

### چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از جداگرهای لرزه‌ای و میراگرها برای حفاظت از سازه‌های بااهمیت در برابر بار زلزله و انفجار رو به افزایش است. در این مقاله، پاسخ سه سازه‌ی پنج، ده و پانزده طبقه با پای گیردار و همچنین پای جداسازی شده با استفاده از جداگرهای لاستیکی با هسته‌ی سربی، میراگر ویسکوز و جداگر همراه با میراگر تحت بارهای زلزله و انفجار مورد بررسی قرار می‌گیرد. بار انفجار در نظر گرفته شده ناشی از انفجار سطحی ۲۶۴ کیلوگرم TNT در فواصل پانزده و بیست متری از سازه می‌باشد و به صورت تاریخچه زمانی و با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN برای سازه‌های پنج، ده و پانزده طبقه به ترتیب در بیست و پنج، پنجاه و همچنین هفتاد و پنج نقطه‌ی مختلف از سازه محاسبه شده و بر سازه‌ها اعمال می‌شوند. در نهایت سازه‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAP 2000 تحلیل شده و مقادیر تغییر مکان نسبی طبقات، دررفت، برش پایه و مفاصل پلاستیک ایجاد شده در اعضای سازه با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از سیستم ترکیبی جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی و میراگر ویسکوز توانسته است میزان دررفت سازه تحت بار انفجار را به میزان ۹۵/۱۷ درصد کاهش دهد و سبب بهبود سطح عملکردی سازه و تأخیر در تشکیل مفاصل پلاستیک شود.

**واژگان کلیدی:** جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی، میراگر ویسکوز، انفجار سطحی، سازه فولادی، تحلیل غیرخطی.

## عملکرد جداگرهای لاستیکی با هسته‌ی سربی و میراگر ویسکوز در سازه‌های فولادی

رضا کامگار

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

راحله دهقان

کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

رضا رهگذر (نویسنده مسئول)

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، rahgozar@uk.ac.ir

### ۱- مقدمه

پاسخ غیرخطی قاب خمشی ویژه فولادی دارای میراگر ویسکوز و جداگر لرزه‌ای لاستیکی با هسته‌ی سربی بررسی می‌شود.

در رابطه با مواد منفجره و تأثیر بار انفجار بر پاسخ سازه تحقیقات زیادی انجام گرفته و تکنیک‌ها و روش‌های گوناگونی ارائه شده است. تحقیقات مگنسا و موریل [۱] به مطالعات آزمایشگاهی بر روی تیرهای بتنی با مقاومت‌های گوناگون تحت بار انفجار محدود می‌شود که در آن به تحقیق بر اثر رشته‌ی آهنی، مدهای خرابی و انتقال بار به تکیه‌گاه‌ها متمرکز بود و با استفاده از مدل یک درجه آزادی تحلیل دینامیکی و استفاده از منحنی‌های آسیب تحلیل انجام شد و نتایج پاسخ دینامیکی تکیه‌گاه‌ها با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. بیکر و همکاران به منظور محاسبه‌ی اضافه فشار و ضربه‌ی ناشی از انفجارهای اتفاقی صنعتی

با توجه به افزایش حملات تروریستی، مطالعات در مورد چگونگی مقابله و کاهش اثرات بار انفجار بر سازه‌ها مورد توجه محققین متعددی قرار گرفته است. حرکت سازه در اثر انفجار شامل تحرکات با مدت زمان کوتاه و فرکانس بالا می‌باشد. به جهت همین ویژگی‌های منحصربه‌فرد، پاسخ ساختمان به این چنین بارگذاری‌هایی بسیار متفاوت با پاسخ به زمین‌لرزه است. به عبارت دیگر تحقیقات موجود در زمینه‌ی تأثیر کیفی تحریکات با فرکانس بالا، زمان کوتاه و بزرگی زیاد بر پاسخ سازه ناچیز می‌باشند. مطالعات قابل توجهی بر روی حالت‌های مختلف استفاده از سیستم‌های کنترل غیرفعال در برابر نیروی زلزله انجام شده است، اما در رابطه با تأثیر بارهای انفجاری بر روی سازه‌های دارای سیستم‌های کنترل غیرفعال تحقیقات زیادی وجود ندارد. در این مقاله تأثیر انفجار سطحی به عنوان مرسوم‌ترین انفجار بر

مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی عددی فروپاشی تدریجی یک سازه‌ی بتن مسلح تحت بار انفجار با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA توسط هاو و همکاران [۹] انجام شد. در ادامه‌ی تحقیقات هاو [۱۰] روشی نوآورانه را به‌منظور تجزیه و تحلیل پاسخ سازه در برابر انفجار ارائه نمود. در این روش پاسخ سازه در دو مرحله محاسبه می‌شود و بعد از اتمام مرحله‌ی اول که در آن نیروی وارده بر سیستم یک درجه آزادی اعمال می‌شود، سرعت محاسبه شده در پایان مرحله‌ی اول به‌عنوان شرایط اولیه در مرحله‌ی دوم که ارتعاش آزاد سازه است، استفاده می‌شود. نقص این روش در نادیده گرفتن جابه‌جایی سازه در مرحله‌ی اول است. در تحقیقات بعدی لی و هاو [۱۱] این نقصان را برطرف نموده و جابه‌جایی و سرعت ناشی از مرحله‌ی اول بارگذاری را در مرحله دوم به‌عنوان شرایط اولیه استفاده نمودند. پاسخ غیرخطی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر تحت بار انفجار توسط کامگار و شمس [۱۲] بررسی شد. در تعیین موقعیت بهینه‌ی کمر بند خریایی و مهار بازویی تحت بار انفجار، توکلی و همکاران [۱۳] با استفاده از نرم‌افزار OpenSees موقعیت بهینه را محاسبه نمودند. در بررسی تأثیر بارگذاری انفجار بر روی اجزای سازه‌ای، بحیرایی و همکاران [۱۴] تأثیر بار انفجار را بر پاسخ دال بتنی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS بررسی نمودند. امینی و همکاران [۱۵] از توابع بی‌اسپلاین به‌منظور ارائه‌ی روشی جدید جهت تحلیل دینامیکی سازه‌ها تحت بار انفجار استفاده کردند. حبیبی و خالدی [۱۶] تأثیر بار انفجار را بر پاسخ غیرخطی پل‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار دادند. خالدی و همکاران [۱۷-۱۸] کمینه‌سازی وزن و دریفت قاب خمشی را تحت بار انفجار بررسی نمودند.

با گسترش ساخت‌وساز سازه، روش‌های کنترلی فراوانی نیز توسط محققین معرفی شده است. در این میان، روش‌های کنترلی خود به‌خود به چهار دسته‌ی فعال، غیرفعال، نیمه‌فعال و ترکیبی تقسیم‌بندی می‌شوند. سیستم میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده [۱۹-۲۲]، میراگر ویسکوز [۲۳]، جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی [۲۴]، میراگر مایع تنظیم‌شونده [۲۵]، کمر بند

تعدادی نمونه را مورد ارزیابی قرار دادند و با استفاده از مدل معادل TNT، رابطه‌ی بین اضافه فشار، فاصله و ضربه را ارائه نمودند [۲]. نگو و همکاران [۳] نیز به ارزیابی رفتار ستون‌های با مقاومت بالا و همچنین ستون‌های با مقاومت معمولی تحت بار انفجار پرداختند و ارتباط وابستگی نرخ کرنش با خصوصیات مهم ستون با مقاومت بالا را بررسی نمودند. در این تحقیق اثر جزئیات تقویت هندسه و حالت بارگذاری بر روی رفتار دینامیکی ستون توسط نرم‌افزار LS-Dyna بررسی شد. نتایج نشان داد که ستون‌های با مقاومت بالا نسبت به ستون‌های معمولی هنگام قرارگیری در مقابل بارهای شدید عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهند و قدرت جذب انرژی بیشتری را دارند [۳]. ارتباط ترکیب بار انفجار و ضربه ناشی از ترکش بر روی دیوار بتنی نازک توسط میلز [۴] بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که خسارت کلی دیوار در معرض بار ترکیبی بسیار وابسته به ضربه‌ی ترکش تنها بوده و خیز وسط دیوار در ترکیب بارها بزرگ‌تر از جمع جبری مجموع خیز در بار انفجار و ترکش تنها می‌باشد [۴]. سون و همکاران [۵] برنامه هیدروکد AUTODYN را در ارزیابی رفتار مقاطع پل تحت بار انفجار بررسی نمودند. لوسونی و لوئگ [۶] نمونه‌ای از پل‌های بتنی رایج که دارای دو دهانه و دو لاین با تیرهای نوع III آشتو بودند را بررسی نمودند. در این تحقیق تیرها، سرستون‌ها و ستون‌ها تحت بار انفجار تحلیل شد. نتایج نشان داد که پل‌های شاه‌تیری که مطابق آیین‌نامه‌ی AASHTO جهت مقابله با بار انفجار طراحی شده بودند، توانایی لازم را جهت تحمل بار انفجار نداشتند. مدل‌سازی دقیق موج انفجار در تعامل با ستون‌های بتن آرمه توسط شی و همکاران [۷] و با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN انجام شد. نتایج نشان داد که ابعاد و شکل هندسی ستون تأثیر قابل توجهی در نحوه‌ی انتشار موج انفجار و بار وارده بر ستون دارد. همچنین شبیه‌سازی واکنش یک ساختمان نسبت به انفجار ۴۰۰ کیلوگرم TNT توسط لوسونی و همکاران [۸]، با استفاده از هایدروکد AUTODYN انجام شد. در این آزمایش تمامی مراحل، از انفجار تا تخریب کامل سازه از جمله نحوه‌ی انتشار موج انفجار و تعامل آن با سازه

نمود. در ادامه‌ی تحقیقات انجام شده، برخی از محققین استفاده از میراگرهای هوشمند، که سیستم‌های نیمه‌فعال نیز نامیده می‌شوند، را برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه پیشنهاد دادند، که در آنها می‌توان به تحقیقات رومالو و همکاران [۳۳] در سال ۲۰۰۲ اشاره نمود.

در رابطه با کاهش ارتعاشات سازه تحت بار انفجار تحقیقات محدودی در دسترس می‌باشد. موندال و همکاران [۳۵] اثر میراگر ویسکوز در کاهش ارتعاش سازه در معرض انفجار زیرزمینی را بررسی نمودند. همچنین مندال و همکاران [۳۶] عملکرد سیستم‌های مختلف جداگرهای لرزه‌ای الاستومری و اصطکاکی را در کاهش ارتعاش سازه تحت اثر انفجار زیرزمینی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که در اثر استفاده از جداگرها کاهش قابل توجهی در پاسخ شتاب و جابه‌جایی سازه ایجاد می‌شود. کنگدا و بکره [۳۷] تأثیر کنترل سازه با استفاده از جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی را بر پاسخ سازه تحت بار انفجار و زلزله بررسی نمودند. در این تحقیق تمرکز اصلی بر روی بررسی پارامترهای جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی از قبیل نسبت میرایی، مقاومت تسلیم، نسبت سختی پس از تسلیم و جابه‌جایی تسلیم بود. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی در کاهش شتاب سازه و دریافت طبقات تحت تأثیر زلزله بسیار مؤثر می‌باشد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مقادیر زیاد مقاومت تسلیم سبب جابه‌جایی کمتر جداساز، کاهش کمتر مقدار شتاب مطلق بام می‌شود. نتایج همچنین نشان داد که وجود این سیستم سبب کاهش بیشتر مقدار انرژی اتلاف شده در سازه تحت بار انفجار می‌شود. در تحقیق دیگری کنگدا و بکره [۳۸] تأثیر بار انفجار را بر پاسخ سازه‌ی کنترل شده با جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی بررسی نمودند. آنان نشان دادند که بیشینه جابه‌جایی طبقات، دریافت طبقات و همچنین جذر مجموع مربعات شتاب طبقات به واسطه‌ی تأثیرات پس از انفجار کاهش می‌یابد. ژانگ و فیلیپس [۳۹] نیز عملکرد سازه‌ی جداساز لرزه‌ای شده را تحت بار انفجار بررسی نمودند. آنان نشان دادند که جداساز لرزه‌ای نیز به تنهایی

خرپایی و مهار بازویی [۱۳، ۲۶-۳۰] و .... جزو سیستم‌های کنترلی غیرفعال می‌باشند.

