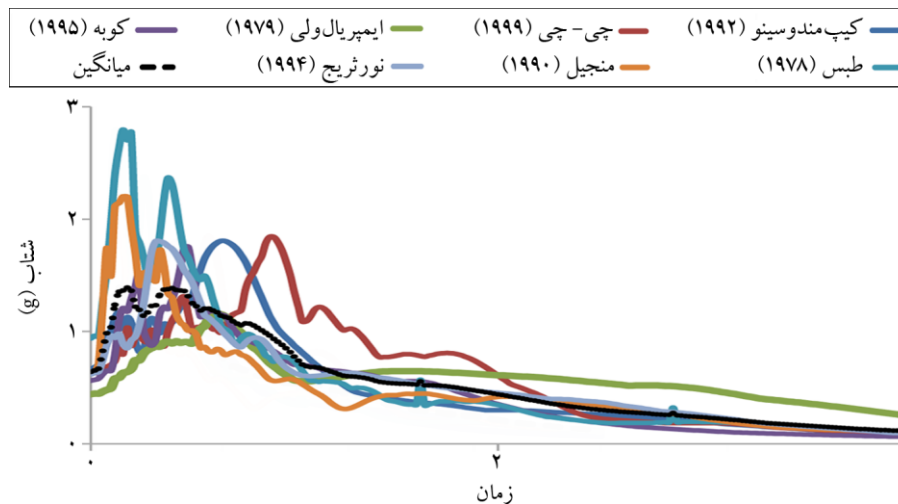
مود سوم (ثانیه)	مود دوم (ثانیه)	مود اول (ثانیه)	
۰/۲۵	۱/۱۶ (پیچشی)	۱/۹	سازه اولیه
۳/۲	۳/۲	۳/۳۱	سازه اولیه جداسازی شده
۳/۵۶	۳/۶۵	۳/۹۶	سازه سبک جداسازی شده

همان‌گونه که در جدول (۱) نشان داده شده است دوره تناوب‌های حاصله در سازه‌های جداسازی شده در هر سه مود به صورت حرکت مجزای کف طبقات با دوره‌های تناوب تقریباً همسان بوده است. در سازه‌های جداسازی شده هر جداگر به صورت یک عنصر الاستیک خطی با سختی معادل با $K = 40$ نیوتن بر میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین برای هر جداگر ثابت میرایی برابر با $C = 25$ نیوتن در ثانیه بر میلی‌متر برای کنترل تغییر مکان نسبی کف با اسکلت و کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه مورد استفاده قرار گرفته است. میرایی انتخاب شده در این تحقیق از نوع ویسکوز خطی است. البته در این روش می‌توان از انواع مختلف میرایی‌های ویسکو الاستیک، لغزشی-

مدل سوم بدین جهت معرفی گردیده تا حتی المقدور از افزایش عملکرد لرزه‌ای سازه در تغییر مکان نسبی بین طبقات به دلیل استفاده از جداسازی کف طبقات کاسته شود و سطح عملکردی آن مشابه با سازه اولیه گردد. در این حالت امکان بررسی تأثیر جداسازی کف طبقات در کاهش هزینه‌های ساخت سازه فراهم خواهد شد. سختی جداگرهای کف طبقات در این مدل‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا دوره تناوب طبقات جداسازی شده با توجه به جرم آنها در محدوده‌ی ۳ ثانیه قرار گیرد. شکل (۲) نحوه نصب جداگرهای لرزه‌ای را در کف طبقات نشان می‌دهد.

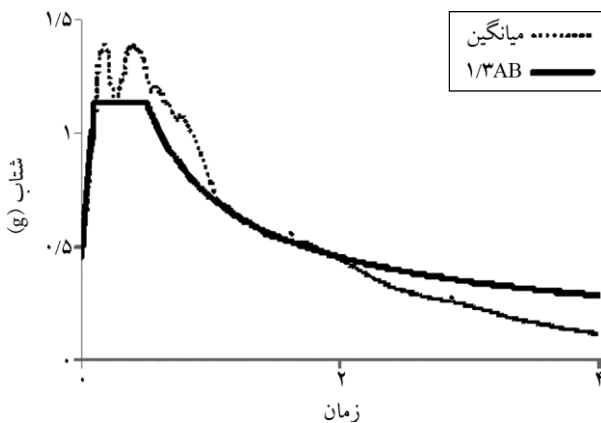


شکل (۲): جداسازی کف طبقات با استفاده از جداگرهای لرزه‌ای [۱۲].



شکل (۳): طیف‌های پاسخ شتاب‌نگاشت زلزله‌های هشتگانه.

زمانی برای سازه‌ی معرفی شده در جدول (۱) با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده به طریق فوق صورت پذیرفته است.



شکل (۴): مقایسه طیف پاسخ میانگین و طیف پاسخ استاندارد.

۲-۳- تحلیل سازه

روش جداسازی کف طبقات گرچه روشی مؤثر در افزایش عملکرد سازه‌ای ساختمان‌هاست ولی در عمل سبب ایجاد تغییر مکان نسبی بالا مابین کف طبقات و اسکلت ساختمان در سازه‌ی جداسازی می‌گردد. هدف اصلی در این تحقیق نخست نشان دادن چگونگی تأثیرپذیری عملکرد سازه از جداسازی کف طبقات در تحلیل‌های خطی تاریخچه زمانی است. متعاقباً به جهت نیاز به کاهش دامنه حرکت نسبی بین کف طبقات و اسکلت سازه از متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی استفاده به عمل آمده و مسئله از طریق روش تاریخچه زمانی غیرخطی مورد تحلیل قرار داده شده است.

