

مقایسه‌ی عملکرد سازه‌های بتنی بهسازی شده با جداگر لرزه‌یی یا میراگر سیال ویسکوز در برابر بار انفجار

امیرحسین حاجیان شهری (دانشجوی کارشناسی ارشد)

سید مهدی زهرایی* (استاد)

دانشکده عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۸ (۱۳۹۸)
دوره ۲ - ۳۵، شماره ۱/۳، ص. ۱۱۳-۱۲۲، (پادداست فنی)

امروزه با توجه به افزایش حملات تروریستی در نزدیکی ساختمان‌های با اهمیت بالا و مراکز دولتی حساس، طراحی ساختمان‌ها در برابر بارهای ضربه‌یی و به طور مشخص انفجار، اهمیت ویژه‌یی دارد. در نوشتار حاضر، بررسی اثر انفجار در یک سازه‌ی موجود بتنی و دو شیوه‌ی بهسازی سازه در برابر انفجار بررسی شده است. به عنوان گزینه‌ی ابتدایی، میراگرهای سیال ویسکوز با درصد‌های میرایی ۵ تا ۲۵ و سپس استفاده از جداسازهای لرزه‌یی به عنوان گزینه‌ی دوم بررسی شدند. کلیه‌ی مدل‌سازی‌های عددی در محیط نرم‌افزار SAP و به روش تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی انجام شده‌اند. در بررسی‌ها مشهود است که میزان برش پایه در استفاده از جداگر لرزه‌یی نسبت به قاب خالی در حالت بهینه‌ی انتخابی، ۵۰٪ کاهش و میراگرها در حالت بهینه‌ی انتخابی این میزان را حدود ۶۰٪ افزایش داده‌اند. اما از طرف دیگر، میزان جابه‌جایی‌های نسبی بین طبقات در حالت استفاده از میرایی‌های ذکر شده بسیار کاهش داشته و به میزان ۱۷٪ رسیده است، به گونه‌یی که میزان آن با جداگر لرزه‌یی، به کمینه‌ی ۲٪ رسیده است.

واژگان کلیدی: سازه‌ی بتنی، جداگر لرزه‌یی، میراگر ویسکوز، بار انفجار، مقایسه‌ی عملکرد.

۱. مقدمه

پس از انفجار ساختمان دولتی فدرال آمریکا در اوکلاهاما (۱۹۹۵)، به انفجار و آثار مخرب آن در ساختمان توجه ویژه‌یی شد و با بررسی‌های صورت گرفته در زمینه‌ی ذکر شده، نوشتارها و آیین‌نامه‌های بسیاری تدوین و تهیه شدند. براساس آمارهای منتشر شده از سوی سازمان‌های بین‌المللی، ایران در یکی از خطرناک‌ترین نقاط دنیا به جهت احتمال بالای وقوع حملات تروریستی قرار گرفته است. این مسئله بیانگر این واقعیت است که برای کاهش خطرات ناشی از انفجار و مقاوم‌سازی سازه‌های موجود با اهمیت بالا و بسیار بالا در برابر بارهای انفجاری نیاز به ارائه‌ی راهکار است و باید مطالعات فراوانی در این زمینه صورت گیرد.

گام نخست در طراحی سازه‌ها در برابر انفجار، شناسایی ماهیت بار انفجار و شیوه‌ی تأثیر آن در سازه است. انفجار، آزاد شدن ناگهانی انرژی همراه با گرما، موج و نور است. بر روی چگونگی و شکل بار انفجار که بر روی سازه‌ها وارد می‌شود، پژوهش‌های فراوانی صورت گرفته است. در پژوهش‌های صورت گرفته، انفجار به صورت موجی فشاری با مقداری معین بر سازه وارد می‌شود که مدت زمان معینی دارد. بر روی شدت

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۴/۱۴، اصلاحیه ۱۳۹۶/۷/۲۲، پذیرش ۱۳۹۶/۹/۷.

DOI:10.24200/J30.2019.20919

موج مذکور و مدت زمان تأثیر و ماندگاری آن در نقطه‌یی با فاصله‌ی مشخص از محل انفجار، مطالعات زیادی صورت گرفته است. مطالعات ابتدایی بر مبنای انفجار در یک نقطه از هوا که در اصطلاح به آن‌ها انفجار با موج کروی گفته می‌شود، صورت گرفته و روابطی بر مبنای میزان ماده‌ی منفجره و فاصله از محل آن ارائه شده است.^[۱] در مطالعات بعدی، اثرهای انفجاری در زمین که نیم‌کروی نامیده می‌شوند و همچنین آثار برخورد موج انفجار با سطوح مایل بررسی شده‌اند.^[۲] آیین‌نامه‌های موجود قابل اعتماد در زمینه‌ی تخمین بار انفجار عبارتند از: آیین‌نامه‌های مهندسان ارتش آمریکا،^[۳] و آیین‌نامه‌ی اخیر اتحادیه‌ی اروپا^[۴]. در جهت بررسی آثار دینامیکی وارد بر سازه در اثر موج انفجار، مطالعات بسیار اندکی صورت گرفته است. برخی پژوهشگران با مدل‌سازی‌های عددی و در بعضی موارد آزمایشگاهی، آثار مذکور را بررسی کرده‌اند. برای نمونه، جاسیتو و همکاران (۲۰۰۱)، اثر انفجار در سازه‌های ورقه‌یی شکل را بررسی کردند و با ایجاد انفجار مصنوعی و قرار دادن یک صفحه‌ی فولادی در مسیر موج حاصل از انفجار، فشارهای حاصل از انفجار را بر روی صفحه اندازه‌گیری و همچنین پاسخ‌های به وجود آمده در ورق را با مدل‌سازی عددی مقایسه کرده‌اند و به این ترتیب روابطی را برای فشار حاصل از موج انفجار بر روی سازه ارائه داده‌اند.^[۵] همچنین انگو و همکاران (۲۰۰۷)، با بررسی مدل عددی یک سازه‌ی بلند