نخستین مورد استفاده از جداگرهای لاستیکی، مربوط به سال ۱۹۶۹ در یک مدرسه‌ی سه طبقه در کشور یوگسلاوی می‌باشد. پس از آن کشور ژاپن از جمله کشورهایی بود که به دلیل زلزله‌های شدید، از جداسازی لرزه‌ای در سازه‌ها استفاده نمودند. در سال ۱۹۹۵ و در زلزله‌ی کوبه‌ی ژاپن، تعدادی از سیستم‌های جداگر لرزه‌ای عملکرد نامناسبی داشتند و همین موضوع باعث شد تا محققین در مورد اثربخشی جداگرهای لرزه‌ای ابراز نگرانی کنند. بر اساس مشاهدات زلزله‌ی نورث‌ریج در ۱۷ ژانویه سال ۱۹۹۴، محققین به این نتیجه رسیدند که ساختمان‌های با پایه‌ی جدا در برابر زلزله‌های قوی که منبع آنها نزدیک به سازه است، عملکرد نامناسبی دارند. به همین علت در آیین‌نامه‌ی ساختمانی ICBO سال ۱۹۹۷، در مورد جداگر لرزه‌ای نسبت به ویرایش قبلی آیین‌نامه تغییراتی ایجاد شد. بر این اساس، آشرو و همکاران [۳۱] در سال ۱۹۹۶ برای در نظر گرفتن جابه‌جایی‌های بزرگ پایه در اثر زلزله‌های قوی، سیستم‌های میراگر مکمل را پیشنهاد نمودند. از طرف دیگر اضافه نمودن میرایی سبب افزایش شتاب مطلق سازه و حرکت داخلی روبنا شد. این موضوع بسیاری از مزایای جداسازی سازه که پیش‌تر توسط کلی و اینادی [۳۲] در سال ۱۹۹۳ مطرح شده بود را زیر سؤال برد. بنابراین پیش‌بینی عملکردی که پیش‌تر توسط کلی و اینادی [۳۲] در سال ۱۹۹۳ برای جداگرهای لرزه‌ای معرفی شده بود، برای برخی از زلزله‌های با شتاب معمول و تمام زلزله‌های شدید نامناسب ارزیابی شد. در سال ۲۰۰۲، رومالو و همکاران [۳۳] نشان دادند که افزودن مقدار متوسطی از میرایی ویسکوز به سیستم جداسازی کم میرا می‌تواند پاسخ‌ها را در حد قابل قبولی کاهش دهد. همچنین برای حل مشکلات بیان شده، تعدادی از محققین، استفاده‌ی هم‌زمان از سیستم‌های کنترل فعال را به صورت موازی با جداگرهای لرزه‌ای به منظور محدود نمودن رانش پایه مورد بررسی قرار دادند. از جمله‌ی آنها می‌توان به تحقیقات اسپجیمیتندروف و همکاران [۳۴] در سال ۱۹۹۴ اشاره

رفتارهای متفاوتی را از خود نشان می‌دهند که در بند ۷ مقاله به صورت جزئی بررسی شده است. با توجه به دو بار در نظر گرفته شدن (بار زلزله و بار انفجار)، مشخص است که رفتار سامانه‌ی جداساز و میراگر به صورت ترکیبی علی‌رغم ترکیب خصوصیت مناسب هر دو سیستم کنترلی نسبت به سازه‌ی صرفاً کنترل شده با استفاده از میراگر ویسکوز بهتر نبوده و بنابراین توجه اقتصادی و همچنین رفتاری‌ای را برای این سیستم کنترلی نمی‌توان متصور شد. البته نتایج نشان می‌دهند که این سیستم دارای رفتار خطی تحت بار انفجار بوده که خصوصیت مثبت این سیستم را نشان می‌دهد.

بار انفجاری استفاده شده ناشی از انفجار سطحی ۲۶۴ کیلوگرم TNT در فواصل پانزده و بیست متری از سازه می‌باشد. فشار ناشی از انفجار به صورت تاریخچه زمانی و با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN برای سازه‌های پنج، ده و پانزده طبقه به ترتیب در بیست و پنج، پنجاه و همچنین هفتاد و پنج نقطه‌ی مختلف از سازه‌ها با فرض وجود سازه‌های مجاور محاسبه می‌شود و بر سازه‌ها اعمال شده و با استفاده از نرم‌افزار SAP 2000 تحلیل می‌شوند و مقادیر تغییر مکان نسبی طبقات، دررفت، برش پایه و مفاصل پلاستیک ایجاد شده در اعضای سازه با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از سیستم ترکیبی جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی و میراگر ویسکوز در سازه‌های کوتاه مرتبه، توانسته است میزان دررفت سازه را تحت بار انفجار به میزان ۹۵/۱۷ درصد کاهش دهد. همچنین استفاده از این سیستم توانسته است سطح عملکرد سازه را بهبود بخشیده و هیچ گونه مفصل پلاستیکی در سازه تشکیل نشده است.

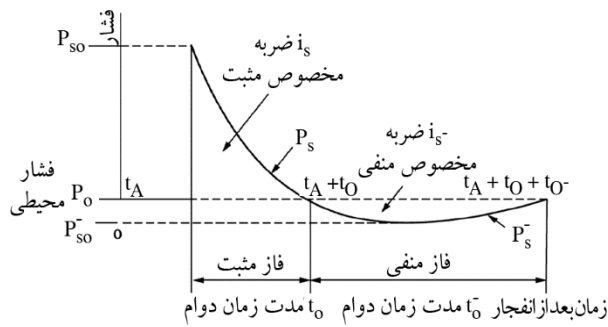
## ۲- انفجار

انفجار به معنی یک واکنش خیلی سریع و پایدار شیمیایی در ماده‌ی منفجره است که با سرعت در آن گسترش می‌یابد. در مواد منفجره با قابلیت انفجار بالا، سرعت انفجار در محدوده‌ی ۶۷۰ تا ۸۵۳ متر بر ثانیه است. انفجار باعث تبدیل ماده‌ی منفجره از حالت جامد یا مایع به گاز داغ با فشار و چگالی بالا می‌شود.

کاهش دررفت طبقات و قدر مطلق شتاب طبقه تحت بار انفجار مؤثر می‌باشد. آنان همچنین نشان دادند که خرابی پای سازه در سازه‌ی مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده و جداساز پایه تحت تحریکات بزرگ محدود می‌شود. مطالعات فوق نشان می‌دهد که در رابطه با عملکرد سازه‌ی کنترل شده با استفاده از ترکیب میراگرهای ویسکوز و جداساز تحت بار انفجار تحقیقی تاکنون ارائه نشده است.

در این مقاله، پاسخ سه سازه‌ی پنج، ده و پانزده طبقه تحت بار انفجار روزمینی با پای گیردار و همچنین پای جداسازی شده با استفاده از جداگرهای لاستیکی با هسته‌ی سربی، میراگر ویسکوز و جداگر همراه با میراگر ویسکوز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

لازم به ذکر است که بارگذاری‌های مختلفی در طول عمر مفید سازه بر سازه اعمال می‌شوند و یک طراحی مطمئن و مطلوب می‌بایستی انواع مختلف بارگذاری را که احتمال رخداد آن در طول عمر مفید سازه می‌رود را در نظر گرفته و سازه را با آن طراحی نماید. در این میان، از میان بارگذاری‌های جانبی وارد بر سازه (همچون بار باد، زلزله و انفجار) تمامی طراحان به لزوم طراحی سازه تحت بار زلزله اشراف کافی داشته و دارند اما به علت وقوع حملات تروریستی که در اقصی نقاط جهان هرروزه شاهد آن هستیم، آیین‌نامه‌های دنیا به سمت طراحی سازه در برابر بار انفجار رفته‌اند. همچنین مطابق مبحث بیست و یک از مقررات ملی ساختمان، سازه‌ها می‌باید در برابر بار انفجار طراحی شوند. بنابراین در این مقاله، در رابطه با سامانه‌ی جداساز لرزه‌ای هدف از طراحی افزایش زمان تناوب سازه می‌باشد و در رابطه با میراگر هدف افزایش مقدار میرایی سازه است که سبب استهلاک بیشتر پاسخ سازه تحت بارگذاری دینامیکی می‌شود. ترکیب این دو سامانه نیز سبب تأمین هر دو مشخصه‌ی فوق‌الذکر تحت بارگذاری دینامیکی می‌شود. لازم به ذکر است که این سامانه‌ها در غیاب بارگذاری جانبی عملکردی از خود نشان نمی‌دهند و در حضور بار دینامیکی جانبی همچون بار زلزله و انفجار مطابق مطالعات انجام شده



شکل (۱): پروفایل فشار ناشی از انتشار موج انفجار [۱۲، ۱۳].

به منظور محاسبه‌ی میران فشار ناشی از انفجار در هوا، روش‌های متعددی وجود دارد. در این مقاله، مقدار بار انفجار به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN تعیین می‌شود.

### ۳- سیستم جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی

در این نوع میراگر به منظور بالا بردن میرایی مؤثر جداگرهای الاستومری که از لاستیک با میرایی اندک ساخته شده‌اند، از یک یا چند هسته‌ی سربی قرار گرفته در مرکز استفاده می‌شود. هسته‌ی سربی که با فشار یا تزریق در داخل سوراخ تکیه گاه قرار داده می‌شود، تحت اثر برش‌های ناشی از زمین‌لرزه در تنش‌های پایین (تقریباً ۸ الی ۱۰ مگاپاسکال) و در دمای معمولی جاری شده و تغییر شکل فیزیکی می‌دهد. در این حالت سرب به صورت یک ماده‌ی الاستیک-پلاستیک عمل می‌کند به این ترتیب تحت سیکل‌های متوالی با تشکیل حلقه‌های هیستریزس، رفتار دوخطی از خود نشان می‌دهد و میرایی را از ۳ درصد در لاستیک به بالاتر از ۱۰ درصد می‌رساند. هسته‌ی سربی به همراه لاستیک سختی اولیه را برای بارهای سرویس به وجود آورده و انرژی ورودی زلزله را مستهلک می‌کند. در اکثر موارد سختی ثانویه یا پلاستیک حدود یک‌دهم الی یک‌ششم سختی اولیه یا الاستیک است. علت انتخاب سرب این است که این ماده در سیکل‌های بارگذاری متمادی دچار پدیده‌ی خستگی نشده و از این رو دارای عملکردی پایدار در راستای استهلاک انرژی است [۲۴، ۴۱]، شکل‌های (۲) و (۳).

حجم ایجاد شده توسط این گاز عامل ایجاد موج انفجار است. فشار درست قبل از جبهه‌ی موج انفجار در محدوده‌ی ۱۸۹۰۰۰ تا ۳۴۳۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. در فرآیند انفجار فقط یک سوم از کل انرژی شیمیایی ماده‌ی منفجره آزاد می‌شود و بقیه‌ی انرژی، هنگامی که ماده‌ی منفجره در مخلوطی با هوا می‌سوزد، با سرعت بسیار کمتری آزاد می‌شود. این روند پس از سوخت اثر ناچیزی روی مشخصات موج انفجار دارد زیرا سرعت آن در مقایسه با فرآیند انفجار بسیار کمتر است.

اثرات انفجار به صورت یک موج ضربه‌ای است که ترکیبی از یک جبهه موج شدید است که از سطح ماده‌ی منفجره در هوای اطراف به سمت خارج گسترده می‌شود. طی گسترش موج انفجار قدرت آن کاسته شده، تداوم آن بیشتر شده و سرعت آن نیز کم می‌شود. این پدیده به خاطر واگرایی کره‌ای شکل موج انفجار و همچنین این واقعیت است که واکنش شیمیایی ماده‌ی منفجره تمام شده و فقط بعضی محصولات ناشی از گاز داغ انفجار در ترکیب با هوای اطراف می‌سوزند. در بررسی بار انفجار بر سازه و به‌طور کلی در بررسی اثر انفجار بر ساختمان عواملی از قبیل ۱- بزرگی انفجار در مقیاس کیلوگرم TNT، ۲- فاصله مرکز انفجار تا ساختمان، ۳- هندسه و سیستم سازه‌ای ساختمان و ۴- زاویه سازه با راستای حرکت موج و زمین در اولویت توجه قرار دارند [۴۰].

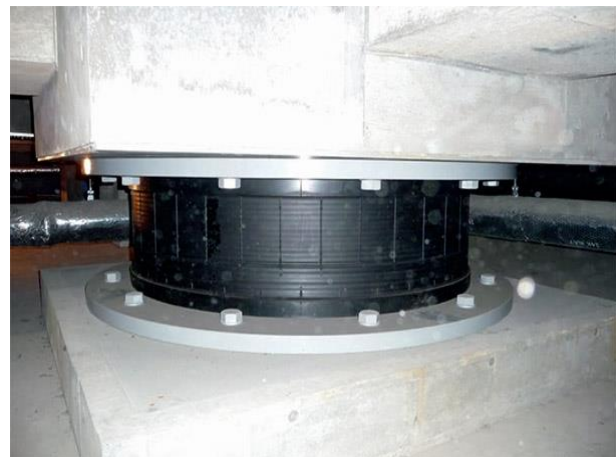
بارهای انفجاری بر حسب نوع محصور شدگی، به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند. انفجار محصور شده و انفجار محصور نشده که با توجه به بار ایجاد شده در سازه عامل بار انفجار یا بار اثرکننده روی سازه گیرنده بار را می‌توان به زیرگروه‌های دیگری تقسیم‌بندی نمود.