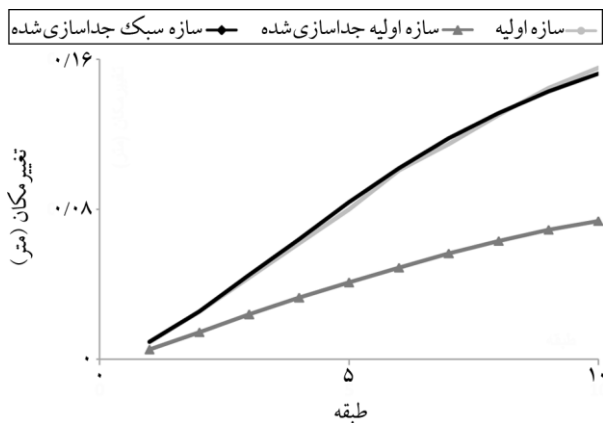
اصطکاکی و یا جاری شونده نیز برای کنترل تغییر مکان‌های نسبی بین سازه و کف استفاده نمود. ثابت میرایی تعیین شده بر اساس محدود ساختن جابه‌جایی نسبی بین کف طبقات و اسکلت سازه تا میزان حدود ۱۰ سانتی‌متر برای میانگین هفت زلزله در تحلیل‌های تاریخچه زمانی از طریق انجام سعی و خطاهای متوالی به دست آمده است.

۲-۲- زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل تاریخچه زمانی

انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مناسب جهت تحلیل دینامیکی و مقیاس کردن آنها با توجه به ضوابط متداول صورت پذیرفته است. در این تحقیق از هفت جفت شتاب‌نگاشت استفاده می‌شود که از زلزله‌هایی که در زمین‌های دارای خاک نوع ۲ با سرعت موج برشی بین ۳۷۵ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه و فاصله از گسل حداقل ۲۰ کیلومتر رخ داده‌اند به دست آمده‌اند. برای هر کدام از زمین‌لرزه‌های انتخاب شده زوج شتاب‌نگاشت‌های افقی متعامد آنها مقیاس شده و جهت ساخت یک طیف پاسخ میانگین برای هر زلزله طیف‌های پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها در هر دو راستا با استفاده از روش جذر مجموع مربعات (SRSS) ترکیب شده‌اند. طیف‌های پاسخ حاصله از این شتاب‌نگاشت‌ها به همراه طیف میانگین‌گیری شده با احتساب تمام زلزله‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است. طیف پاسخ متوسط زلزله‌های انتخابی با ۱/۳ برابر طیف استاندارد در شکل (۴) مقایسه شده است. تحلیل‌های تاریخچه

اولیه است. البته وقتی که اسکلت اصلی سازه جداسازی شده با مقاطع سبک‌تر به جهت کاهش هزینه ساخت جایگزین شده (مدل سوم) کاسته شدن تأثیر جداسازی کف در این پارامتر عملکردی به وضوح دیده می‌شود.

شکل (۶) میانگین تغییر مکان حداکثر طبقات را تحت اثر هفت زلزله انتخابی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود جداسازی کف در مدل دوم در کاهش دامنه تغییر مکان سازه مؤثر بوده است. همچنین در مدل سوم که با کاهش ۱۸ درصدی وزن فولاد مصرفی طراحی شده بود جداسازی کف توانسته است سطح عملکردی اسکلت ساختمان را در سطح سازه اولیه حفظ کند.



شکل (۶): نمودار میانگین حداکثر جابه‌جایی طبقات در هر سه مدل تحت اثر تمامی زلزله‌های انتخابی.

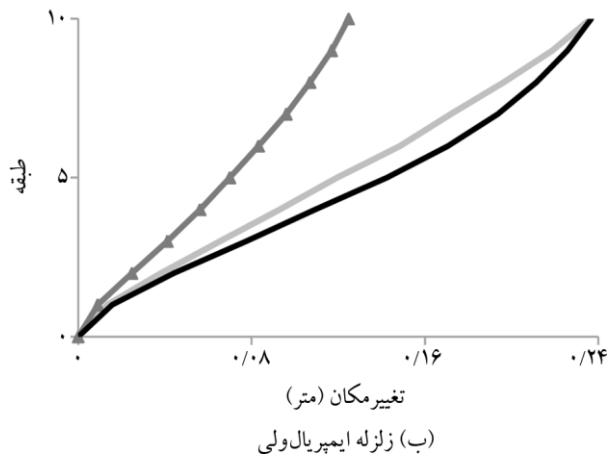
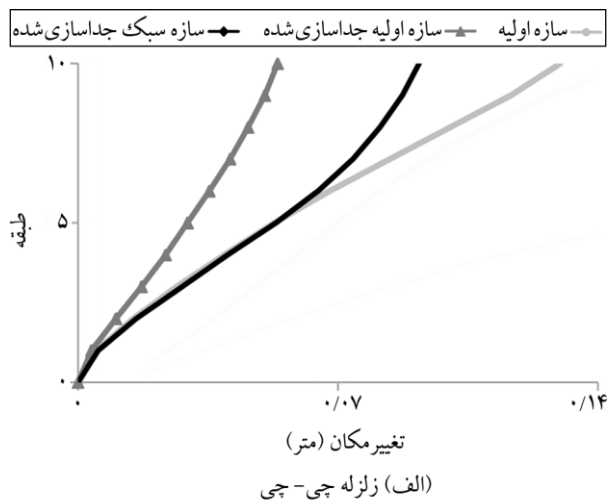
۳-۲- تغییر مکان نسبی طبقات

از مهم‌ترین پارامترهای موجود در تحلیل عملکردی سازه‌ها تغییر مکان نسبی طبقات است. این پارامتر که به صورت نسبت تغییر مکان به ارتفاع طبقه نشان داده می‌شود در شکل (۷) برای هر سه مدل ذکر شده برای زلزله‌های انتخابی ترسیم شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که بیشترین تغییر مکان نسبی مربوط به طبقات میانی بوده و عملکرد مدل جداسازی شده با مقاطع فولادی سازه اولیه از عملکرد سازه‌ی جداسازی نشده بسیار بهتر بوده است. سازه سبک جداسازی شده نیز در خصوص تغییر مکان نسبی طبقات عملکردی مشابه با سازه‌ی اولیه از خود نشان داده است.