و اعمال بار انفجار بر آن، تخریب پیش‌رونده‌ی سازه و پاسخ‌های به وجود آمده در اثر انفجار را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اگر ضوابط آیین‌نامه‌ها جهت شکل‌پذیری رعایت شود، می‌توان سازه را در برابر بار انفجار بسیار مقاوم ساخت.^[۶] حسین (۲۰۱۰)، نیز با استفاده از یک مدل یک درجه آزادی غیرخطی، تفاوت‌های مدل‌سازی به کمک موج انفجار تک‌مرحله‌یی و دو مرحله‌یی را بحث و بررسی و با یکدیگر مقایسه کرده است.^[۷] همچنین فیگولی و همکاران (۲۰۱۶)، با ایجاد انفجار مصنوعی به صورت کروی، میزان فشارهای وارد بر تیرهای نورد شده و پاسخ آن‌ها در برابر بار انفجار را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی و میزان فشارها را با روابط پیشنهادی قبلی مقایسه کرده‌اند.^[۸]

السناددی و همکاران (۲۰۱۴)، نیز تخریب پیش‌رونده‌ی یک ساختمان در برابر سناریوهای احتمالی انفجار را بررسی و میزان ماده‌ی منفجره‌ی لازم جهت تخریب پیش‌رونده‌ی ساختمان را مشخص کرده‌اند و برای جلوگیری از وقوع تخریب سازه، فاصله‌یی مشخص پیشنهاد داده‌اند که می‌توان با ایجاد محوطه‌سازی و محدود کردن دسترسی، از تخریب آن جلوگیری کرد. همچنین جهت بهسازی، استفاده از مهاربند و دیوار برشی و در جهت ایمنی بیشتر ساکنان، استفاده از دیوارهای دولا به پیشنهاد شده است.^[۹] عبدالله‌زاده و نعمتی (۲۰۱۴)، نیز با مطالعه بر روی تخریب پیش‌رونده‌ی یک سازه در اثر انفجارهای احتمالی، حالت حدی را با توجه به حالت قائم در نظر گرفتند، تا وقوع تخریب پیش‌رونده را بتوانند به خوبی بررسی کنند. علاوه بر این، به کمک روش پیشنهادی آن‌ها، مکان‌های با احتمال خطر بالا مشخص شدند، تا از ورود افراد به آن محدوده‌ها در ساختمان‌های حساس تا حد امکان جلوگیری به عمل آید.^[۱۰] همچنین گوئل و ماتساگار (۲۰۱۳)، با بررسی اثر شکل هندسی ساختمان‌ها در برابر انفجار نتیجه گرفتند که نمای جلویی ساختمان با شکل ساده‌تر در برابر انفجار مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد و نیز استفاده از مصالح با وزن کم و قابلیت جذب انرژی بالا و همچنین در مکان‌هایی که امکان ایجاد فاصله در کنار سازه و یا مقاوم‌سازی سازه نیست، استفاده از دیوارهای محافظ در اطراف سازه را توصیه کرده‌اند.^[۱۱]

لی و همکاران (۲۰۱۵)، نیز رفتار سازه‌ی دال بتنی با مقاومت بسیار بالا و مودهای شکست سازه را مطالعه و فشارهای اعمالی بر سازه را با مقادیر آیین‌نامه مقایسه کردند. ضمناً نشان دادند که مدل اجزاء محدود با مشخصات از قبل تعیین شده‌ی مصالح و شرایط مرزی می‌تواند آسیب را در اثر انفجار در سازه به خوبی مدل‌سازی کند.^[۱۲] همچنین در جمع‌آوری منابع و بررسی جامعی که هونگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ انجام دادند، آیین‌نامه‌های طراحی در برابر انفجار و پژوهش‌های مربوط به عملکرد سازه‌های بتنی در برابر انفجار را بررسی و رفتار مدل‌های مصالح به کار رفته در شبیه‌سازی‌ها را با رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی و واقعی مقایسه کردند که مزایا و معایب برخی از مدل‌های مذکور به صورت خلاصه نیز ذکر شده است.^[۱۳] در جهت کنترل نوسان‌های حاصل از انفجار نیز پژوهش‌هایی صورت گرفته است که در آن‌ها ابزارهای جداگر و میراگرهای سیال و یسکوز به صورت عمده جهت کاهش نوسان‌های حاصل از انفجار بررسی شده‌اند. میراگرهای سیال و یسکوز توان کاهش پاسخ‌ها در برابر انفجار را دارند. در پژوهش صورت گرفته‌ی میاموتو و داگلاس (۲۰۰۰)، نشان داده شده است که قاب خمشی ویژه به همراه میراگر سیال و یسکوز می‌تواند عملکرد بسیار خوبی را در برابر انفجار از خود به نمایش بگذارد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که میزان شتاب‌ها و سرعت‌ها به مقادیر میرایی به‌کار گرفته شده در سیستم اتلاف انرژی وابستگی زیادی ندارد. این پدیده به این علت است که در انفجار، تمامی انرژی به صورت آبی به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و توان استهلاک آن از طریق میراگر به صورت آبی وجود نخواهد داشت. اگرچه میزان جابه‌جایی

بیشینه را می‌توان تا حدودی با افزایش میرایی کاهش داد.^[۱۴] در پژوهش دیگری (۲۰۱۴)، که اثر میراگر و یسکوز در پاسخ‌های سازه تحت بار انفجار بررسی شده است، به خوبی می‌توان مشاهده کرد که میانگین مربعات پاسخ‌های سازه به خوبی با افزایش میرایی کاهش داده شده‌اند؛ ولی میزان قله‌ی شتاب و سرعت تفاوت زیادی با تغییرات میرایی نداشته است. همچنین، مقداری وجود دارد که به کمک آن می‌توان کاهش شتاب را به میزان بیشینه رساند، ولی از آن بیشتر، میرایی اثری منفی در پاسخ‌ها خواهد گذاشت.^[۱۵]