پروفایل اضافه فشار معمولاً با پارامترهایی همچون زمان رسیدن موج انفجار ( $t_d$ )، اضافه فشار مبنای انفجار ( $P_{so}$ ) و زمان فاز مثبت موج انفجار ( $t_0$ ) همانند آنچه در شکل (۱) آمده، مشخص می‌شود. این پارامترها که تابعی از قدرت مواد انفجاری، فاصله‌ی نقطه‌ی انفجار تا محل اندازه‌گیری و زاویه برخورد است، به صورت تحلیلی و یا آزمایشگاهی به دست می‌آیند [۱۲-۱۳].

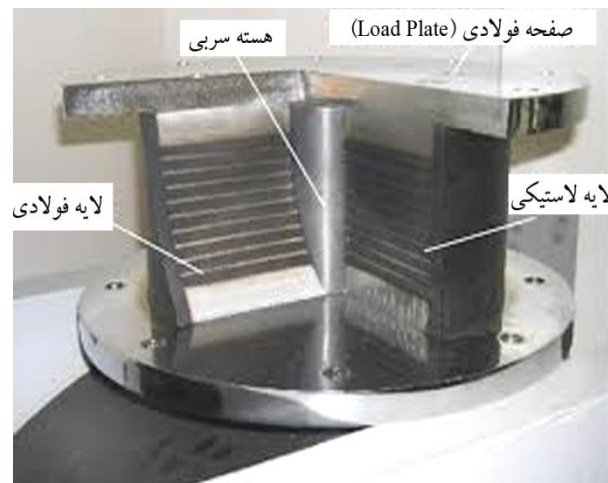


## ۵- مدل سازی

در این مقاله، به منظور بررسی اثر انفجار بر ساختمان‌ها، ابتدا سازه‌های مورد مطالعه در برابر زلزله تحلیل شده و هنگامی که عملکرد مناسبی از سازه در برابر زلزله به دست آمد، سازه تحت بار انفجار مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این کار ابتدا با توجه به مشخصات سازه، جداگر و میراگر مورد نیاز تحت بار زلزله طراحی می‌شود. در این تحقیق جهت کنترل سازه از جداگر لاستیکی با هسته سربی و میراگر ویسکوز استفاده می‌شود. پس از طراحی جداگر و میراگر برای سه سازه‌ی پنج، ده و پانزده طبقه، هر سازه برای چهار حالت سازه‌ی کنترل نشده با پای گیردار، سازه‌ی کنترل شده با استفاده از جداگر لاستیکی با هسته سربی، سازه‌ی کنترل شده با استفاده از میراگر و سازه‌ی کنترل شده با استفاده از ترکیب جداگر و میراگر تحت بار زلزله تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌شود. بدین منظور، در المان‌های سازه و در فاصله‌ای مشخص از تکیه‌گاه، مفاصل پلاستیک تعریف می‌شوند. در نهایت نیز با استفاده از سه رکورد زلزله‌ی مشخص، سازه‌ها تحلیل تاریخچه زمانی شده و مفاصل پلاستیک ایجاد شده به همراه پاسخ‌های غیرخطی سازه‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همین مراحل نیز برای چهار سازه تحت بار انفجار تکرار و نتایج به دست آمد با یکدیگر مقایسه می‌شوند.



شکل (۲): نمونه‌ی جداگر لاستیکی با هسته سربی [۴۲].



شکل (۳): اجزای جداگر لاستیکی با هسته سربی [۴۲].

## ۵-۱- مشخصات سازه‌های مورد مطالعه

در این مقاله، سه سازه‌ی پنج، ده و پانزده طبقه با ارتفاع یکسان سه متر برای تمامی طبقات و چهار دهنه‌ی پنج‌متری در جهات X و Y در نظر گرفته می‌شود و سیستم باربر جانبی قاب خمشی ویژه می‌باشد. نوع سقف‌ها نیز از نوع کامپوزیت و به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. شکل (۴) مدل سه‌بعدی سازه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. محل احداث سازه در شهر کرمان (با خطر نسبی زلزله بسیار زیاد) و با کاربردی مسکونی در نظر گرفته می‌شود که بر روی خاک نوع III احداث شده است. فولاد مصرفی برای سازه‌ها از نوع فولاد ST37 با خصوصیات  $F_u = 3700 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ ،  $E = 2.04 \times 10^6 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ ،  $\nu = 0.3$

## ۴- میراگرها

در سیستم‌های اتلاف انرژی غیرفعال از ابزارهای مکانیکی برای اتلاف انرژی ورودی به سازه استفاده می‌شود. این ابزارها موجب کاهش پاسخ سازه و خرابی سازه‌ی می‌شوند. روش‌های اتلاف انرژی در این ابزارها عبارت‌اند از: ایجاد تشدید در جرم تنظیم شونده (میراگر جرمی و سیال تنظیم شونده)، ایجاد اصطکاک (میراگر اصطکاکی)، تسلیم ورق فولادی (میراگر فلزی تسلیم شونده)، حرکت یک پیستون در داخل محفظه‌ای که در آن مایع ویسکوز قرار دارد (میراگر ویسکوز الاستیک). همچنین میراگرها از دیدگاه دیگری به دو دسته‌ی وابسته به سرعت و وابسته به جابه‌جایی تقسیم‌بندی می‌شوند [۴۱].

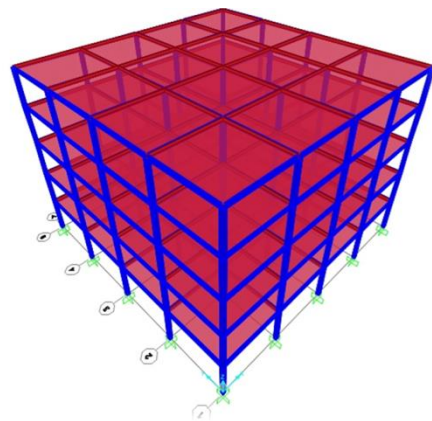
و  $E$ ،  $F_y$ ،  $F_u$  می‌باشد، به گونه‌ای که  $F_y = 2400 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$  و  $\gamma = 7850 \text{ (kg/m}^2\text{)}$  در نظر گرفته می‌شود. بار مرده و زنده‌ی طبقات به ترتیب برابر با ۵۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته می‌شوند. سقف‌ها از نوع کامپوزیت با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و مقاطع تیرها در تمام سازه‌ها IPE240 می‌باشند. همچنین مقاطع ستون‌ها در سازه ۵ طبقه Box200×200×20، در سازه ۱۰ طبقه در پنج طبقه‌ی اول Box250×250×20 و طبقه پنجم تا دهه Box200×200×20 می‌باشد و در سازه ۱۵ طبقه پنج طبقه اول Box300×300×25، طبقه پنجم تا دهه Box250×250×20 و طبقه ده تا پانزده Box200×200×20 استفاده شده است. لازم به ذکر است که سازه‌ها بر اساس روش حالت حدی مطابق با آیین‌نامه‌های فولاد ایران (مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان) و همچنین استاندارد ۲۸۰۰ طراحی شده‌اند. لازم به ذکر است که در این مقاله، اثرات  $P-\Delta$  و تغییر فرم‌دهی‌های بزرگ برای تمامی سازه‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که زمان‌های تناوب مربوط به سه مود اول ارتعاشی سازه‌های مورد بررسی در جدول‌های (۱) تا (۴) نشان داده شده است.

جدول (۱): فرکانس‌های طبیعی مربوط به سه مود اول ارتعاشی سازه‌های مورد مطالعه.

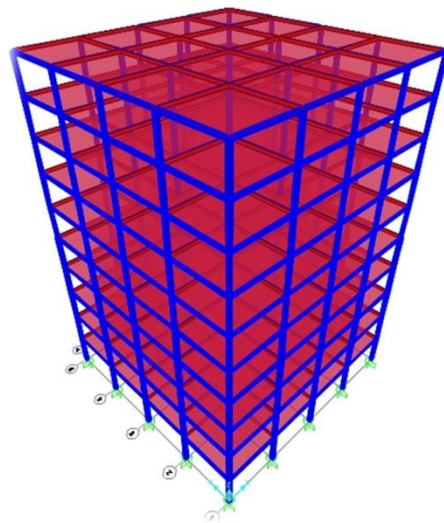
سازه‌ی مورد مطالعه	زمان تناوب مود اول (ثانیه)	زمان تناوب مود دوم (ثانیه)	زمان تناوب مود سوم (ثانیه)
پنج طبقه	۰/۹۰۹۸	۰/۹۰۹۸	۰/۸۷۸۲
ده طبقه	۱/۷۰۹۶	۱/۷۰۹۶	۱/۶۳۵
پانزده طبقه	۲/۲۳۹۱	۲/۲۳۹۱	۲/۱۶۵۹

جدول (۲): فرکانس‌های طبیعی مربوط به سه مود اول ارتعاشی سازه‌های کنترل شده با میراگر.

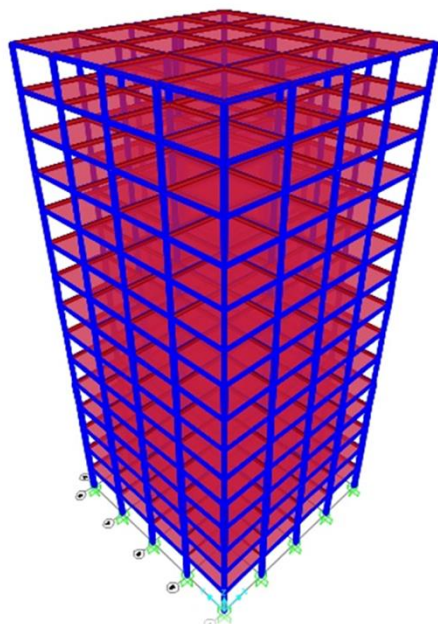
سازه‌ی مورد مطالعه	زمان تناوب مود اول (ثانیه)	زمان تناوب مود دوم (ثانیه)	زمان تناوب مود سوم (ثانیه)
پنج طبقه	۰/۸۲۲۴	۰/۷۷۸۲	۰/۷۵۸۳
ده طبقه	۱/۵۴۴۶	۱/۵۰۹۴	۱/۴۳۹۲
پانزده طبقه	۲/۱۰۰۷	۱/۶۸۳۸	۱/۵۳۱۷



(الف) مدل سه‌بعدی سازه‌ی پنج طبقه در نرم‌افزار SAP 2000



(ب) مدل سه‌بعدی سازه‌ی ده طبقه در نرم‌افزار SAP 2000



(پ) مدل سه‌بعدی سازه‌ی پانزده طبقه در نرم‌افزار SAP 2000

شکل (۴): سازه‌های مورد مطالعه.

جداسازی شده می‌باشد. در این رابطه تعیین زمان تناوب سازه‌ی جداسازی شده که در رابطه‌ی (۱) مورد نیاز است، در اختیار طراح است، اما برای کارایی بهتر جداگر باید رابطه (۲) نیز ارضا شود:

$$T_D \geq 3 \times T_f \quad (2)$$

به گونه‌ای که در رابطه (۲)،  $T_D$  زمان تناوب سازه‌ی جداسازی شده و  $T_f$  زمان تناوب سازه‌ی با پای گیردار است. لازم به ذکر است که در این تحقیق، مقدار زمان تناوب سازه‌ی جداسازی شده مطابق جدول (۱) و رابطه‌ی (۳)، سه برابر زمان تناوب طبیعی سازه‌ی با پای گیردار در نظر گرفته می‌شود.

به منظور تعیین تغییر مکان طرح، انرژی مستهلک شده در جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی و مساحت هسته سربی، با فرض میرایی  $\beta_{eff}$  و با توجه به جدول (۵)، تغییر مکان طرح با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۳۶].

جدول (۵): ضریب میرایی با توجه به درصد میرایی  $\beta$  [۳۶].