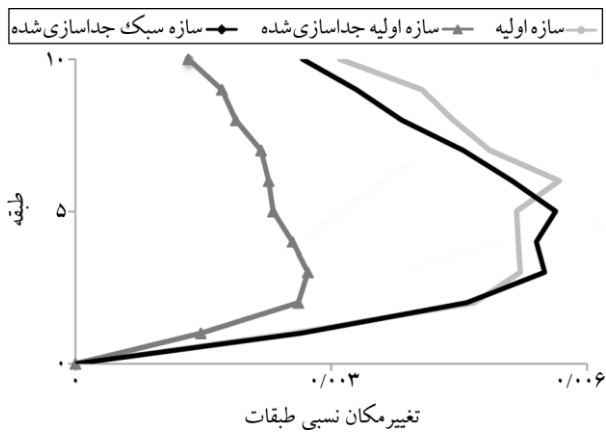
۳-۱- تغییر مکان جانبی طبقات

نتایج خروجی‌های حاصل از تحلیل سازه برای مدل‌های سه‌گانه (بدون جداسازی، با جداسازی و مدل جداسازی شده سبک) در خصوص برخی از پارامترهای مهم عملکردی آنها در زیر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

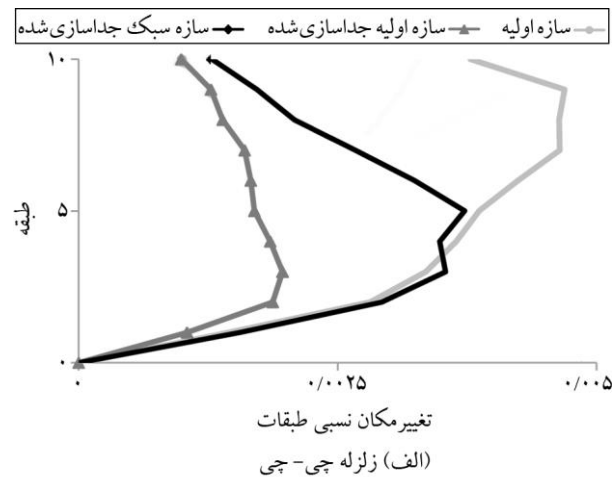
شکل (۵) تغییر مکان‌های جانبی حداکثر طبقات را برای سه مدل سازه‌ای گفته شده تحت زلزله‌های انتخابی نمایش می‌دهند. با بررسی این نمودارها مشاهده می‌شود که کمترین مقادیر تغییر مکان‌های جانبی در مدل جداسازی شده دیده شده است که دارای مقاطع فولادی مشابه با سازه جداسازی نشده است. این ویژگی نشانگر مؤثر بودن جداسازی کف در افزایش عملکرد سازه



شکل (۵): نمودار حداکثر جابه‌جایی طبقات در هر سه مدل تحت زلزله‌های انتخابی.



شکل (۸): نمودار میانگین حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات در هر سه مدل تحت اثر تمامی زلزله‌های انتخابی.



شکل (۹): نمودار جابه‌جایی نسبی حداکثر کف طبقات به سازه در بام برای سازه‌های جداسازی شده.



شکل (۱۰): نمودار حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات در هر سه مدل تحت زلزله‌های انتخابی.



شکل (۱۱): نمودار حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات در هر سه مدل تحت زلزله‌های انتخابی.

میانگین تغییر مکان نسبی حداکثر طبقات تحت اثر هفت زلزله انتخابی در شکل (۸) نشان داده شده است. این شکل مشخصاً نشانگر افزایش عمده در عملکرد سازه جداسازی شده‌ی اولیه (مدل دوم) است. همچنین در مدل سوم هم جداسازی کف توانسته است سطح عملکردی سازه را با کاهش هزینه ساخت آن در سطح سازه اولیه حفظ کند.

۳-۳- جابه‌جایی کف نسبت به سازه

از دیدگاه عملی یک اشکال عمده در جداسازی کف طبقات وجود دارد و آن حرکت نسبی مابین کف و اسکلت ساختمان است. این حرکت در هنگام زلزله در هر دو جهت افقی اتفاق می‌افتد و جهت جلوگیری از برخورد کف به اسکلت ساختمان نیاز به وجود فضای حرکتی کافی مابین آن دو است. شکل (۹) نمودار میله‌ای مربوط به حداکثر تغییر مکان‌های نسبی

شتاب اسکلت سازه است که در عملکرد تجهیزات وابسته به شتاب ساختمان چندان مورد توجه نیست.

شکل (۱۱) شتاب حداکثر کف طبقه آخر را برای دو سازه‌ی جداسازی شده در تمامی زلزله‌های انتخابی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در خصوص دو سازه تفاوت زیادی در خصوص شتاب کف طبقه دیده نمی‌شود؛ اما در مقایسه با شکل (۱۰) نتایج نشان داده شده مبین آن است که سازه‌های جداسازی شده در خصوص میانگین نتایج برای شتاب کف طبقه آخر شتابی را معادل با حدود ۲۰ درصد شتاب کف در سازه‌ی جداسازی نشده به دست داده‌اند. این میزان کاهش در شتاب دست آورد قابل توجهی تلقی می‌گردد.



شکل (۱۱): نمودار شتاب مطلق حداکثر برای کف طبقه در بام برای سازه‌های جداسازی شده.



شکل (۱۲): نمودار برش پایه حداکثر برای هر سه مدل سازه با و بدون جداسازی.