سرور و همکاران (۲۰۱۴)، نیز الگوهای متفاوت میراگرها را با مقادیر مختلف میرایی در سازه‌ی فلزی با ارتفاع متوسط و بلند به صورت عددی بحث و بررسی کرده و نتایج آن‌ها نشان داده است که بهترین مکان برای به کار بردن میراگرهای سیال و یسکوز، طبقات پایین سازه به همراه طبقه‌ی نرم آن در صورت وجود است. همچنین استفاده از میراگر و یسکوز - کشسان در طبقه‌ی نرم، نتایج بهتری را نسبت به میراگر و یسکوز از خود نشان داده است.^[۱۶]

سیستم دیگری که برای کاهش نوسان‌های سازه در اثر بار انفجار بررسی شده است، جداگر لرزه‌یی است. برخی پژوهشگران بر روی اثرهایی که سیستم جداگر لرزه‌یی در پاسخ‌های حاصل از انفجار دارد، مطالعاتی را انجام داده‌اند. برای نمونه، هوانگ و ویت تیکر (۲۰۰۹)، اثر جداساز لرزه‌یی را در پاسخ‌های یک سازه‌ی رآکتور در اثر انفجار بررسی کردند و نشان دادند که با مدل‌سازی عددی انفجار هوایی (کروی) و ضربه‌ی وارده‌ی حاصل از آن از طریق زمین به سازه، مقادیر برش پایه و دریافت بام سازه‌ی رآکتور به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. همچنین، میزان شتاب‌ها و احتمال شکست سازه در اثر انفجار نیز به میزان قابل توجهی کاهش یافته است.^[۱۷]

همچنین ژنگ و فیلیس (۲۰۱۵)، آثار جداگر لرزه‌یی در پاسخ‌های سازه در حین زلزله را در بارگذاری انفجار مشاهده کردند و نشان دادند که با به‌کارگیری ابزارهای اتلاف انرژی، مانند صفحات جاری‌شونده با رفتار غیرخطی می‌توان پاسخ جابه‌جایی سازه در تراز پایه را نیز به خوبی کاهش داد.^[۱۸] در ضمن آن‌ها اثر میراگر جرمی اضافه شده در تراز پایه را در مدل عددی خود وارد کردند که در این حالت نیز نسبت به حالت جداساز تنها، بهبود پاسخ‌های سازه در برابر بارگذاری زلزله و انفجار مشاهده می‌شود.^[۱۹]

در پژوهش حاضر، اثر میراگرهای سیال و یسکوز و جداگرهای لرزه‌یی در پاسخ‌ها و پارامترهای عملکردی سازه به‌طور جداگانه بحث و بررسی شده است. جداگرها با میزان سختی و نیروی تسلیم متفاوت و همچنین میراگرهایی با درصد‌های میرایی هدف متفاوت بر سازه اعمال و به صورت عددی مدل‌سازی شده‌اند. هدف اصلی در پژوهش حاضر، تحلیل عددی و مقایسه‌ی عملکردی سازه‌ی بتنی با انواع مختلف جداگر با مشخصات متفاوت و مقایسه‌ی آن‌ها با عملکرد سازه‌ی بتنی با میراگرهای سیال و یسکوز است. همچنین در پژوهش حاضر سعی شده است تا با بررسی طیف وسیعی از جداگرها و میراگرها به صورت پارامتری، معیاری برای طراحی بهینه‌ی سازه‌ها در برابر انفجار ارائه شود.

۲. مدل‌سازی

۲.۱. بار انفجار

انفجار به صورت آزاد شدن ناگهانی انرژی در مقیاسی بزرگ تعریف می‌شود. موج انفجار در فاصله‌ی زمانی بسیار کوتاهی، فشار را به مقداری بسیار بیشتر از فشار هوای محیط می‌رساند که از آن به‌عنوان فشار سربار نام برده می‌شود. مقدار فشار سربار

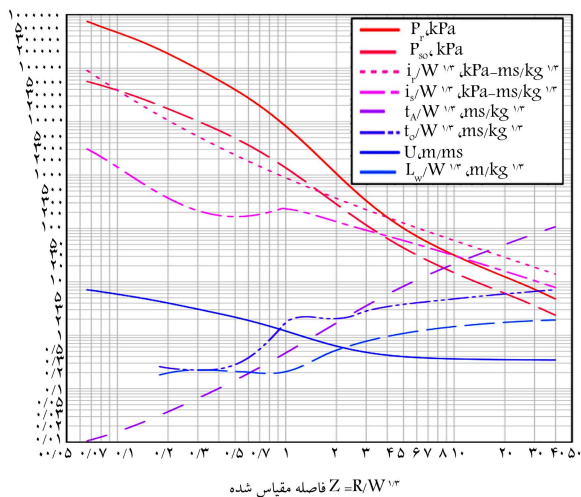
و مقادیر مقیاس نشده‌ی هر پارامتر مرتبط با انفجار براساس شکل ۳ محاسبه خواهد شد.

۴. تشکیل تاریخچه‌ی زمانی فشار حاصل از انفجار در دو حالت فشار سربار و دینامیکی در برابر فشار بازتاب یافته‌ی حاصل از انفجار.