$B_1$	$B_8$	$\beta$ (درصد)
۰/۸	۰/۸	$\leq 2$
۱/۰	۱/۰	۵
۱/۲	۱/۳	۱۰
۱/۵	۱/۸	۲۰
۱/۷	۲/۳	۳۰
۱/۹	۲/۷	۴۰
۲/۰	۳/۰	$\geq 50$

همچنین مقدار تغییر مکان طرح ( $D_D$ ) مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۳۶]:

$$D_D = \frac{g}{4\pi^2} \times \frac{C_{VD} T_D}{B_1} \quad (3)$$

$$C_{VD} = A \times (S + 1) \times T_S^{\frac{2}{3}}$$

همچنین مطابق شکل (۵)، هر جداگر یک سختی اولیه ( $K_1$ ) و یک سختی ثانویه ( $K_2$ ) دارد که به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۴۴]:

جدول (۳): فرکانس‌های طبیعی مربوط به سه مود اول ارتعاشی سازه‌های کنترل شده با جداساز.

سازه‌ی مورد مطالعه	زمان تناوب مود اول (ثانیه)	زمان تناوب مود دوم (ثانیه)	زمان تناوب مود سوم (ثانیه)
پنج طبقه	۱/۸۶۷۶	۱/۸۶۷۶	۱/۷۱۷۹
ده طبقه	۳/۱۷۰۲	۳/۱۷۰۲	۲/۹۱۷۷
پانزده طبقه	۴/۲۵۲۹	۴/۲۵۲۹	۳/۹۳۰۷

جدول (۴): فرکانس‌های طبیعی مربوط به سه مود اول ارتعاشی سازه‌های کنترل شده با جداساز و میراگر.

سازه‌ی مورد مطالعه	زمان تناوب مود اول (ثانیه)	زمان تناوب مود دوم (ثانیه)	زمان تناوب مود سوم (ثانیه)
پنج طبقه	۱/۷۹۸۰	۱/۷۶۷۸	۱/۶۲۱۷
ده طبقه	۳/۰۸۸۴	۳/۰۶۱۶	۲/۸۰۷۴
پانزده طبقه	۴/۱۹۰۵	۴/۱۷۷۶	۳/۸۱۸۹

به منظور طراحی جداگر لرزه‌ای آیین‌نامه‌های مختلفی ارائه شده است. از جمله این آیین‌نامه‌ها می‌توان به AASHTO [۴۳] آیین‌نامه بزرگراه و حمل و نقل آمریکا، FEMA [۴۴] دستورالعمل سازمان مدیریت اضطراری فدرال آمریکا، ASCE [۴۵] آیین‌نامه انجمن مهندسين سازه آمریکا، UBC [۴۶] و آیین‌نامه ساختمان آمریکا، اشاره نمود. از مراجع داخلی نیز راهنمای طراحی و اجرای سیستم جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌ها (نشریه ۵۲۳) و همچنین دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰) را می‌توان نام برد.

در طراحی جداگر لرزه‌ای به پنج پارامتر نیاز می‌باشد که عبارتند از: ۱- سختی مؤثر جداگر  $k_{eff}$ ، ۲- میرایی مؤثر  $\beta_{eff}$ ، ۳- سختی اولیه جداگر، ۴- مقاومت تسلیم جداگر و ۵- نسبت سختی قبل از تسلیم به بعد از تسلیم جداگر.

به منظور تعیین سختی مؤثر مورد نیاز برای جداگر لرزه‌ای مورد استفاده در سازه، رابطه (۱) پیشنهاد شده است:

$$k_{eff} = \frac{W}{g} \left( \frac{2\pi}{T_D} \right)^2 \quad (1)$$

به گونه‌ای که در رابطه (۱)،  $W$  بار مرده به علاوه‌ی بار زنده‌ی وارد بر ستون،  $g$  شتاب ثقل و  $T_D$  مدت زمان تناوب سازه‌ی



میراگر مد نظر باشد، لازم است تا تدابیری اتخاذ شود که اثر نرمی فز از مدل حذف گردد. بدین منظور کافی است تا سختی فز به اندازه کافی بزرگ تعریف شود. به عنوان یک قاعده کلی اگر سختی به گونه‌ای اختیار شود که پارامتر  $X$  بین  $\frac{1}{100}$  تا  $\frac{1}{1000}$  معکوس فرکانس طبیعی سازه به دست آید، مقدار مربوطه مناسب خواهد بود [۴۲]. بنابراین خصوصیات میراگر ویسکوز و جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی که هر یک به صورت جداگانه بر روی سازه‌های مورد بررسی اضافه می‌شوند، به صورت زیر محاسبه می‌شوند. لازم به ذکر است که سیستم‌های کنترلی فوق در ادامه به صورت تکی و همچنین به صورت ترکیبی بر روی سازه‌های مورد مطالعه قرار گرفته و رفتار سازه‌های کنترل شده توسط آنها تحت بار جانبی بررسی می‌شود، جدول‌های (۶) و (۷).

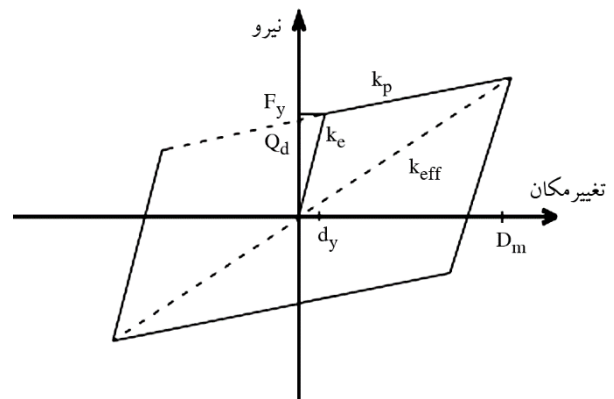
جدول (۶): خصوصیات میراگرهای ویسکوز طراحی شده مطابق با مرجع [۴۷].

Exponent Coefficient	C (kg.sec/m)	K (kg/m)	$\beta_{eff}$	نوع سازه
۱	۸۷۶۴۱۶/۸۸	۵/۵۷۲×۱۰ <sup>۸</sup>	۸۷۶۴۱۶/۸۸	۵ طبقه
۱	۶۰۰۶۲۷۴۱/۹۴	۲/۲۱۹×۱۰ <sup>۱۰</sup>	۶۰۰۶۲۷۴۱/۹۴	۱۰ طبقه
۱	۲۰۳۶۱۶۹۵	۵/۷۰۹×۱۰ <sup>۹</sup>	۲۰۳۶۱۶۹۵	۱۵ طبقه

جدول (۷): خصوصیات جداسازهای لاستیکی با هسته‌ی سربی طراحی شده مطابق با مرجع [۴۷].

$\frac{K_p}{K_e}$	$F_y$ (kg)	$K_e$ (kg/m)	$\beta_{eff}$ (kg.sec/m)	$K_{eff}$ (kg/m)	نوع سازه
۰/۱	۹۰۸۲/۷۱	۱۰۶۱۵۴۱/۴	۳۰۳۲۱۱/۸	۱۳۸۸۷۶/۰۲	۵ طبقه
۰/۱	۹۹۷۶/۰۲۷	۶۹۳۵۰۴/۶	۳۳۲۴۷۵/۴	۹۰۷۲۷/۶۶	۱۰ طبقه
۰/۱	۱۰۹۳۵	۵۵۰۰۹۴/۶	۳۵۸۲۱۶	۷۱۹۶۶/۰۴	۱۵ طبقه

مسائل مرتبط با انفجار جزو یکی از مهم‌ترین مباحث دینامیکی با نرخ کرنش بالا می‌باشند. برای شبیه‌سازی این دسته از مسائل، نرم‌افزارهای ویژه‌ای تدارک دیده شده است. تفاوت اصلی این نرم‌افزارها، توانایی ویژه آنها در شبیه‌سازی مسائلی است که به دلیل شدت بارهای وارده بر مواد، در آنها جامدات به صورت سیال



شکل (۵): منحنی هیستریزس در جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی [۴۴].

$$F_y = Q_d + K_2 D_y \quad (۴)$$

به گونه‌ای که در رابطه‌ی (۴)،  $Q_d$  نیروی تسلیم اولیه و  $D_y$  جابه‌جایی تسلیم می‌باشد.

همچنین برای به دست آوردن سختی اولیه و سختی ثانویه

جداگر از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$K_1 = \frac{F_y}{D_y} \quad (۵)$$

$$K_2 = K_{eff} - \frac{Q_d}{D_y} \quad (۶)$$

به منظور تعیین مشخصات میراگر ویسکوز خطی، در ابتدا

باید درصد میرایی بحرانی مطابق رابطه (۷) محاسبه شود:

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{T \sum_i C_i \cos^2 \theta_i \phi_{ij}^2}{4\pi \sum_i \frac{W_i}{g} \phi_r^2} \quad (۷)$$

به گونه‌ای که در رابطه (۷)،  $\beta$  نسبت میرایی بوده که در این مقاله مقدار ۵ درصد (مطابق استاندارد ۲۸۰۰) برای آن در نظر گرفته می‌شود،  $T$  زمان تناوب اصلی سازه بهسازی شده که در محاسبه آن سختی وسایل وابسته به سرعت نیز محسوب شده است،  $C_i$  ثابت میرایی وسیله زام،  $\theta_i$  زاویه شیب وسیله زام با افق،  $\phi_{ij}$  تغییر مکان نسبی بین دو انتهای وسیله زام در مود اول در جهت افقی،  $W_i$  وزن موجود طبقه  $i$ ام و  $\phi_i$  تغییر مکان طبقه  $i$ ام در مود اول سازه می‌باشد [۴۲].

لازم به ذکر است، در صورتی که رفتار میرایی محض از

از جمله کاربردهای گسترده این روش است [۴۸]. در روش ALE سعی شده است تا نقاط ضعف روش لاگرانژی و اوپلری برطرف شود. در واقع این روش تلفیقی از هر دو روش لاگرانژی و اوپلری است، به طوری که در المان‌های لاگرانژی در صورتی که تغییر فرم در آن از حدی بیشتر شود، با استفاده از روش اوپلری ماده درون سلول‌ها جابه‌جا شده و سپس با توجه به شکل جدید ماده، شبکه‌بندی جدید لاگرانژی ایجاد می‌شود. به این ترتیب می‌توان در تغییر فرم‌های زیاد پیش‌بینی خوبی از مرزهای ماده انجام داد [۴۸].

در این مقاله با بررسی اثر انفجار بر روی سازه در فضای آزاد، بایستی سه محیط هوا، ماده‌ی منفجره TNT و فولاد را معرفی نمود. یکی از قسمت‌های مهم کار با نرم‌افزار AUTODYN، ساخت مدل هندسی مسئله است. برای ساخت هر مدلی، باید نوع حل‌کننده‌ی آن مدل تعریف شود و مدل شبکه‌بندی شود. با توجه به نوع حل‌کننده‌ای که برای مدل انتخاب می‌شود، نرم‌افزار مدل‌سازی‌های مختلفی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. در این تحقیق، با توجه به اینکه TNT، سازه‌ی فولادی و هوا در یک مدل وجود دارند، و همچنین با توجه به اینکه در طول انفجار تغییر شکل هوا بسیار زیاد است، از حل‌کننده‌ی Euler و 3D Multi-material استفاده می‌شود. باید توجه داشت که هر مدل ساخته شده در نرم‌افزار بایستی مش‌بندی شود که در این تحقیق ابعاد مش هوا برابر با  $0.3 \times 0.3 \times 0.3$  می‌باشند. همچنین برای مدل‌سازی سازه‌ی فولادی از حل‌کننده‌ی لاگرانژی استفاده شده است. برای مدل‌سازی سازه در نرم‌افزار AUTODYN روش‌های مختلفی وجود دارد. روش معمول مدل‌سازی، تعریف تک‌تک تیرها و ستون‌ها و دال‌ها، با ابعاد مشخص و همچنین مشخص کردن مکان دقیق آن در نرم‌افزار است. پس از این مرحله، باید میان تیرها و ستون‌ها و دال‌هایی که در مجاور یکدیگر قرار دارند، اتصال برقرار شود (شکل ۶).

در این مقاله به منظور تعریف TNT، از حل‌کننده‌ی اوپلری استفاده می‌شود و با توجه به وزن ماده منفجره TNT و همچنین وزن مخصوص TNT تعداد مش‌های لازم برای ماده منفجره به دست می‌آید.