۳-۵- برش پایه

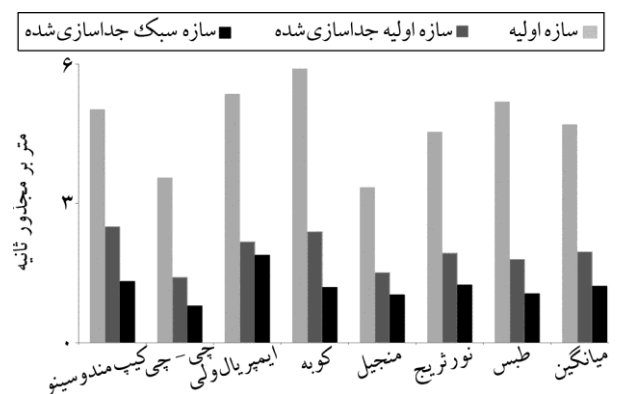
شکل (۱۲) نمودار میله‌ای برش پایه حداکثر در هر سه مدل

جداگرها و هزینه‌های مرتبط به آن با مشکل مواجه می‌سازد. در مباحث بعدی در خصوص به کارگیری متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی به منظور کاهش دامنه تغییر مکان نسبی مابین کف و اسکلت ساختمان بحث خواهد شد.

۳-۴- شتاب حداکثر در سازه و در کف طبقه برای تراز بام

شاید مهم‌ترین دلیل برای استفاده از جداسازی کف طبقات در مراکز صنعتی و یا ساختمان‌های محل استقرار تأسیسات حساس به شتاب (مراکز مخابراتی، محل قرارگیری رایانه‌ها در سیستم‌های کنترل عملیات و یا حفاظت اطلاعات، بیمارستان‌ها، مراکز اداری و مال مهم و...) کاهش شتاب در آن طبقات به جهت حفظ کارایی تجهیزات نصب‌شده‌ی حساس به شتاب در زمان وقوع زلزله و امکان استفاده از آنها در حین زلزله و بعد از آن است.

شکل (۱۰) نمودار میله‌ای حداکثر شتاب مطلق در اسکلت سازه را برای طبقه بام در تمامی زلزله‌های انتخاب شده نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود شتاب سازه در این طبقه برای سازه‌های ایزوله شده بسیار کاهش یافته و در میانگین به محدوده ۴۰ درصد شتاب سازه جداسازی نشده رسیده است. این نسبت برای سازه جداسازی شده با مقاطع کاهش یافته به محدوده زیر ۳۰ درصد هم رسیده است. البته باید توجه داشت که شتاب نشان داده شده در سازه جداسازی نشده معادل با شتاب سازه و شتاب کف طبقه محسوب می‌شود ولی برای سازه‌های جداسازی شده این شتاب مربوط به کف طبقه نیست و تنها



شکل (۱۰): نمودار شتاب مطلق حداکثر برای اسکلت ساختمان در تراز بام برای هر سه مدل سازه با و بدون جداسازی متر بر مجذور ثانیه.

مدل سازه جداسازی شده با مقاطع کاهش یافته دیده می شود.

۴- استفاده از متوقف کننده های تغییر مکانی

نتایج نشان داده شده در این تحقیق مبین عملکرد مناسب جداسازی کف طبقات در رفتار سازه و بهبود عملکرد لرزه ای آن بوده و پاسخ لرزه ای میانگین سازه تحت اثر هفت زلزله انتخابی برای سازه های جداسازی شده مطلوب قلمداد می گردد. با این وجود بر طبق همین نتایج در بند ۳-۳ این تحقیق نشان داده شد که در زلزله ایمپریال ولی دامنه تغییر مکان نسبی مابین کف طبقه و اسکلت سازه مناسب نیست و نیاز به استفاده از متوقف کننده های تغییر مکانی برای کاستن این دامنه است. شکل (۱۳) چگونگی نصب یکی از انواع این گونه تجهیزات را در فاصله بین ستون و کف طبقه نشان می دهد. این گونه از ابزارآلات عمدتاً از قطعات لاستیکی سخت با توانایی فشردگی چند سانتی متری در شرایط برخورد کف با ستون تشکیل شده اند که در فاصله مشخصی نسبت به کف طبقه قرار داده می شوند تا در زلزله های متداول مانعی برای حرکت کف ایجاد نکنند.

سازه ای موجود را نمایش می دهد. در سازه ای جداسازی نشده بیشترین مقدار برش پایه در تمامی زلزله ها دیده شده است در حالی که در دو مدل بعدی که مجهز به جداگر می باشند این مقادیر کاهش چشم گیری داشته اند. میانگین برش پایه تحت اثر تمامی زلزله های انتخابی در دو سازه جداسازی شده تقریباً با یکدیگر برابر و در حدود ۴۰ درصد برش پایه سازه جداسازی نشده است.

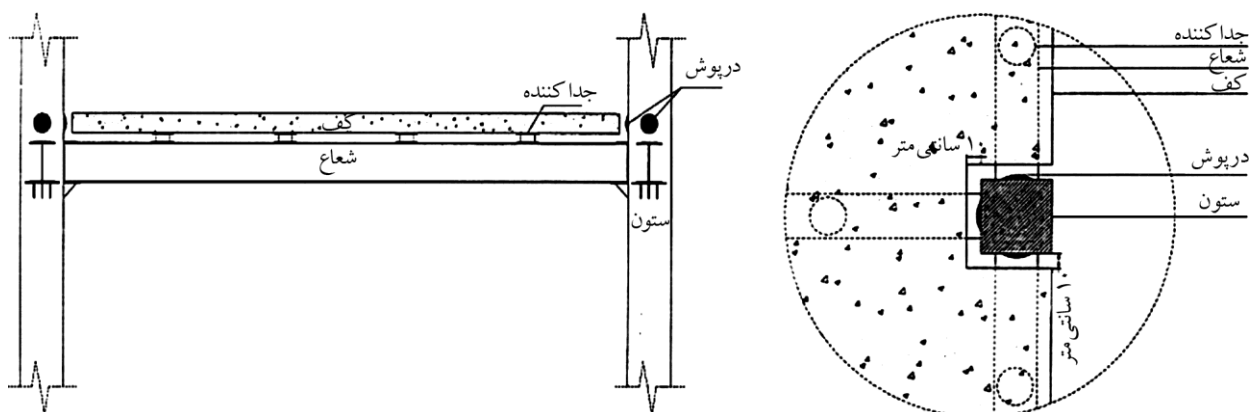
۳-۶- نیروهای داخلی مقاطع سازه ای

در این بخش یک نمونه از تیرهای سازه با جانمایی یکسان در پلان برای تمامی مدل های سه گانه در طبقات اول، پنجم و دهم انتخاب شده و مقادیر میانگین نیروی برشی و لنگر خمشی حداکثر آنها تحت اثر زلزله های انتخابی در جدول (۲) با یکدیگر مقایسه شده اند.