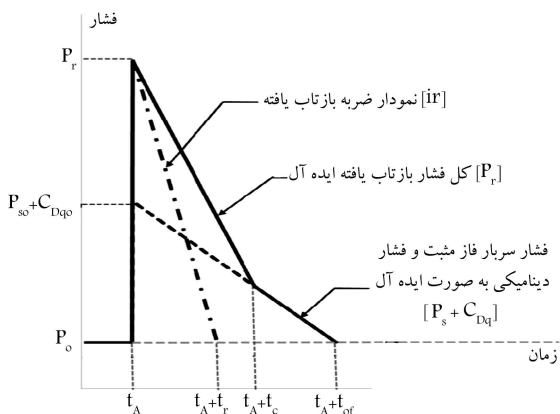
۵. تاریخچه‌ی زمانی با میزان ضربه‌ی اعمالی کمتر بر سازه به عنوان تاریخچه‌ی زمانی نزدیک‌تر به واقعیت انتخاب می‌شود.

لازم به ذکر است که در عبارت آخر به این نکته توجه شده است که تاریخچه‌ی زمانی با میزان ضربه‌ی اعمالی کمتر بر سازه، به حالت واقعی بار انفجار وارد بر آن نزدیک‌تر خواهد بود.^[۱]

در شکل ۲، پارامترهای P_r و P_{so} به ترتیب میزان فشار بازتاب یافته و سربار وارد بر سازه در انفجار نیم‌کروی (سطحی) با توجه به میزان فاصله‌ی مقیاس شده (Z) هستند. همچنین، مقادیر $i_r/W^{1/3}$ ، $i_s/W^{1/3}$ ، $t_A/W^{1/3}$ و $t_{A+T}/W^{1/3}$ به ترتیب برابر میزان ضربه در اثر فشار بازتاب یافته و سربار و زمان رسیدن و پایان فاز مثبت به صورت مقیاس شده براساس وزن ماده‌ی منفجره‌ی به‌کار رفته هستند. مقادیر U و $L_w/W^{1/3}$ نیز به ترتیب برابر سرعت حرکت موج فشاری و طول موج مربوط به موج فشاری انفجار هستند. پارامتر $L_w/W^{1/3}$ که مرتبط با بارگذاری بام بر اثر انفجار است، به صورت نرمال شده در نمودار مشاهده می‌شود.



شکل ۲. پارامترهای فاز مثبت انفجارهای نیم‌کروی.^[۳]



شکل ۳. تاریخچه‌ی فشار وارد بر یک نقطه از سازه در اثر انفجار (خط تیره: فشار سربار و دینامیکی و خط نقطه: فشار منعکس شده).^[۴]

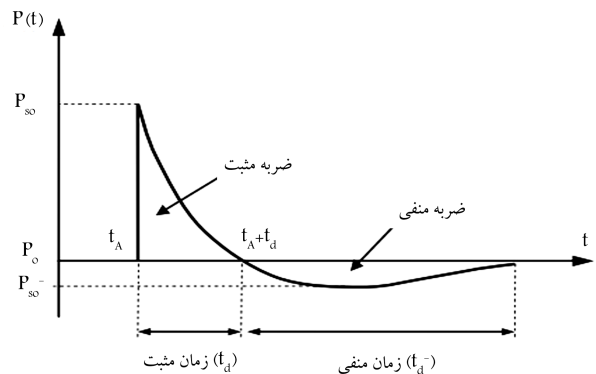
با حرکت موج انفجار از نقطه‌ی انفجار به سمت محیط اطراف کاهش می‌یابد. بعد از مدتی کوتاه و رد شدن فاز مثبت موج از نقطه‌ی موردنظر، فشار هوا در آن نقطه قدری پایین تر از فشار محیط خواهد شد. بنابراین موج انفجار دو فاز فشار مثبت و فشار منفی را در یک نقطه خواهد داشت. در شکل ۱، می‌توان تاریخچه‌ی زمانی فشار تقریبی حاصل از انفجار را وقتی موج آن به یک نقطه‌ی موردنظر می‌رسد، مشاهده کرد. در طراحی و تحلیل بار انفجار، فاز منفی معمولاً در نظر گرفته نمی‌شود، زیرا این واقعیت مورد تأیید است که بیشتر خسارت در اثر انفجار، در ارتباط با فاز مثبت انفجار است. علاوه بر این، فشارهای مرتبط با فاز منفی بسیار کوچک تر از فاز مثبت هستند و از آنجایی که در جهت خلاف فاز مثبت به سازه اعمال می‌شوند، می‌توان از اثر آن‌ها در سازه در جهت اطمینان صرف‌نظر کرد. همان‌گونه که اشاره شد، انفجارها به صورت کروی و نیم‌کروی صورت می‌پذیرند. موج انفجار در اثر برخورد با زمین به صورت نیم‌کروی در می‌آید و سپس به سمت اطراف حرکت و به سازه برخورد می‌کند.

در انفجارهای نیم‌کروی، در صورتی که زمین به صورت صلب فرض شود، میزان اضافه فشار حاصل از انفجار دقیقاً دو برابر انفجار کروی خواهد بود. اما در واقعیت به علت انعطاف‌پذیری زمین و انتقال موج از طریق آن، میزان فشار بین ۱/۷ الی ۱/۸ برابر حالت کروی خواهد بود.^[۴] فشار منعکس شده از سطح جلویی ساختمان در اثر عبور هوا از مرزهای اطراف و بام آن به مرور کاهش خواهد یافت. این پدیده اجازه می‌دهد که فشار بازتاب یافته با سرعت بسیار زیادی کاهش یابد و میزان آن برابر با مجموع فشار سربار و دینامیکی شود. زمان لازم برای پدیده‌ی مذکور را در اصطلاح زمان فرونشینی می‌نامند که به عوامل مختلفی، همچون: هندسه‌ی سازه، نوع ماده‌ی منفجره، میزان آن و فاصله‌ی نقطه‌ی انفجار تا سازه‌ی موردنظر بستگی دارد. شدت موج انفجار و مقدار فشار تولید شده در یک نقطه نیز به دو عامل اصلی مقدار ماده‌ی منفجره‌ی به‌کار رفته و فاصله‌ی محل انفجار تا نقطه‌ی موردنظر بستگی دارد. فشار سربار به صورت موج فشاری به سرعت در فضا منتشر می‌شود، اما فشار دینامیکی حاصل از جریان هوا در جهت حرکت موج فشاری انفجار با سرعت کمتری ایجاد می‌شود و باری را بر سازه اعمال می‌کند؛ ولی یک تفاوت عمده با فشار سربار دارد و آن مدت زمان اثرش است. این مدت زمان می‌تواند ۲ الی ۳ ثانیه به طول انجامد.^[۴] در بخش بعدی، مراحل مرتبط با محاسبه‌ی میزان بار انفجار را می‌توان مشاهده کرد:

۱. تخمین نوع و میزان ماده‌ی منفجره (W) و همچنین میزان فاصله‌ی نقطه‌ی انفجار تا نقطه‌ی موردنظر بر روی سازه (R).