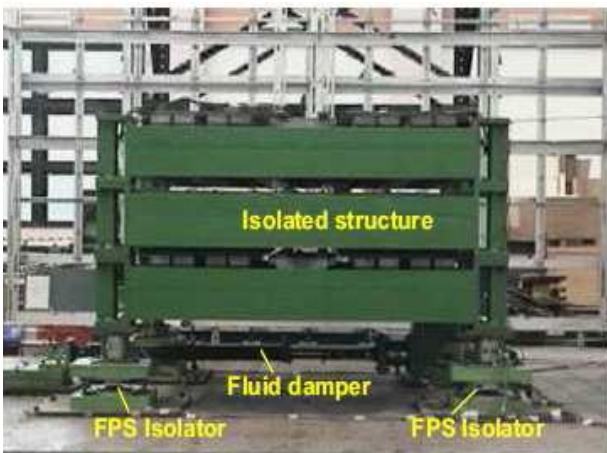
رفتار می‌کنند. این موضوع یکی از دلایل نام‌گذاری این دسته از نرم‌افزارها به نام هایدروکدها می‌باشد. از جمله کاربردهای این نرم‌افزار علاوه بر کاربرد گسترده آنها در صنایع نظامی، طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار و برخورد می‌باشد. تاکنون هایدروکدهای مختلفی معرفی شده است که از جمله آنها می‌توان به AUTODYN، LS-DYNA، PRONTO، EPIC و ... اشاره نمود. در این مقاله، از میان هایدروکدها، نرم‌افزار AUTODYN به دلیل قدرت بالا در حل مسائل با نرخ کرنش بالا استفاده می‌شود. در تحلیل مسائل با نرخ کرنش بالا در هایدروکدها، روش‌های عددی مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله این روش‌ها، روش لاگرانژی، روش اوپلری، روش ALE، روش SPH و روش المان مرزی است [۴۸].

روش لاگرانژی بر اساس تعقیب مسیر حرکت ذرات ماده می‌باشد؛ بدین معنا که ناظر به همراه ذره در حال حرکت است. این روش بهترین روش برای به دست آوردن تاریخچه حرکت ماده در طول تحلیل است. در این روش محیط به صورت شبکه المانی تقسیم شده است و نقاط گره‌ای این المان‌ها به ماده متصل هستند و در طول تحلیل، با تغییر شکل ماده، شبکه المان نیز تغییر می‌کند. بنابراین این روش قدرت بالایی در پیش‌بینی مرزهای ماده و همچنین سرعت جابه‌جایی مواد دارد. در مسائل دینامیکی که با تغییر فرم‌های بزرگ همراه است، استفاده از این روش احتمال ایجاد خطا در تحلیل را افزایش می‌دهد، به همین دلیل این روش در مدل‌سازی جامدات، که مواد دچار تغییر فرم کمتری می‌شوند گسترده‌تر است [۴۸].

در روش اوپلری برخلاف روش لاگرانژی، ناظر ساکن و ماده از کنار آن عبور می‌کند. همچنین شبکه‌بندی فضای محیط ثابت است. به همین دلیل این روش محدودیت روش لاگرانژی در تغییر فرم‌های بزرگ را نداشته و در شبیه‌سازی حرکت سیالات استفاده گسترده‌ای دارد. این موضوع باعث شده است که بیشتر فرمول‌های دینامیک سیالات محاسباتی بر مبنای این روش توسعه یافته باشد. نقطه ضعف این روش در پیش‌بینی مرزهای ماده است، به همین دلیل از این روش بیشتر برای تعیین نیرو و فشار ایجاد شده بر سازه استفاده می‌شود. شبیه‌سازی برهم‌کنش سیال و سازه

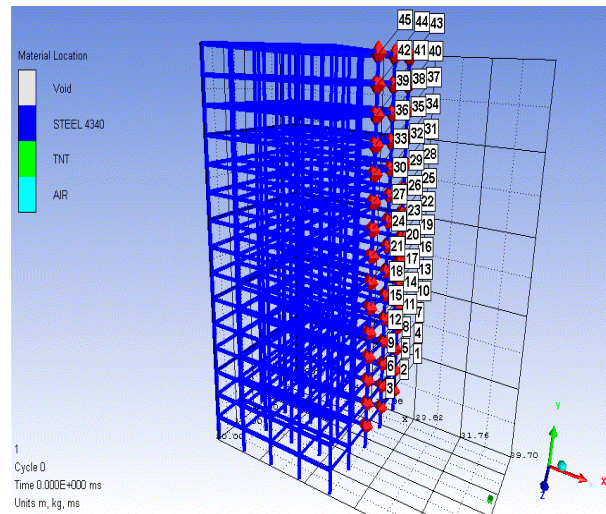
میراگرها، سازه‌ی جداسازی شده تحت بار زلزله مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن با نتایج به‌دست آمده از تحقیقات معتبر مقایسه شد. لو و همکاران [۴۹] با استفاده از میز لرزان، ارزیابی آزمایشگاهی اثر میرایی مکمل ویسکوز بر پاسخ لرزه‌ای سیستم جداسازی لغزشی در معرض تحریکات لرزه‌ای را بررسی نمودند. آنان نتیجه‌ی حاصل از آزمایشگاه را با نتیجه‌ی حاصل از مدل نرم‌افزاری مقایسه نمودند.

سازه جداسازی شده شامل سه طبقه و چهارستون بود و هر ستون بر روی یک جداساز لغزشی از نوع پاندولی اصطکاکی قرار گرفته بود. در این تحقیق از یک میراگر ویسکوز از نوع مایع درون سیستم جداسازی شده به‌منظور فراهم نمودن میرایی مکمل استفاده شده بود. این میراگر به میز لرزان و پایین سازه‌ی جداسازی شده وصل شده بود. مدل مورد آزمایش در شکل (۷) نشان داده شده است. در این آزمایش زمین‌لرزه امپریال‌ولی ۱۹۷۹ در کالیفرنیا با ماکزیمم شتاب  $0.4g$  به‌عنوان زمین‌لرزه‌ی حوزه نزدیک گسل استفاده شده بود و مؤلفه افقی تحریک لرزه‌ای در راستای محور طولی میراگر بر سازه اعمال شده بود.



شکل (۷): آزمایش میز لرزان [۴۹].

با مقایسه‌ی نتایج دریافت پایه مشخص است که کمینه و بیشینه مقدار دریافت پایه توسط لو و همکاران [۴۹] به ترتیب برابر  $0.0175$  و  $0.0123$  متر اعلام شده است و همین مقادیر در پژوهش حاضر و با استفاده از نرم‌افزار SAP 2000 به ترتیب



شکل (۶): ایجاد مدل سازه در نرم‌افزار AUTODYN.

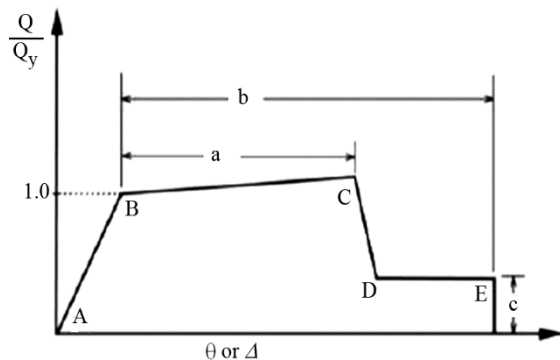
در این مقاله وزن مخصوص ماده‌ی منفجره TNT برابر  $1/63$  تن می‌باشد و ابعاد مش‌های هوا  $30 \times 30 \times 30$  سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شوند. حال اگر تعداد مش‌ها برابر ۶ در نظر گرفته شود، وزن TNT در تحقیق برابر ۲۶۴ کیلوگرم می‌باشد. در این مقاله، مقدار ۲۶۴ کیلوگرم TNT در فواصل ۲۰ و ۱۵ متری از سازه قرار داده می‌شود که برای حالات بارگذاری در نظر گرفته شده مقدار پارامتر مقیاس  $(Z = \frac{W}{R^{1/3}})$  به ترتیب برابر با  $97/26$  و  $107/05$  می‌باشند.

به‌منظور اینکه موج انفجار بتواند از صفحه‌های انتهایی مدل هوا خارج شود، باید شرایط مرزی مناسب را به آنان اختصاص داد. همچنین یکی از اصلی‌ترین قسمت‌های پیش از پردازش در نرم‌افزار AUTODYN تعریف نوع برهم‌کنش میان مدل‌های مختلف است. در حالت کلی دو نوع برهم‌کنش قابل تعریف است: ۱- برهم‌کنش دو حل‌کننده‌ی لاگرانژی که کاربرد آن بیشتر در مسائل نفوذ و برخورد است و ۲- برهم‌کنش دو حل‌کننده‌ی اویلری و لاگرانژی که در تحقیق حاضر استفاده می‌شود و بیشتر در برهم‌کنش سیال و سازه، و مباحث انفجار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۶- صحت‌سنجی

به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی جداگرهای لرزه‌ای و

السترو، مورگان هیل و پارک فیلد استفاده می شود. خصوصیات زلزله های مورد استفاده در جدول (۸) نمایش داده شده است. همچنین در این مقاله، با توجه به غیرخطی بودن تحلیل، باید مفاصل پلاستیک در تیرها و ستون ها از قبل تعریف شوند. در این مقاله، این مفاصل در ابتدا و انتهای المان های اصلی سازه و در فاصله ۵ درصد از طول کل المان از محل تکیه گاه تعریف می شوند. برای تعریف این مفاصل از آیین نامه FEMA 356 و همچنین نشریه ۳۶۰ استفاده شده است. بدین منظور، نمودار نیرو-تغییر مکان ارائه شده در FEMA 356 مطابق شکل (۹) استفاده می شود.

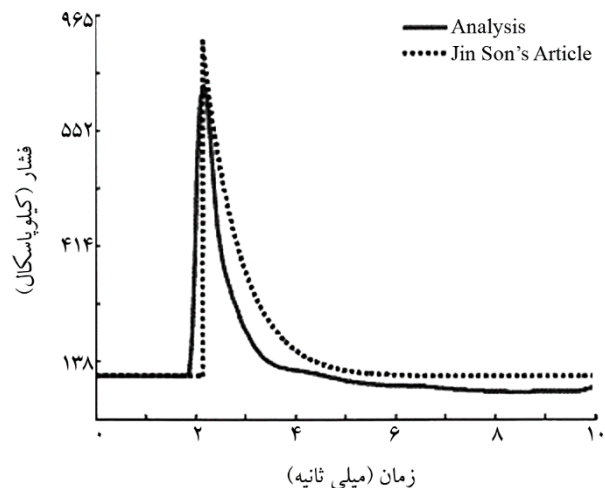


شکل (۹): نمودار نیرو-تغییر شکل ( $\theta$  یا  $\Delta$ ) در المان های سازه [۴۶].

## ۷-۱- مقایسه پیشینه تغییر مکان طبقات سازه ها تحت بار زلزله

نتایج حاصل از مقایسه پیشینه جابه جایی طبقات سازه با پایه ی گیردار و سازه های دارای مستهلک کننده تحت بار زلزله ی الاسترو مورد مطالعه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به این شکل به وضوح اثر مطلوب استفاده از میراگر ویسکوز به تنهایی در کاهش تغییر مکان نسبی طبقات نشان داده شده است.

برابر با ۰/۱۷۲ و ۰/۱۲۲ متر می باشند که به ترتیب با مقادیر ارائه شده در مرجع [۴۹] ۱/۷۱ درصد و ۰/۵۷ درصد اختلاف دارند. این نتایج نشان از دقت بالای مدل سازی دارد.



شکل (۸): مقایسه ی نمودار تاریخچه زمانی فشار حاصل از انفجار ماده ی منفجره با استفاده از نرم افزار اتوداین و مرجع [۵۰].

همچنین به منظور بررسی صحت عملکرد نرم افزار اتوداین در محاسبه ی فشار ناشی از انفجار، فشار حاصل از انفجار در فاصله مشخصی محاسبه شده و با نتایج تجربی ای که توسط سون و لی [۵۰] منتشر شده است، مقایسه انجام می گیرد. شکل (۸) نمودار تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار ۴۵/۴ کیلوگرم TNT در فاصله ۳۸۱ سانتی متری از مرکز انفجار را نشان می دهد. نتایج نشان از دقت بالای مدل سازی انفجار را دارد.