همان گونه که در جدول (۲) نشان داده شده است، نیروی برشی و لنگر خمشی دارای بیشترین مقدار خود در سازه ای جداسازی نشده است می باشند و کمترین مقدار این نیروها در

جدول (۲): نیروی برشی و خمشی وارده بر تیرهای انتخابی.

طبقه	سازه اولیه		سازه اولیه جداساز شده		سازه سبک جداساز شده	
	M (نیوتن - متر)	V (نیوتن)	M (نیوتن - متر)	V (نیوتن)	M (نیوتن - متر)	V (نیوتن)
اول	۴۲۴	۱۱۷	۲۲۰	۸۹	۱۷۳	۷۶
پنجم	۴۷۸	۱۳۲	۲۰۸	۸۴	۱۵۷	۶۹
دهم	۱۸۱	۴۷	۲۹	۱۸	۲۱	۱۲

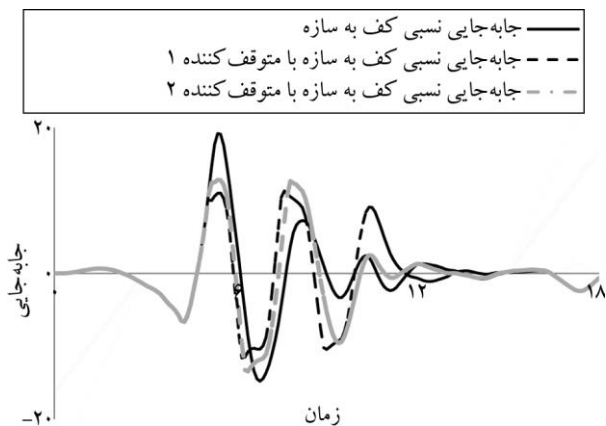


شکل (۱۳): نمونه ای از متوقف کننده های تغییر مکانی برای جداسازی لرزه ای [۱۲].

مدل‌های سازه‌ای مجهز به متوقف‌کننده تغییر مکانی فوق تنها تحت اثر بار لرزه‌ای ناشی از زلزله ایمپریال‌ولی قرار داده شد زیرا که در بقیه زلزله‌های هفتگانه‌ی این تحقیق تغییر مکان نسبی کف طبقه به سازه در محدوده ۱۰ سانتی‌متری قرار داشت و متوقف‌کننده‌ها مورد آزمایش قرار نمی‌گرفتند. روش حل عددی به کار گرفته شده در این خصوص بر خلاف موارد قبلی تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی بوده تا امکان بررسی مسئله برخورد کف با سازه و اثرات ضربه و برخورد در پاسخ عملکردی کف طبقات و اسکلت ساختمان امکان‌پذیر گردد.

۴-۲- جابه‌جایی نسبی کف به سازه

همان‌گونه که در شکل (۱۵) نشان داده شده است دامنه جابه‌جایی نسبی کف به سازه در طبقه دهم با استفاده از متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی به‌طور متناسب کاهش یافته و این کاهش با افزایش سختی متوقف‌کننده‌ها بیشتر می‌شود.



شکل (۱۵): جابه‌جایی نسبی کف به سازه در طبقه دهم.

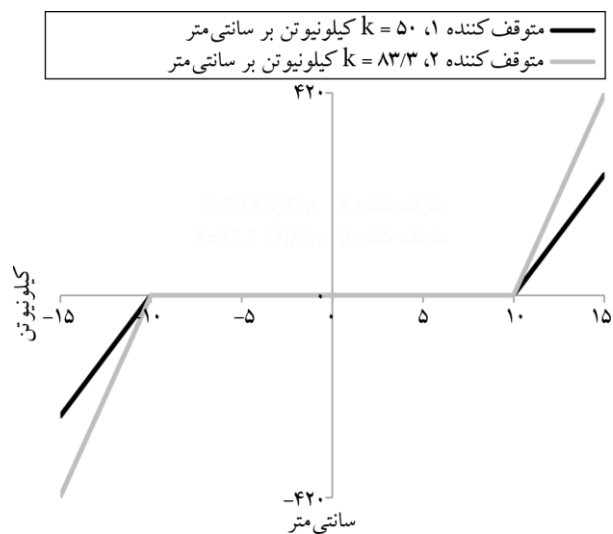
بدین ترتیب می‌توان گفت که جابه‌جایی نسبی کف به سازه با استفاده از متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی کاهش داشته و به‌عنوان مثال در طبقه دهم این جابه‌جایی نسبی تا حدود ۳۵ درصد کاهش یافته است. این کاهش جابه‌جایی در اثر ایجاد نیرو در متوقف‌کننده‌ها و انتقال عکس‌العمل آن به سازه اتفاق افتاده است. شکل (۱۶) نشان‌دهنده‌ی نیروی اعمال شده به متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی در طبقه دهم است. از آنجایی که

در ادامه‌ی کار سازه‌ی جداسازی شده با مقاطع کاهش یافته که در فصول گذشت‌ته معرفی شده بود تحت تنها یکی از زلزله‌های هفتگانه پیشین (زلزله ایمپریال‌ولی) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این سازه بدون متوقف‌کننده تغییر مکانی دارای دامنه تغییر مکان نسبی کف به اسکلت در تراز بام سازه معادل با ۱۹ سانتی‌متر بود که اصولاً مطلوب تلقی نمی‌گردد؛ بنابراین از متوقف‌کننده تغییر مکانی مابین کف تمام طبقات با اسکلت ساختمان تنها به جهت کاستن از دامنه حرکت گفته شده در زلزله ایمپریال‌ولی استفاده به عمل آمده است.