۲. تقسیم‌بندی سطح اصلی موردنظر به محدوده‌های مختلف و محاسبه‌ی فاصله‌ی نرمال شده (Z) برای هر سطح.

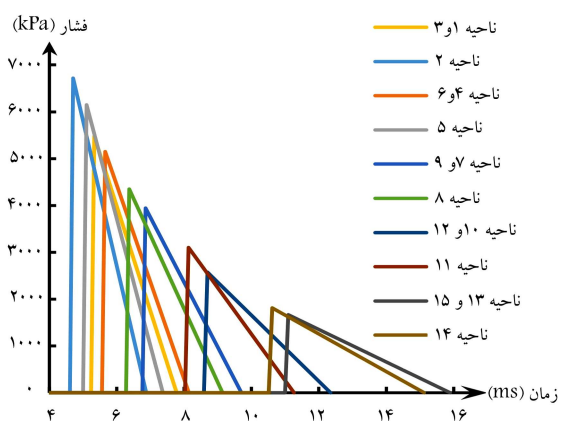
۳. براساس نوع انفجار، کلیدی مقادیر مقیاس شده‌ی بار انفجار از شکل ۲ استخراج



شکل ۱. تاریخچه‌ی زمانی فشار ناشی از انفجار.^[۱]

جدول ۱. مشخصات بارگذاری انفجار در نظر گرفته شده در نواحی مختلف نمای جلویی ساختمان.

ناحیه	Z	P_{so}	P_r	i_r	i_s	t_a	t_o	t_{rf}	t_{of}	C_r	t_c
۱ (۳)	۱٫۱۶	۹۷۵	۵۴۷۶	۶۶۸۴	۱۹۹۶	۵٫۳	۱۸٫۶	۲٫۴	۲٫۰	۰٫۸۴۶	۲۰٫۲
۲	۱٫۰۸	۱۱۶۳	۶۷۱۶	۷۲۹۷	۲۰۷۹	۴٫۷	۱۷٫۵	۲٫۲	۱٫۸	۰٫۹۴۰	۱۸٫۲
۴ (۶)	۱٫۲۰	۹۰۵	۵۱۴۷	۶۳۸۷	۱۹۳۱	۵٫۷	۱۹٫۵	۲٫۵	۲٫۱	۰٫۸۱۱	۲۱٫۱
۵	۱٫۱۲	۱۰۶۵	۶۱۴۶	۶۹۸۱	۲۰۴۲	۵٫۱	۱۸٫۱	۲٫۳	۱٫۹	۰٫۸۹۱	۱۹٫۲
۷ (۹)	۱٫۳۳	۷۲۵	۳۹۴۵	۵۵۹۸	۱۷۸۲	۶٫۹	۱۹٫۹	۲٫۸	۲٫۵	۰٫۷۲۱	۲۳٫۷
۸	۱٫۲۶	۸۲۸	۴۳۴۹	۶۰۲۵	۱۸۸۴	۶٫۴	۱۹٫۹	۲٫۸	۲٫۳	۰٫۷۷۲	۲۲٫۱
۱۰ (۱۲)	۱٫۵۱	۵۴۰	۲۵۷۶	۴۷۱۶	۱۵۹۷	۸٫۷	۱۹٫۳	۳٫۷	۳٫۰	۰٫۶۲۸	۲۷٫۲
۱۱	۱٫۴۵	۶۱۶	۳۱۰۵	۴۸۶۴	۱۶۲۵	۸٫۱	۱۹٫۷	۳٫۱	۲٫۶	۰٫۶۶۶	۲۵٫۷
۱۳ (۱۵)	۱٫۷۴	۳۹۸	۱۶۶۹	۴۰۱۰	۱۴۳۰	۱۱٫۱	۱۸٫۵	۴٫۸	۳٫۶	۰٫۵۵۷	۳۰٫۷
۱۴	۱٫۶۸	۴۲۸	۱۸۱۰	۴۰۸۵	۱۴۶۷	۱۰٫۶	۱۸٫۵	۴٫۵	۳٫۴	۰٫۵۷۲	۲۹٫۹



شکل ۴. تاریخچه‌ی زمانی فشار حاصل از انفجار بر روی ناحیه‌های مشخص شده روی سازه.

که در آن، i_r برابر میزان کل ضربه‌ی بازتاب‌یافته‌ی وارده بر سازه در اثر فاز مثبت انفجار و P_r برابر فشار بیشینه‌ی بازتاب‌یافته در اثر انفجار است. بنابراین، برای بار انفجار وارد بر سازه دو حالت وجود دارد: حالتی که به میزان بار واقعی برای انفجار نزدیک‌تر است، همان حالتی است که ضربه‌ی کمتری را بر سازه اعمال کند. به کمک جدول ۱ می‌توان نمودار دو حالت را براساس تاریخچه‌ی زمانی فشار در ناحیه‌های مختلف، همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ترسیم کرد. شماره‌گذاری ناحیه‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است.