## ۷-۲- تحلیل سازه و ارائه ی نتایج

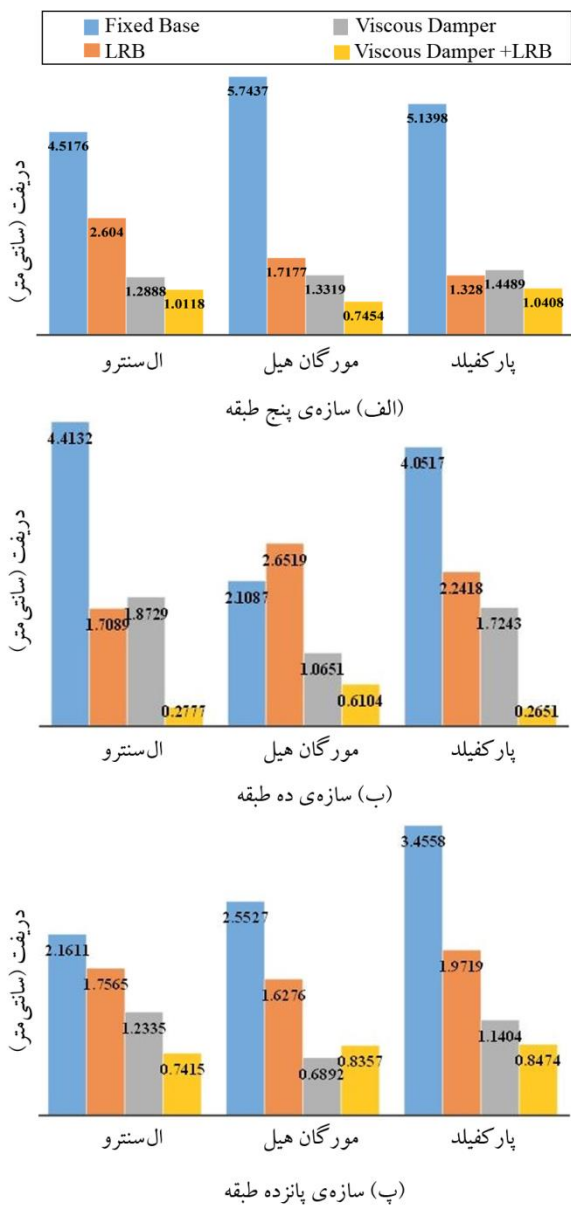
در این مقاله، به منظور تحلیل سازه در برابر زلزله، از زلزله های

جدول (۸): خصوصیات زلزله های مورد مطالعه.

Mean Period (ثانیه)	$I_a$ (متر بر ثانیه)	PGA/PGV (g در ثانیه بر متر)	PGV (متر بر ثانیه)	PGA (متر بر مجذور ثانیه)	مؤلفه	نام زلزله
۰/۴۲	۱/۶۳	۰/۸۵	۰/۴۴۵۶	۳/۷۲	۰	السترو
۰/۴۵	۲	۱/۰۲	۰/۳۶	۳/۶۰	۹۰	
۰/۴۸	۰/۷۷	۲/۰۵	۰/۱۷	۳/۴۲	۰	مورگان هیل
۰/۵۵	۰/۷۲	۱/۱۸	۰/۱۹	۲/۲۰	۹۰	
۰/۳۸	۰/۳۸	۲/۴۷	۰/۱۱	۲/۶۶	۰	پارک فیلد
۰/۴	۰/۳۲	۲/۲۵	۰/۱۱	۲/۴۳	۹۰	

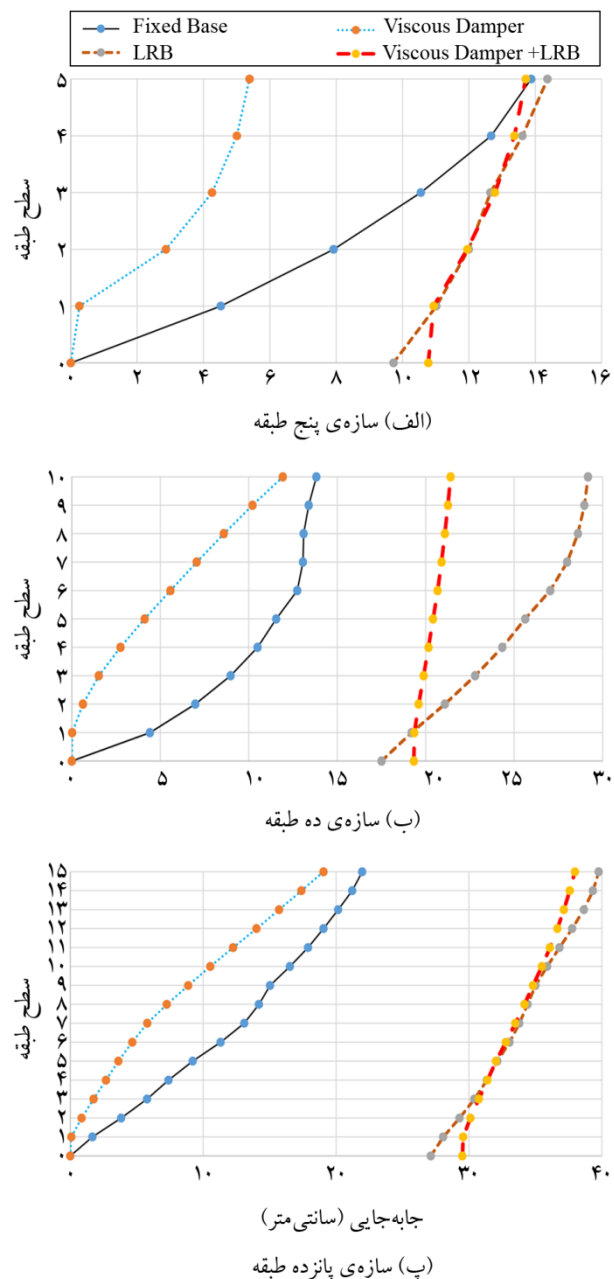
## ۲-۷- مقایسه‌ی دریفت طبقات سازه‌ها تحت زلزله‌های مورد مطالعه

شکل (۱۱) نیز مقدار بیشینه دریفت طبقات سازه‌های مورد مطالعه را تحت زلزله‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. مشخص است که استفاده از میراگر ویسکوز به همراه جداساز لرزه‌ای سبب بیشترین کاهش دریفت سازه تحت اثر بار زلزله شده است. همچنین استفاده از جداساز و میراگر به‌تنهایی نیز برای تمامی سازه‌های مورد مطالعه کاهش دریفت را نسبت به سازه‌ی بدون میراگر و جداساز (سازه‌ی با پای گیردار) به دنبال داشته است.



شکل (۱۱): مقایسه دریفت سازه‌های مختلف تحت زلزله‌ی مورد مطالعه.

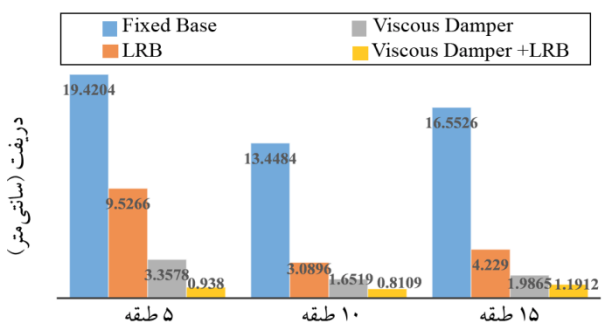
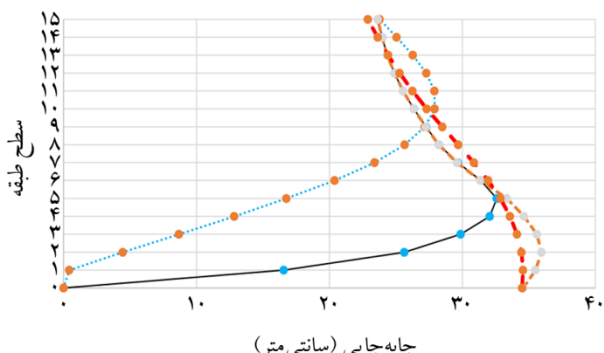
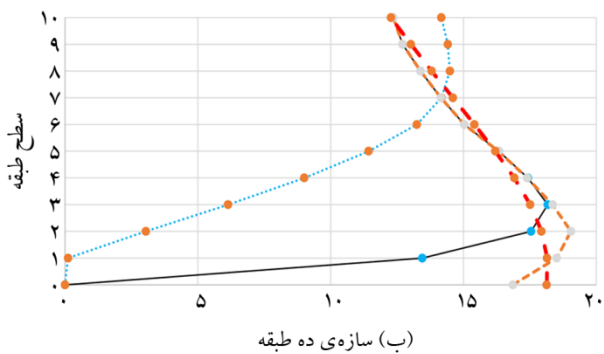
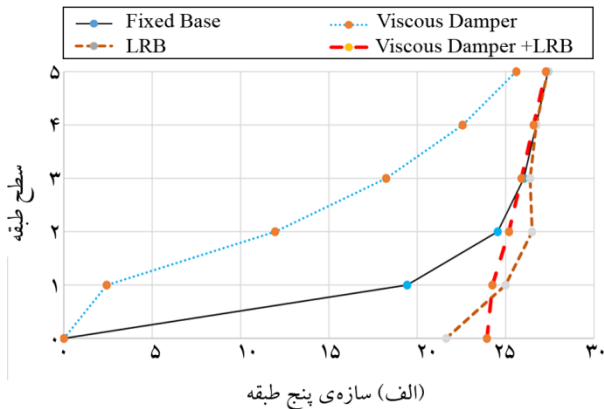
با توجه به شکل (۱۰) مشخص است در تمامی سازه‌های مورد مطالعه و تحت زلزله‌ی ال سترو، در سازه‌ی با پای گیردار (سازه‌ی بدون جداساز و میراگر) میزان جابه‌جایی طبقات بیشتری نسبت به سازه‌ی مجهز شده به میراگر ویسکوز مشاهده می‌شود. همچنین در سازه‌های مجهز به جداساز و ترکیب جداساز و میراگر ویسکوز جابه‌جایی طبقات بیشتری نسبت به سازه‌ی با پای گیردار مشاهده می‌شود.



شکل (۱۰): مقایسه‌ی بیشینه جابه‌جایی طبقات سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی ال سترو.



پانزده و بیست متری از سازه بیشترین میزان کاهش دریافت را در مقایسه با سازه با پای گیردار (بدون میراگر و جداساز) تجربه نموده‌اند.



(ت) مقایسه دریافت سازه‌های مختلف تحت بار انفجار در فاصله‌ی پانزده متری از سازه (شکل ۱۲): مقایسه بیشینه جابه‌جایی و دریافت سازه‌های مختلف تحت بار انفجار در فاصله‌ی پانزده متری از سازه‌ها.

به‌عنوان مثال در سازه‌ی پانزده طبقه و تحت زلزله‌ی پارک‌فیلد، بیشینه مقدار دریافت طبقات در سازه‌ی با استفاده از میراگر ویسکوز و جداساز نسبت به سازه‌ی با پای گیردار (بدون جداساز و میراگر ویسکوز) ۷۵/۴۸ درصد کاهش یافته است.

### ۲-۳-۲-۳- مقایسه‌ی بیشینه تغییر مکان طبقات سازه‌ها تحت بار

#### انفجار در فواصل ۱۵ و ۲۰ متری از سازه

#### ۲-۳-۲-۱- انفجار در فاصله‌ی پانزده متری از سازه

شکل (۱۲) میزان تغییر مکان نسبی و جابه‌جایی طبقات سازه تحت بار انفجار در فاصله‌ی پانزده متری از سازه را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۱۲) مشخص است که سازه‌ی کنترل شده با استفاده از میراگر ویسکوز در ترکیب با جداساز پایه بیشترین میزان کاهش جابه‌جایی در طبقات سازه را تحت بار انفجار در فاصله‌ی پانزده متری از سازه نشان می‌دهد. همچنین مشخص است که به ترتیب سازه‌ی کنترل شده با استفاده از ترکیب میراگر ویسکوز و جداساز، جداساز و نهایتاً میراگر ویسکوز تحت بار انفجار در فاصله پانزده متری از سازه بیشترین میزان کاهش دریافت را نسبت به سازه با پای گیردار (سازه‌ی بدون جداساز و میراگر) تجربه نموده‌اند. به‌عنوان مثال در سازه‌ی پانزده طبقه تحت انفجار در فاصله‌ی پانزده متری از سازه، بیشینه مقدار دریافت طبقات در سازه‌ی با استفاده از میراگر ویسکوز و جداساز نسبت به سازه‌ی با پای گیردار (بدون جداساز و میراگر ویسکوز) ۹۲/۸۰ درصد کاهش یافته است.