۴-۱- انتخاب مشخصه‌های رفتاری برای متوقف‌کننده‌ی

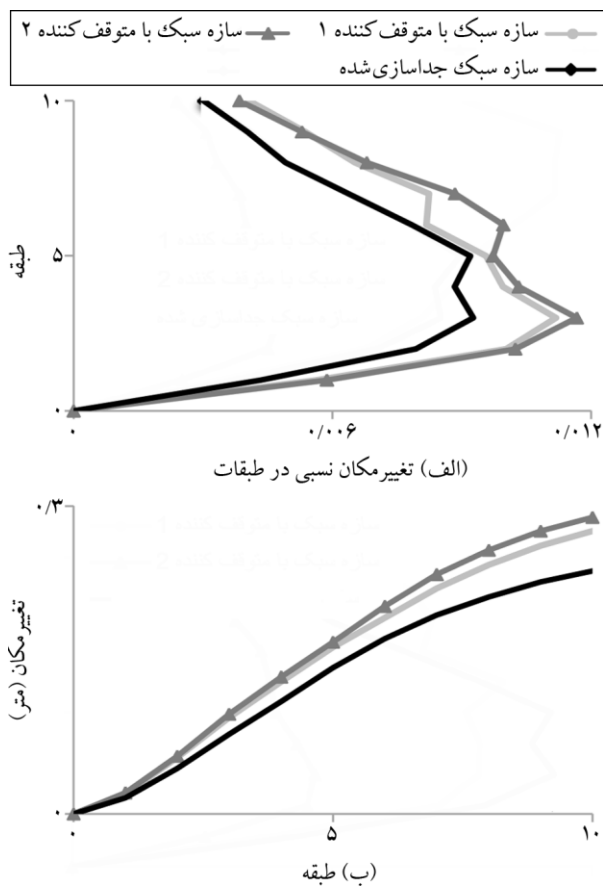
تغییر مکانی

دو نوع از متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی با دو سختی متفاوت (۵۰ کیلونیوتن بر سانتی‌متر و $83/3$ کیلونیوتن بر سانتی‌متر) در این مرحله مورد استفاده قرار گرفته است. این متوقف‌کننده‌ها در فاصله مابین اسکلت سازه اصلی و لبه کف طبقه جداسازی شده به اسکلت سازه نصب و در فاصله آزاد ۱۰ سانتی‌متری با لبه کف طبقه قرار می‌گیرد. بدین ترتیب قبل از برخورد کف به متوقف‌کننده ۱۰ سانتی‌متر فضای آزاد حرکتی بدون حضور متوقف‌کننده وجود دارد. مشخصه رفتاری این متوقف‌کننده‌ها مدل الاستیک دو خطی نشان داده شده در شکل (۱۴) فرض شده است.



شکل (۱۴): منحنی‌های رفتاری متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی.

به عنوان مثال در سازه دارای متوقف کننده تغییر مکانی میزان تغییر مکان نسبی طبقات سازه در تمامی ارتفاع آن تا حدود ۲۰ درصد بیشتر از سازه بدون متوقف کننده است. همچنین می توان نشان داد که در همین سازه تغییر مکان حداکثر بعد از نصب متوقف کننده های تغییر مکانی نوع ۱ و ۲ به ترتیب ۱۰ درصد و ۱۲ درصد در تمام ارتفاع اسکلت ساختمان افزایش یافته است.



شکل (۱۲): نمودار تغییر مکان و تغییر مکان نسبی سازه در هنگام استفاده از متوقف کننده های تغییر مکانی.

مسئله مهم دیگر در این ارتباط دانستن میزان شتاب کف طبقات جداسازی شده در ارتفاع سازه است تا نسبت به عملکرد سازه در حفاظت از تجهیزات حساس به شتاب در شرایط استفاده از متوقف کننده های تغییر مکانی اطلاعات لازم در دسترس قرار گیرد. شکل (۱۸) شتاب حداکثر حاصله در کف طبقات را در حالت به کارگیری متوقف کننده تغییر مکانی شماره ۱ در مقایسه با حالت بدون متوقف کننده نشان می دهد.

عکس العمل نیروهای بزرگ ایجاد شده در متوقف کننده ها به سازه و کف طبقه انتقال می یابد می تواند در عملکرد تغییر مکانی و شتاب سازه و کف، اثر منفی داشته باشد. بررسی اثرات این پدیده می تواند در خصوص چگونگی استفاده از این وسیله راهگشا باشد.



شکل (۱۶): نیروی ایجاد شده در متوقف کننده تغییر مکانی ۲.

۳-۴- تغییر مکان و شتاب سازه در حالت استفاده از متوقف کننده ها

جدول (۳) مقادیر جابه جایی و شتاب را در سازه جداسازی شده با مقاطع کاهش یافته در حالت های بدون متوقف کننده و با آن در تراز بام نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود استفاده از متوقف کننده سبب کاهش عملکرد سازه در هر دو زمینه جابه جایی و شتاب شده است.

شکل (۱۷) منحنی های تغییر مکان و تغییر مکان نسبی طبقات را برای سازه های فوق نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود در تمام ارتفاع سازه کاهش عملکرد ناشی از ضربه و برخورد کف طبقات به متوقف کننده ها و عکس العمل آنها به سازه وجود دارد.