مقادیر ذکر شده در جدول ۱ براساس پارامتر فاصله‌ی مقیاس شده (Z) و کمک گرفتن از شکل ۲ محاسبه شده‌اند. بر این اساس طبق توضیحات، دو نمودار برای ضربه به دست آمد، که نمودار با ضربه‌ی کمتر به عنوان نمودار ضربه‌ی واقعی در نظر گرفته شد، که می‌توان آن را در شکل ۴ مشاهده کرد.

۲.۲. مدل سازه‌ی ساختمان مورد نظر

مدل سازه‌ی ساختمان موجود از نوع قاب خمشی بتنی ویژه در نظر گرفته شده است، که در ده‌ی سازه‌های با اهمیت بالا قرار دارد. مدل سازه‌ی مذکور (شکل ۶) از نوع سه‌بعدی و ۳ دهانه (با عرض ۴ متر) و ۵ طبقه (با ارتفاع ۳ متر) بود. بارهای مرده‌ی وارد بر ساختمان به صورت بار گسترده‌ی اضافی وارد بر دال‌ها به میزان 3 kN/m^2 و بار زنده‌ی آن‌ها به میزان 5 kN/m^2 در نظر گرفته شدند. طراحی لرزه‌ی سازه‌ی مذکور براساس روش استاتیکی معادل صورت پذیرفت که سازه‌ی مقاوم و مؤثر در

اولین سطحی که موج انفجار به آنجا برخورد می‌کند، دیواره‌ی جلویی ساختمان است. اولین گام برای محاسبه‌ی میزان فشار وارده بر سازه در اثر انفجار، محاسبه‌ی میزان فشار در لحظه‌ی انعکاس موج انفجار است. فشار وارد بر این دیواره با حرکت موج انفجار انعکاس یافته از سطح به تدریج کاهش می‌یابد و در مدت زمان $t_c + t_a$ ، فشار وارد بر سطح به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. پس از این لحظه، فشار وارد بر ساختمان در اثر ترکیبی از فشار دینامیکی وارد بر ساختمان و فشار انفجار محاسبه و به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$P = P_s + C_D q \quad (1)$$

که در آن، P_s فشار انفجار و C_D ضریب دراگ است که برای دیواره‌ی جلویی ساختمان برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. q نیز به عنوان فشار دینامیکی وارد بر ساختمان در نظر گرفته می‌شود t_c را نیز می‌توان به کمک رابطه‌ی ۲ محاسبه کرد:

$$t_c = \frac{4S}{(1+R)C_r} \quad (2)$$

که در آن، S برابر با کوچک‌ترین مقدار نصف عرض ساختمان و یا ارتفاع آن است. C_r نیز بیانگر سرعت صوت در هوای بازتاب یافته و R برابر S/G است که G بیانگر بزرگ‌ترین مقدار نصف عرض ساختمان و یا ارتفاع آن است.

برای ساده‌سازی نمودار فشار وارده بر سازه در قسمت فشار انفجار و فشار دینامیکی، نمودار مذکور مثلی فرض شده است؛ که براساس فرض مذکور، زمان فاز مثبت انفجار t_o با t_{of} جایگزین می‌شود که با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$t_{of} = 2 \frac{i_s}{P_{so}} \quad (3)$$

که در آن، i_s برابر میزان ضربه‌ی وارده بر سازه در اثر فاز مثبت انفجار و P_{so} برابر فشار سربار بیشینه‌ی حاصل از انفجار است. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که در حضور فشارهای انفجار بسیار بالا، مدت زمان فاز مثبت انفجار بسیار کوتاه است، به طوری که زمان t_{of} حتی از t_c نیز کمتر می‌شود. این حقیقت نشان‌دهنده‌ی آن است که انفجار به صورت موج بازتاب یافته از سطح بی‌نهایت بر سازه اعمال خواهد شد (هندسه‌ی سازه هیچ تأثیری در میزان موج نخواهد داشت). بنابراین، یک موج فشاری دیگر نیز می‌تواند براساس میزان ضربه‌ی موج بازتاب یافته بر سازه وارد شود. مدت زمان اعمال این موج بر سازه نیز به صورت رابطه‌ی ۴ محاسبه خواهد شد:

$$t_{rf} = 2 \frac{i_r}{P_r} \quad (4)$$

جهت اعمال بارهای فشاری وارد بر سازه، تاریخچه‌ی زمانی مرتبط با هر ناحیه در محیط نرم‌افزار SAP معرفی شده است. در نهایت نیز باری به صورت یکنواخت هم‌جهت با فشار وارده در هر ناحیه وارد و تاریخچه‌ی زمانی متناظر با آن در هر ناحیه اختصاص داده شد. باید توجه داشت که بار انفجار باید پس از اعمال شرایط عملکردی بر سازه‌ی موردنظر بر آن اعمال شود. این شرایط عملکردی براساس می‌جست ۶ مقررات ملی ساختمان بر سازه اعمال شده است.

۱۳	۱۴	۱۵
۱۰	۱۱	۱۲
۷	۸	۹
۴	۵	۶
۱	۲	۳

شکل ۵. ناحیه‌بندی نمای جلوی سازه جهت محاسبه‌ی بار انفجار.