#### ۲-۳-۲-۲- انفجار در فاصله‌ی بیست متری از سازه

شکل (۱۳) نیز میزان تغییر مکان نسبی و جابه‌جایی طبقات سازه تحت بار انفجار در فاصله‌ی بیست متری از سازه نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۱۳) مشخص است که سازه‌ی کنترل شده با استفاده از میراگر ویسکوز بیشترین میزان کاهش جابه‌جایی در طبقات سازه را تحت بار انفجار در فاصله‌ی بیست متری از سازه نشان می‌دهد. همچنین با توجه به جدول (۹) مشخص است که به ترتیب سازه‌ی کنترل شده با استفاده از ترکیب میراگر ویسکوز و جداساز، جداساز و در نهایت میراگر ویسکوز تحت بار انفجار در هر دو فاصله

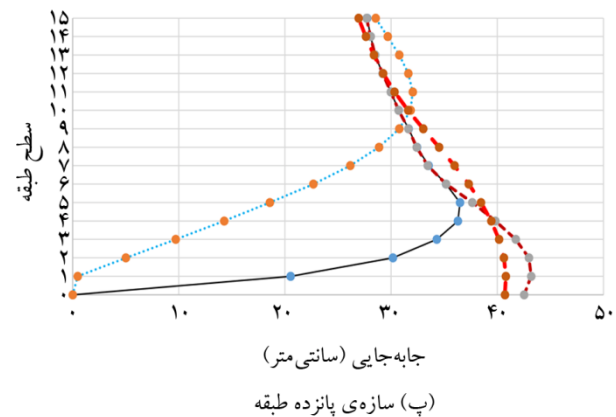
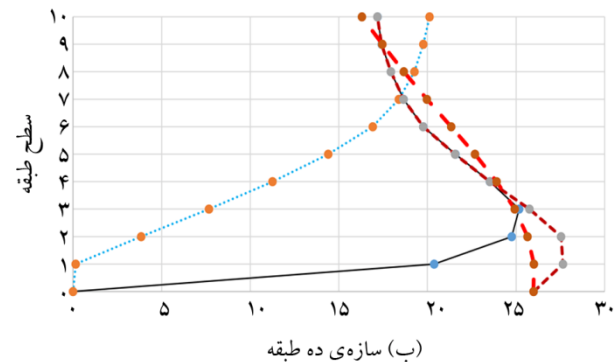
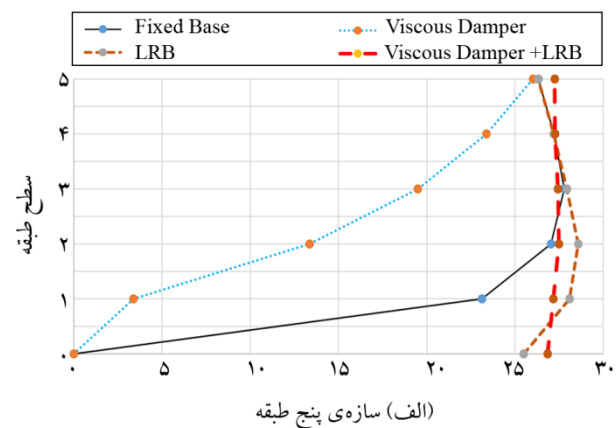
جدول (۹): مقایسه‌ی دریفت در سازه‌های تحت بار انفجار در فواصل ۱۵ و ۲۰ متری از سازه.

فاصله انفجار تا سازه				نوع سازه
۲۰ (متر)		۱۵ (متر)		
نسبت بیشینه دریفت طبقات در سازه‌ی کنترل شده نسبت به سازه‌ی با پای گیردار	بیشینه دریفت طبقات (متر بر متر)	نسبت بیشینه دریفت طبقات در سازه‌ی کنترل شده نسبت به سازه‌ی با پای گیردار	بیشینه دریفت طبقات (متر بر متر)	
۱	۲۳/۱۲۹۹	۱	۱۹/۴۲۰۴	Fixed Base
۰/۴۳	۹/۹۸۱۹	۰/۴۹	۹/۵۲۶۶	Viscous Damper
۰/۱۱	۲/۵۹۹۸	۰/۱۷	۳/۳۵۷۸	LRB
۰/۰۱۴	۰/۳۲۷	۰/۰۴۸	۰/۹۳۸	Viscous Damper + LRB

به‌عنوان مثال در سازه‌ی پنج طبقه تحت انفجار در فاصله‌ی بیست‌متری از سازه، بیشینه مقدار دریفت طبقات در سازه‌ی با استفاده از میراگر ویسکوز و جداساز نسبت به سازه‌ی با پای گیردار (بدون جداساز و میراگر ویسکوز) ۹۸/۵۸ درصد کاهش یافته است. همچنین در سازه‌ی پنج طبقه تحت انفجار در فاصله‌ی پانزده متری از سازه، بیشینه مقدار دریفت طبقات در سازه‌ی با استفاده از میراگر ویسکوز و جداساز نسبت به سازه‌ی با پای گیردار (بدون جداساز و میراگر ویسکوز) ۹۵/۱۷ درصد کاهش یافته است.

#### ۷-۴- مقایسه برش پایه سازه تحت بار انفجار

به منظور بررسی تأثیر سیستم‌های کنترلی بر مقدار برش پایه‌ی سازه‌های مختلف، مقدار برش پایه تحت بار انفجار برای سازه‌های مختلف مورد مطالعه در جدول (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به این جدول مشخص است که استفاده از جداگر به تنهایی می‌تواند باعث بیشترین مقدار کاهش در برش پایه‌ی سازه نسبت به سازه‌ی با پای گیردار (سازه‌ی بدون میراگر و جداساز) شود. به‌عنوان مثال در سازه‌ی پنج طبقه تحت انفجار در فاصله‌ی بیست‌متری از سازه، مقدار برش پایه در سازه‌ی با استفاده از میراگر ویسکوز و جداساز نسبت به سازه‌ی با پای گیردار (بدون جداساز و میراگر ویسکوز) ۱۶/۰۶ درصد کاهش یافته است. همچنین در سازه‌ی پنج طبقه تحت انفجار در فاصله‌ی پانزده متری از سازه، مقدار برش پایه در سازه‌ی با استفاده از میراگر ویسکوز و جداساز نسبت به سازه‌ی با پای گیردار (بدون جداساز و میراگر ویسکوز) ۳۶/۱۹ درصد کاهش یافته است.



شکل (۱۳): مقایسه بیشینه جابه‌جایی و دریفت سازه‌های مختلف تحت بار انفجار در فاصله‌ی بیست‌متری از سازه.

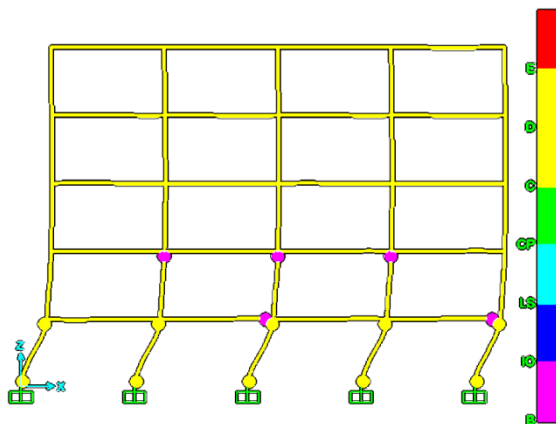
جدول (۱۰): مقایسه‌ی برش پایه در سازه‌های تحت بار انفجار در فواصل ۱۵ و ۲۰ متری از سازه.

فاصله انفجار تا سازه				نوع سازه
۲۰ (متر)		۱۵ (متر)		
قدر مطلق نسبت برش پایه در سازه‌ی کنترل شده نسبت به سازه‌ی با پای گیردار	قدر مطلق برش پایه (کیلو نیوتن)	قدر مطلق نسبت برش پایه در سازه‌ی با پای گیردار	قدر مطلق برش پایه (کیلو نیوتن)	
۱	۱۰۹۲/۱۳۱	۱	۱۳۱۵/۹۶۶	Fixed Base
۱/۸۹	۲۰۶۸/۰۱۴	۱/۱۰۱	۱۴۴۸/۹۸۵	Viscous Damper
۰/۸۰۷	۸۸۰/۹۴۱	۰/۵۹	۷۷۸/۴۲۶	LRB
۰/۸۳۹	۹۱۶/۷۴۱	۰/۶۴	۸۳۹/۷۳۵	Viscous Damper + LRB

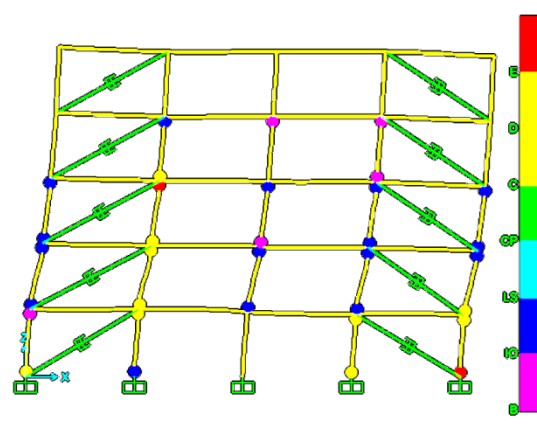
ویسکوز، مفاصل پلاستیک در طبقات ابتدایی سازه بهبود یافته و تعداد مفاصل پلاستیک در طبقات بالا افزایش می‌یابد، همچنین استفاده از جداگر لاستیکی با هسته‌ی سریبی مناسب در سازه‌ی تحت بار انفجار، سبب بهبود تشکیل مفاصل شده و ترکیب میراگر و جداگر منجر به عدم ایجاد مفصل در سازه‌های تحت بار انفجار در فواصل ۱۵ و ۲۰ متری از سازه شده است.

### ۵-۷- مقایسه مفاصل پلاستیک در سازه‌های مورد مطالعه تحت بار انفجار

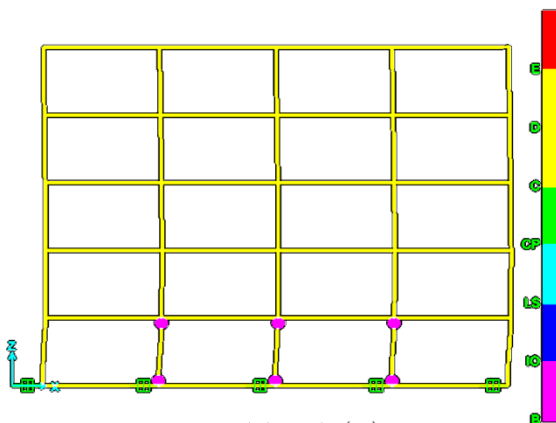
شکل (۱۴) مفاصل تشکیل شده در سازه با پایه‌ی ثابت (سازه‌ی بدون میراگر و جداساز) و همچنین سازه‌های دارای مستهلک کننده را تحت بار انفجار نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۴) می‌توان نتیجه گرفت، در صورت استفاده از میراگر



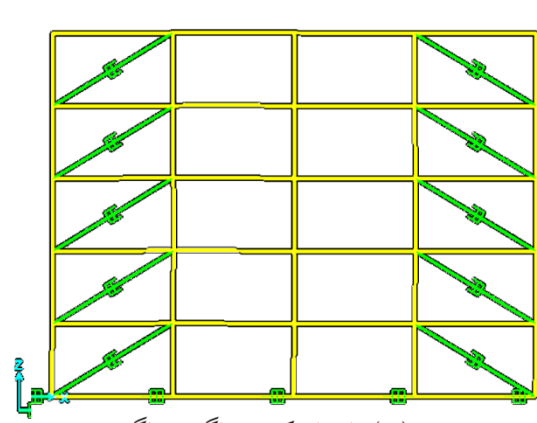
(ب) سازه با پایه ثابت



(الف) سازه با میراگر



(ت) سازه جداسازی شده



(پ) سازه با ترکیب جداگر و میراگر

شکل (۱۴): مقایسه مفاصل تشکیل شده در سازه ۵ طبقه با پایه ثابت و سازه‌های دارای مستهلک کننده.

## ۸- نتیجه‌گیری

- استفاده هم‌زمان از جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی و میراگر ویسکوز سطح عملکرد سازه را بهبود بخشیده است و هیچ‌گونه مفصل پلاستیکی در سازه تشکیل نشده است.  
- بنابراین با توجه به نتایج فوق مشخص است که استفاده از سیستم ترکیبی جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی و میراگر ویسکوز می‌تواند سبب طراحی ایمن‌تر سازه‌های فولادی تحت بار انفجار شود.

## مراجع

1. Magnussa, N.M. and Morrill, K. (2008) Fast running model for the residual capacity of steel columns damaged by blast and fragment loads. *Proceedings of the 79<sup>th</sup> Shock and Vibration Symposium*, Orlando, FLorida.
2. Baker, J.F., Williams, E.L., and Lax, D. (1948) The design of framed buildings against high-explosive bombs. *The Civil Engineer in War: A Symposium of Papers on War-Time Engineering Problems*, **3**, 80-112.
3. Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., and Ramsay, J. (2007) Blast loading and blast effects on structures-an overview. *Electronic Journal of Structural Engineering*. **7**(S1), 76-91.
4. Mills, C. (1987) The design of concrete structure to resist explosions and weapon effects. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Concrete for Hazard Protections*, Edinburgh, UK. 61-73.
5. Son, J., Astaneh-Asl, A., and Rutner, M. (2005) Performance of bridge decks subjected to blast load. *The 6<sup>th</sup> Japanese-German Bridge Symposium*, Munich, Germany, **29**(1), 9.
6. Luccioni, B.M. and Luege, M. (2006) Concrete pavement slab under blast loads. *International Journal of Impact Engineering*, **32**(8), 1248-1266.
7. Shi, Y., Hao, H., and Li, Z.-X. (2008) Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads. *International Journal of Impact Engineering*, **35**(11), 1213-1227.
8. Luccioni, B., Ambrosini, R., and Danesi, R. (2004) Analysis of building collapse under blast loads. *Engineering Structures*, **26**(1), 63-71.