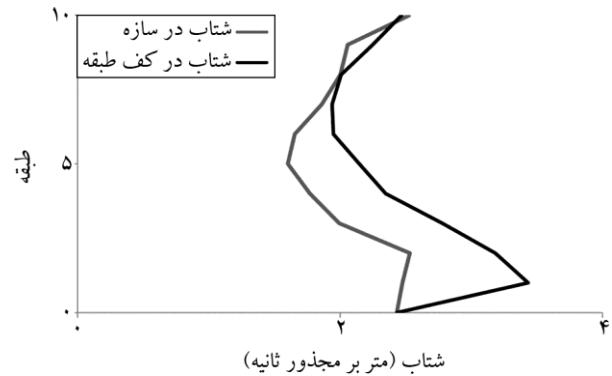
جدول (۳): مقادیر جابه جایی و شتاب حداکثر بام سازه در حالت استفاده از متوقف کننده تغییر مکانی.

نوع مدل سازه	جابه جایی و شتاب حداکثر سازه بام	
	جابه جایی (متر)	شتاب (متر بر مجذور ثانیه)
سازه سبک	۰/۲۴	۱/۹
سازه سبک با متوقف کننده ۱	۰/۲۷	۲/۵
سازه سبک با متوقف کننده ۲	۰/۲۹	۳/۶

کف طبقات در هنگام وقوع زلزله می‌پردازد. بدین منظور سازه‌ی ده طبقه مقارنی با و بدون استفاده از جداسازی کف طبقات طراحی و مدل‌سازی گردیده است. از آنجایی که جداسازی کف طبقات باعث بهبود عملکردهای لرزه‌ای در سازه می‌شود، سازه‌ی جداسازی شده دیگری با مقاطع سبک‌تر نیز در نظر گرفته شده تا سطح عملکرد لرزه‌ای مشابهی با سازه جداسازی نشده داشته باشد. رفتار این سه سازه در تحلیل‌های تاریخچه زمانی تحت اثر زلزله‌های متفاوت بررسی و مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین در ادامه مطالعات برای کاستن از دامنه تغییر مکان‌های نسبی مابین کف طبقات با اسکلت سازه از متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی در فاصله مابین کف و ستون‌های سازه نیز استفاده به عمل آمده است.

در مقایسه رفتار سازه اولیه با سازه‌ی جداسازی شده مشخص شد که تغییر مکان نسبی طبقات در سازه جداسازی شده تا حدود ۵۰ درصد کاهش یافته است. همچنین کاهش در تغییر مکان حداکثر بام تا محدوده ۶۰ درصد با استفاده از جداسازی مشاهده شده است. نتایج به دست آمده نشان داده است که چنانچه سازه‌ای با ۱۸ درصد کاهش در وزن فولاد مصرفی با استفاده از جداسازی کف طبقات ساخته شود کاهش محسوسی در عملکردهای تغییر مکانی سازه نسبت به سازه اولیه به وجود نخواهد آمد. در خصوص جابه‌جایی نسبی کف به ستون‌های سازه نیز متوسط حداکثر دامنه تغییر مکان نسبی در محدوده ۱۰ سانتی‌متر بوده است که با توجه به تکنولوژی‌های موجود مطلوب محسوب می‌گردد. مهم‌تر از همه مقدار کاهش شتاب حداکثر در سازه و کف طبقات است که به ترتیب به حدود ۴۰ درصد و ۲۰ درصد مقدار شتاب در سازه جداسازی نشده رسیده است. این میزان کاهش در شتاب برای سازه‌ای که با کاهش در میزان فولاد مصرفی طراحی شده بود نیز دیده می‌شود. همچنین کاهش قابل توجهی در برش پایه حداکثر و نیروهای داخلی اعضای سازه در مدل‌های جداسازی شده قابل مشاهده است.

در ادامه تحقیق با استفاده از متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی



شکل (۱۸): مقایسه شتاب حداکثر کف طبقات و شتاب سازه با استفاده از متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی در زلزله ایمپریال ولی.

همان‌گونه که در شکل نشان داده شده شتاب کف طبقه آخر در اثر برخورد به متوقف‌کننده‌ها تغییر مکانی به عدد ۲/۴۷ متر بر مجذورثانیه رسیده است. این میزان از شتاب کف برای طبقه آخر حدود ۵۵ درصد بیشتر از شتاب کف در سازه مشابه جداسازی شده ولی بدون متوقف‌کننده تغییر مکانی در همان تراز ارتفاعی در زلزله ایمپریال ولی (نشان داده شده در شکل ۱۱) است. البته باید توجه داشت که شتاب کف در طبقه آخر در همان زلزله برای سازه‌ی بدون جداسازی در محدوده ۵/۳۳ متر بر مجذورثانیه می‌باشد (نشان داده شده در شکل ۱۰) که بیش از دو برابر میزان فوق است.

توجه به این نکته نیز ضروری است که همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است شتاب‌ها در طبقات پایین به سبب افزایش سختی سازه در طبقات پایین (به دلیل در معرض قرار گرفتن اثر ضربه بر تکیه‌گاه‌های سخت‌تر) افزایش قابل توجهی یافته است. این ویژگی خلاف رویه متداول در برآورد شتاب طبقات است که شتاب‌های بزرگ‌تر را مختص به طبقات بالا محسوب می‌نموده است. همچنین نتایج حاصله حاکی از آن است که شتاب کف همواره بیشتر از شتاب سازه در تمام ارتفاع آن است. این مسئله نیز به دلیل انعطاف‌پذیری سازه در مکان اعمال ضربه در مقایسه با صلبیت کف است.

۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی رفتار ساختمان‌های جداسازی شده در

9. Ahmadi, H., Fuller, K., and Goodchild, I. (2004) Novel devices for the isolation of floor against earthquakes and ambient vibration. *13th World Conference of Earthquake Engineering*, No. 2216, Vancouver, BC, Canada.
10. Sabbagh, H. and Esmailzadeh-Hakimi, B. (2004) Design manufacture and dynamic testing of a seismic isolatin system for equipment floors in power industry. *13th World Conference on Earthquake, Engineering*, Vancouver, BC, Canada.
11. Villaverde, R. (1998) Roof isolation system to reduce the seismic response of buildings: a perlimentary assessment. *Earthquake Spectra*, **14**(3), 521-532.
12. Pourmohammad, H., Ziyaeifar, M., and Ghafory-Ashtiany, M. (2004) analytic study of floor isolation system. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, Canada.

واژه‌نامه

Mass Isolation	۱- جداسازی جرمی
Local Isolation	۲- جداسازی محلی
Mass Subsystem	۳- زیر سازه جرمی
Stiffness Subsystem	۴- زیر سازه سختی

سعی در کاستن از دامنه تغییر مکان نسبی مابین کف طبقات با ستون‌های سازه گردید. نتایج به‌دست آمده مبین آن بود که با استفاده از این روش می‌توان تا ۳۵ درصد از دامنه تغییر مکان نسبی مابین کف طبقه با سازه کاست. البته در این حالت عملکرد سازه در زمینه تغییر مکان با افت ۱۰ تا ۱۲ درصدی مواجه می‌شود. این افت عملکرد در خصوص شتاب در کف طبقات بسیار بیشتر و تا حدود دو برابر شتاب کف در مقایسه با سازه جداسازی شده‌ی بدون متوقف‌کننده‌های تغییر مکانی بوده است.

مراجع

1. Kelly, J.M., Skinner, R.I., and Heine, A.J. (1972) Mechanisms of energy absorbtion in special devices for use in earthquake resistant structures. *Bull. New Zeal. Soc. Earthq. Eng.*, **5**(3), 63-73.
2. Ramezani, S. and Ziyaeifar, M. (2017) A value based design approach for base isolated structural systems. *Journal of Civil Engineering and Environmental Sysems*, **34**(1), 34-52.
3. Naeim, F. and Kelly, J.M. (1999) *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons Inc., New York.
4. Ziyaeifar, M., and Noguchi, H. (1998) Partial mass isolation in tall building. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **27**, 49-67.
5. Ziyaeifar, M. (2000) Method of mass isolation in seismic design of structure. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, No. 1441, New Zealand.
6. Ziyaeifar, M. (2002) Mass isolation: Concept and techniques. *Journal of European Association for Eaethquake Engineering*, **2**, 43-55.
7. Ziyaeifar, M., Gidfar, S., and Nekooei, M. (2012) A model for mass isolation study in seismic design of structures. *Structual Control and Health Monitoring*, **19**, 627-645.
8. Yaghoubian, J. (1991) Isolation building contents from earthquake induced floor motions. *Earthquake Spectra*, **14**(3), 127-143.

Investigation on the Role of Displacement Constraints in Seismic Performances of Floor Isolated Structures

Mohammad Ali Farazandeh¹ and Mansour Ziyaeifar^{2*}

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Structure Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran , *Corresponding Author, email: mansour@iiees.ac.ir

Floor isolation technique is considered as a new approach in seismic design of structures in which the mass of building at each floor is isolated from the main structural system via seismic isolators. In this case, during earthquake actions, large relative movement between isolated floors and the main structural system at each floor level would be expected. In the current work, numerical studies have been carried out on a typical floor isolated building to investigate the role of displacement constraints (Stoppers) in limiting the gap between the floors and the structural system during seismic actions. A ten-story steel frame structural system located on stiff soil subjected to far-field earthquakes was selected for parametric study in this work. The structure has been proportioned in three different configurations, not isolated, floor isolated and floor isolated equipped with Stoppers. Since using floor isolation improves the structural performances of the system, a fourth configuration for the same structural system with 18% reduction in steel consumption is also taken into consideration. This structure was deliberately proportioned to provide the state of comparable seismic performances between the isolated structure and the non-isolated one. Direct time integration analyses using seven scaled bi-directional earthquake records have been carried out on the same structural system for all its configurations. According to the results of this study, floor isolation is quite effective in improving structural performances of the system. In fact, on average, floor isolation causes significant reduction on lateral displacement of the structural system (more than 50%) if it compares with the non-isolated one. The results also show the benefit of using floor isolation technique in design of structural system by decreasing the construction cost of the building (18% reduction in the weight of structural material) if a comparable seismic performance with the non-isolated structural system is required. It should be noted that, improving in seismic performances of the building or reduction in its construction cost comes in the expenses of large relative movement of isolated floors with respect to the main structural system. In the example used in this study such relative movement (average of seven earthquakes) reached to the level of 0.1 meter. However, in one of those earthquakes (Imperial Valley, 1979) this relative movement has soared up to 0.19 meters. Such large relative movement needs complicated non-structural detailing for the building assembly and expensive seismic isolators. To deal with this problem, displacement constraints have been provided for the floor movement using elastic Stoppers. The gap between Stoppers and the floor system is chosen at 0.1 meter to limit the Stopper's functionality in structure only to the case when the system is subjected to large earthquakes. The results of parametric studies on the system with reduced structural weight (configuration fourth) shows a reasonable reduction in relative displacement between floors and the main structure in case of using Stoppers. These results were obtained using nonlinear time integration analyses on the structural system subjected to Imperial Valley earthquake record. According to these results, while Stoppers can reduce the relative movement between floors and the structural system to about 35%, they considerably add to the acceleration of the floor system (up to twice for the isolated structure at the roof level). In addition, the results also show using Stoppers may add to the inter story drift limit of the structure (up to 20%). These shortcomings in using Stoppers in this work can possibly be reduced using Stoppers with different arrangement and sophisticated characteristics.

Keywords: Seismic Isolation, Floor Isolation, Displacement Constraint, Stoppers, Time History Analysis.