۳. مقاومت سازه در برابر انفجار

روش‌های بسیاری ممکن است برای مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر بار انفجار استفاده شوند، روش‌هایی مانند استفاده از جداگرهای لرزه‌ی، میراگرها، و یا سخت‌کننده‌ها (مانند دیوارهای برشی فولادی یا بتنی). پارامترهایی که در مطالعه‌ی عملکرد ابزارهای کنترل غیرفعال بررسی می‌شوند، شامل جابه‌جایی بیشینه‌ی پایه (J_1)، مجذور میانگین مربعات جابه‌جایی پایه (J_2)، بیشینه‌ی میزان دررفت در سازه (J_3)، بیشینه‌ی مجذور میانگین مربعات دررفت در سازه (J_4)، بیشینه‌ی شتاب مطلق در سازه (J_5)، بیشینه‌ی مجذور میانگین مربعات شتاب مطلق در سازه (J_6) و بیشینه‌ی میزان برش پایه در سازه (J_7) حین اعمال بار انفجار هستند (روابط ۵ الی ۱۱). در پژوهش حاضر، فقط میراگر سیال ویسکوز و جداگر لرزه‌ی بحث و بررسی شده‌اند. پارامترهای عملکردی J_1 ، J_2 ، J_3 ، J_4 ، J_5 و J_6 براساس پاسخ‌های استخراج شده‌ی سازه از هر طبقه در محیط متلب^۲ محاسبه شده‌اند. جهت بررسی و مقایسه‌ی روش‌های کنترل غیرفعال به کاررفته در سازه، پارامترهای عملکردی استفاده و مقایسه شده‌اند:

$$J_1 = \max_{t \in [t_0, t_1]} \|d_0(t)\| \quad (5)$$

$$J_2 = \max_{t \in [t_0, t_1]} \|RMS[d_0(t)]\| \quad (6)$$

$$J_3 = \max \left\{ \max_{t \in [t_0, t_1]} \left\{ \max_{i=1-n} \|d_i(t)\| \right\} \right\} \quad (7)$$

$$J_4 = \max \left\{ \max_{t \in [t_0, t_1]} \left\{ \max_{i=1-n} \|RMS[d_i(t)]\| \right\} \right\} \quad (8)$$

$$J_5 = \max \left\{ \max_{t \in [t_0, t_1]} \left\{ \max_{i=1-n} \|a_i(t)\| \right\} \right\} \quad (9)$$

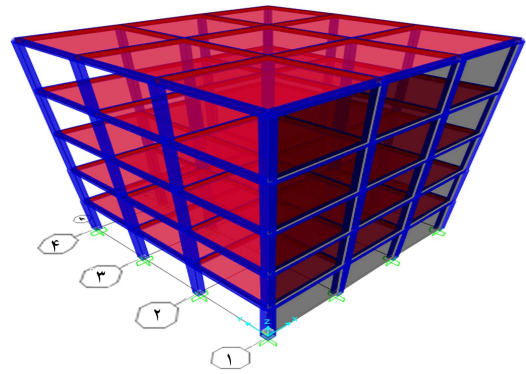
$$J_6 = \max \left\{ \max_{t \in [t_0, t_1]} \left\{ \max_{i=1-n} \|RMS[a_i(t)]\| \right\} \right\} \quad (10)$$

$$J_7 = \max_{t \in [t_0, t_1]} \|V_0(t)\| \quad (11)$$

که در آن‌ها، d نماینده‌ی جابه‌جایی نسبی طبقات، a نماینده‌ی شتاب مطلق طبقات و V نماینده‌ی برش پایه هستند. پارامترهای J_3 و J_4 نماینده‌ی میزان بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی و شتاب مطلق در کل طبقات سازه است. همچنین، پارامترهای J_3 و J_4 نماینده‌ی میانگین جابه‌جایی و شتاب مطلق در طبقه‌ی است که میانگین مذکور، بیشینه‌ی شود. در سازه‌ی قاب بهسازی نشده بدون هیچ‌گونه ابزارکنترل غیرفعال، پارامترهای عملکردی به صورت جدول ۲ هستند.

جدول ۲. معیارهای عملکردی سازه‌ی قاب بهسازی نشده بدون ابزارکنترل غیرفعال.

$J_1(mm)$	$J_2(mm)$	$J_3(\%)$	$J_4(\%)$	$J_5(g)$	$J_6(g)$	$J_7(kN)$
-	-	۳٫۱۶	۱٫۸۳	۲٫۸۳	۰٫۲۲	۳۹۷۴٫۲



شکل ۶. نمایی از مدل سازه‌ی سه بعدی ساختمان.

برابر زلزله می‌باشد. در مدل بتنی در نظر گرفته شده، مقاطع اعضاء سازه با مدل محصور شده‌ی مندر^۱ و مفاصل خمیری برای ستون‌ها و تیرها بر مبنای روش مقاطع فایبر^۲ در دو سر انتهای اعضا در نظر گرفته شده‌اند. مشخصات مصالح سازه به صورت بتن با مقاومت ۲۸ مگاپاسکال و فولاد با مقاومت ۴۰۰۰ مگاپاسکال است. همچنین، به دلیل بالا بودن نرخ رشد کرنش در سازه تحت بار انفجار، ضریبی معادل ۱٫۲۵ برای اضافه مقاومت بتن به کار رفته در سازه منظور شده است.^[۲۰] بار انفجار بر مبنای ظرفیت خودروی ون انتخاب شده است که توان حمل ماده‌ی منفجره به میزان ۶۸۰ کیلوگرم را دارد. معمولاً در هنگام طراحی ساختمان‌ها در برابر بارهایی به جز انفجار به صورت دست‌بالا عمل می‌شود. در مورد انفجار، اما مسئله کمی متفاوت است. انعکاس ناخواسته‌ی موج انفجار، روش طراحی به کار رفته، کیفیت مصالح، ساخت سازه و اندرکنش سازه با زمین از مواردی هستند که برای هر سازه‌ی خاص متفاوت خواهد بود. در آیین‌نامه‌ها و مقالات توصیه شده است که از میزان ۱٫۲ برابر مقدار ماده‌ی منفجره‌ی در نظر گرفته شده به علت عدم قطعیت‌های موجود در طراحی و تحلیل استفاده شود.