در این مقاله، پاسخ سه سازه‌ی پنج، ده و پانزده طبقه تحت بار زلزله و همچنین بار انفجار با پای گیردار و همچنین پای جداسازی شده با استفاده از جداگرهای لاستیکی با هسته‌ی سربی، میراگر ویسکوز و جداگر همراه با میراگر مورد بررسی قرار گرفت. بارهای انفجار ناشی از انفجار سطحی ۲۶۴ کیلوگرم TNT در فواصل ۱۵ و ۲۰ متری از سازه می‌باشند. فشار ناشی از انفجار به صورت تاریخچه زمانی و با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN برای سازه‌های پنج، ده و پانزده طبقه به ترتیب در بیست و پنج، پنجاه و همچنین هفتاد و پنج نقطه‌ی مختلف از سازه‌ها با فرض وجود سازه‌های مجاور محاسبه می‌شود و بر سازه‌های مورد بررسی اعمال می‌شود. در نهایت نیز با استفاده از نرم‌افزار SAP 2000 سازه‌ها تحلیل می‌شوند و مقادیر تغییر مکان نسبی طبقات، دررفت، برش پایه و مفاصل پلاستیک ایجاد شده در اعضای سازه با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که:  
- تغییر مکان نسبی طبقات سازه تحت انفجار در حالتی که از سیستم میراگر ویسکوز به تنهایی استفاده شده است به میزان قابل توجهی (۸۲/۷ درصد) کاهش یافته است.  
- برش پایه سازه‌ی کنترل شده با استفاده از سیستم جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی تحت بار انفجار ۴۰/۸۵ درصد نسبت به سازه‌ی بدون کنترل کاهش یافته است. همچنین این مقدار در سیستم ترکیبی جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی و میراگر ویسکوز ۳۶/۱۹ درصد کاهش یافته است.  
- استفاده از سیستم ترکیبی جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی و میراگر ویسکوز در سازه‌های کوتاه مرتبه، دررفت سازه را ۹۵/۱۷ درصد کاهش داده است.  
- در سازه‌های مدل‌سازی شده با استفاده از میراگر ویسکوز به تنهایی برش پایه افزایش یافته است، این افزایش برای حالت انفجار در ۲۰ متر ۸۹/۳۵ درصد بوده است، این در حالی است که استفاده از جداگر لاستیکی با هسته‌ی سربی منجر به کاهش ۱۹/۳۳ درصد تا ۴۰/۸۴ درصدی برش پایه در سازه شده است.

19. Kamgar, R. and Khatibinia, M. (2017) Multi-objective optimization design of tuned mass damper system subjected to critical excitation. *Modares Civil Engineering Journal*, **17**(4), 153-164.
20. Kamgar, R., Khatibinia, M., and Khatibinia, M. (2019) Optimization criteria for design of tuned mass dampers including soil-structure interaction effect. *International Journal of Optimization In Civil Engineering*, **9**(2), 213-232.
21. Kamgar, R., Samea, P., and Khatibinia, M. (2018) Optimizing parameters of tuned mass damper subjected to critical earthquake. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **27**(7), e1460.
22. Khatibinia, M., Gholami, H., and Kamgar, R. (2018) Optimal design of tuned mass dampers subjected to continuous stationary critical excitation. *International Journal of Dynamics and Control*, **6**(3), 1094-1104.
23. Akehashi, H. and Takewaki, I. (2019) Optimal viscous damper placement for elastic-plastic MDOF structures under critical double impulse. *Frontiers in Built Environment*, **5**, 1-17.
24. Hamaguchi, H., Wake, T., Yamamoto, M. and Kikuchi, M. (2019) Practical application of lead rubber bearings with fail-safe mechanism. *Japan Architectural Review*, **2**(3), 323-339.
25. Furtmüller, T., Di Matteo, A., Adam, C., and Pirrotta, A. (2019) Base-isolated structure equipped with tuned liquid column damper: an experimental study. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **116**, 816-831.
26. Jahanshahi, M.R., Rahgozar, R., and Malekinejad, M. (2012) A simple approach to static analysis of tall buildings with a combined tube-in-tube and outrigger-belt truss system subjected to lateral loading. *International Journal of Engineering*, **25**(3), 289-299.
27. Kamgar, R. and Rahgozar, R. (2017) Determination of optimum location for flexible outrigger systems in tall buildings with constant cross section consisting of framed tube, shear core, belt truss and outrigger system using energy method. *Inter-national Journal of Steel Structures*, **17**(1), 1-8.
28. Malekinejad, M. and Rahgozar, R. (2011) Free
9. Hao, H., Wu, C., Li, Z., and Abdullah, A. (2006) Numerical analysis of structural progressive collapse to blast loads. *Transactions of Tianjin University*, 31-34.
10. Hao, H. (2010) A simple numerical approach to predict structure responses to blast loading. *The First International Conference of Protective Structures*, Manchester, UK.
11. Li, J. and Hao, H. (2011) A two-step numerical method for efficient analysis of structural response to blast load. *International Journal of Protective Structures*. **2**(1), 103-126.
12. Kamgar, R. and Shams, G.R. (2018) Effect of blast load in nonlinear dynamic response of the buckling restrained braces core. *The Scientific Journal of Passive Defence Science and Technology*, **9**(1), 107-118.
13. Tavakoli, R., Kamgar, R., and Rahgozar, R. (2018) The best location of belt truss system in tall buildings using multiple criteria subjected to blast loading. *Civil Engineering Journal*, **4**(6), 1338-1353.
14. Boheirae, M., Biglari, M., and Ashayeri, I. (2015) Numerical assessment of explicit dynamic analysis of structures in severe loading (case study of three concrete slabs). *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **2**, 13-23 (in Persian).
15. Amini, M., Shojaee, S., and Rostami, S. (2015) Inelastic dynamic analysis of structures under blast loads using generalized B-Spline method. *Asian Journal of Civil Engineering*, **16**(2), 183-202.
16. Habibi, A.R. and Khaledy, N. (2015) Evaluating rectangular loading pattern in nonlinear analysis of composite bridges under blast. *Asian Journal of Civil Engineering*, **26**(2), 67-84.
17. Khaledy, N., Habibi, A., and Memarzadeh, P. (2018) A Comparison between different techniques for optimum design of steel frames subjected to blast. *Latin American Journal of Solids and Structures*, **15**(9), e106.
18. Khaledy, N., Habibi, A., and Memarzadeh, P. (2019) Minimum weight and drift design of steel moment frames subjected to blast. *International Journal of Optimization In Civil Engineering*, **9**(1), 39-63.



39. Zhang, R. and Phillips, B.M. (2016) Performance and protection of base-isolated structures under blast loading. *Journal of Engineering Mechanics*, **142**(1), 04015063.
40. Bangash, T. (2006) *Explosion-Resistant Buildings: Design, Analysis, and Case Studies*. Springer Science & Business Media.
41. Soong, T.T. and Dargush, G.F. (1998) *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. John Wiley & Sons, New York.
42. Sepehri, A. (2017) *Analysis and design of seismic dampers and isolators based on ASCE7-10 in SAP2000, Prform 3D and OpenSees*. Civil Science, Tehran, Iran (in Persian).
43. AASHTO (1999) *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, USA.
44. FEMA 451 (2006) *NEHRP Recommended Provisions: Design Examples Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency of the Department of Homeland Security*, Washington, D.C.
45. ASCE/SEI 7-10 (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers, USA.
46. FEMA 356 (2000) *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Federal Emergency Management Agency, Virginia, USA.
47. FEMA P-1051 (2016) *2015 NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples*. Prepared by the Building Seismic Safety Council of the National Institute of Building Sciences, Washington, DC.
48. Daryan, A.S. and Jalili, S. (2012) *Blast and Impact Engineering with AUTODYN Applications*. Daryan Engineers Publications, Tehran, Iran (in Persian).
49. Lu, L.-Y., Lin, C.-C., and Lin, G.-L. (2013) Experimental evaluation of supplemental viscous damping for a sliding isolation system under pulse-like base excitations. *Journal of Sound and Vibration*, **332**(8), 1982-1999.
50. Son, J. and Lee, H.-J. (2011) Performance of cable-stayed bridge pylons subjected to blast loading. *Engineering Structures*, **33**(4), 1133-1148.
- vibration analysis of tall buildings with outrigger-belt truss system. *Earthquakes and Structures*, **2**(1), 89-107.
29. Mohammadnejad, M. and Haji Kazemi, H. (2017) Dynamic response analysis of a combined system of framed tubed, shear core and outrigger-belt truss. *Asian Journal of Civil Engineering*, **18**(8), 1211-1228.
30. Rahgozar, P. (2020) Free vibration of tall buildings using energy method and Hamilton's Principle. *Civil Engineering Journal*, **6**(5), 945-953.
31. Asher, J., Young, R.P., and Ewing, R. (1996) Seismic isolation design of the San Bernardino country medical center replacement project. *Journal of Structural Design of Tall Buildings*, **5**, 265-279.
32. Inaudi. J.A. and Kelly, J.M. (1993) Optimum damping in linear isolation systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22**(7), 583-598.
33. Ramallo, J., Johnson, E., and Spencer Jr, B. (2002) "Smart" base isolation systems. *Journal of Engineering Mechanics*, **128**(10), 1088-1099.
34. Schmitendorf, W.E., Jabbari, F., and Yang, J.N. (1994) Robust control techniques for buildings under earthquake excitation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **23**, 539-552.
35. Mondal, P.D., Ghosh, A., and Chakraborty, S. (2014) Fluid viscous damper in mitigation of structural vibration effect due to underground blast. *International Journal of Materials and Structural Integrity*, **8**(4), 273-290.
36. Mondal, P.D., Ghosh, A.D. and Chakraborty, S. (2017) Performances of various base isolation systems in mitigation of structural vibration due to underground blast induced ground motion. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **17**(04), 1750043.
37. Kangda, M.Z. and Bakre, S. (2018) The effect of LRB parameters on structural responses for blast and seismic loads. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **43**(4), 1761-1776.
38. Kangda, M.Z. and Bakre, S. (2019) Positive-phase blast effects on base-isolated structures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **44**(5), 4971-4992.

## Performance of Lead Core Rubber Bearing and Viscous Damper in Steel Structures

Reza Kamgar<sup>1</sup>, Raheleh Dehghan<sup>2</sup>, and Reza Rahgozar<sup>3\*</sup>

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
2. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
3. Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran,  
\*Corresponding Author, email: rahgozar@uk.ac.ir

In recent years, the use of seismic isolators and dampers in protecting important structures against earthquake or explosion loads have increased dramatically. Increase in terrorist attacks have motivated many researchers in studying the effects of explosive load on structures. This paper presents the dynamic response of three structures (i.e., five, ten, and fifteen-story buildings) with fixed base, isolated using lead core rubber bearing and viscous dampers subjected to earthquake and explosion loads. For this purpose, the intended explosion load is considered to be due to the surface explosion of 264 kg of TNT at distances of fifteen and twenty meters from the structure. The pressure load that should be applied to the structures is computed at different points of the considered structures using the AUTODYN software. Finally, the structures are analyzed using SAP 2000 software, and the values of relative displacement, drift ratio, base shear, and plastic joints created in structure's members are computed for all controlled and uncontrolled structures. The results show that relative displacement values in a structure with viscous dampers are significantly reduced (82.7%) for blast loading. Base shear reduces by 40.85% in structures using rubber separator system with lead core rubber bearing system, and it is reduced by 36.19% for structures using the combination of lead core rubber bearing system and viscous damper. The results show that the use of a combined system in the low-rise structures has reduced the structure's drift ratio by 95.17%. For the structures controlled with the viscous dampers, the base shear is increased. This increase was 89.35% for the controlled structure subjected to the blast load at a distance of 20 m from the structure. In contrast, the use of a lead core rubber bearing system resulted in a decrease of 33.19% to 40.84% of the base shear in the controlled structures. The results indicate that the simultaneous use of lead core rubber bearing system and viscous damper improves structure's performance level, and no plastic joints were formed in structures studied. Therefore, according to the above results, it is clear that use of a combined system consisting of lead core rubber bearing system and viscous damper can lead to a safer design of steel structures subjected to the blast load.

**Keywords:** Lead Core Rubber Bearing; Viscous Damper; Surface Explosion; Steel Structure; Nonlinear Analysis.