از این رو مقدار ماده‌ی منفجره‌ی معادل ۸۰۰ کیلوگرم ماده‌ی TNT در محاسبات مربوط به بار انفجار و فرض شد که انفجار در یک سمت سازه‌ی اصلی رخ دهد. در بارگذاری انفجار فقط اثر موج انفجار بر روی نمای جلویی سازه بررسی و از اثر موج فشاری آن در تراز بام، پشت و کناره‌های ساختمان صرف‌نظر شد. بارهای وارد بر سازه براساس انفجار ۸۰۰ کیلوگرم ماده‌ی TNT در فاصله‌ی ۱۰ متری از سازه محاسبه شدند.

در شکل ۶ می‌توان ناحیه‌بندی نمای جلوی سازه را مشاهده کرد. مدل‌سازی بار انفجار به صورت مرحله به مرحله در بخش قبل به صورت تکمیلی بحث و بررسی شد. در جدول ۱، پارامترهای انفجار برای ناحیه‌های در نظر گرفته شده‌ی نمای جلویی سازه نمایش ارائه شده است. تاریخچه‌ی زمانی فشار وارد بر هر ناحیه نیز به صورت کلی در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

۱.۳. میراگر مایع ویسکوز

در سال‌های اخیر، اثر میراگرها در کاهش پاسخ لرزه‌یی سازه‌ها به طور گسترده بررسی شده است. کارهای آزمایشگاهی و استفاده‌های عملی انجام شده، مؤثر بودن شیوهی مذکور را ثابت کرده‌اند. استفادهی سنتی از میراگرها در سازه‌ها به صورت سیستم‌های مهاربندی دارای میراگر است. در این حالت، میراگرها برای بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌ها می‌توانند مضراتی داشته باشند. در واقع، حتی در سازه‌های جدید، قاب اصلی طراحی می‌شود تا نیروهای ناشی از میراگر را تحمل کند. در مقاوم‌سازی سازه‌های موجود، این نیروها می‌توانند باعث خرابی نابهنگام اعضا شوند. در این حالت، ملاحظات طراحی جدیدی برای سیستم‌های مهاربندی باید لحاظ شود و اتصالات باید مجدداً کنترل شوند. این تغییر بارهای موجود می‌تواند نیاز به شالوده‌های جدید را ایجاد کند.

در سازهی مورد بررسی، اثر میراگر سیال ویسکوز با درصد میرایی هدف ۵ الی ۲۵، بررسی شده است. به منظور تعیین میرایی مورد نیاز سازه برای رسیدن به درصد میرایی هدف، باید سختی کل سازه تعیین شود. بدین منظور با استفاده از وارد کردن نیروهای برشی در تراز هر طبقه با الگوی مثلثی، نیروی برش پایه و میزان دررفت‌های هر طبقه محاسبه می‌شوند. سپس به کمک نیروی برشی هر طبقه و دررفت متناظر با همان نیروی برشی، می‌توان سختی برشی هر طبقه را به دست آورد. سختی کل سازه به صورت مجموع این سختی‌ها در نظر گرفته می‌شود. ضریب میرایی کل که باید به سازه اضافه شود تا به میرایی هدف دست یافت، با استفاده از رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود: [۲۱]

$$C_T = \frac{(\xi^* - \xi)T_1}{\pi} K_T \quad (12)$$

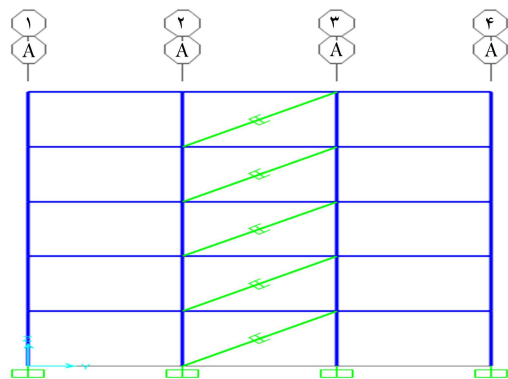
که در آن، T_1 زمان دوری تناوب مود اصلی سازهی اولیه، K_T سختی کل سازه، ξ میرایی سیستم، ξ^* میرایی نهایی سیستم و $\xi - \xi^*$ درصد میرایی افزوده شده به سازه هستند. همچنین میرایی هدف (C_T) به نسبت دررفت شکل مود اول سازه توزیع می‌شود. در جدول ۳، توزیع میرایی در طبقات مختلف در حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده ارائه شده است.

همچنین توجه شود که در جدول ۳ شیب میراگرها نیز در مقادیر میرایی لحاظ شده است. بنابراین با توجه به این نکته که میراگرها در دو دهانه در سازه به کار رفته‌اند، در هر طبقه میراگری با نصف مقدار ذکر شده در جدول ۳، به صورت مایل استفاده شده است (شکل ۷) در مدل‌سازی میراگرها در محیط نرم‌افزار نیز از عنصر لینک ۴ استفاده شده است.

با انجام آنالیز تاریخچه‌ی زمانی براساس بارهای انفجار و در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح و همچنین اختصاص مفصل‌های خمیری به اعضاء سازه، نتایج شکل ۸ به دست آمده‌اند. از نمودارهای ترسیم شده در شکل ۸ می‌توان دریافت که در صورت وارد شدن بار انفجار به سازه، میرایی می‌تواند به صورت مؤثری پاسخ‌های تغییرمکانی سازه را کاهش دهد (شکل ۸الف). با در نظر گرفتن سیر کاهش پاسخ‌های سازه با افزایش درصد میرایی معادل می‌توان نتیجه گرفت که پاسخ‌های سازه نسبت به افزایش میرایی حساسیت کمتری از خود نشان می‌دهند. در حالت کلی چون طراحی‌های جدید به سمت طراحی سازه بر مبنای تغییرمکان پیش می‌روند، می‌توان با در نظر گرفتن جابه‌جایی نسبی سازه براساس معیار پایداری آن تصمیم‌گیری کرد. به عنوان مثال، در این مورد به خصوص با در نظر گرفتن جابه‌جایی نسبی بیشینه ۲٪ می‌توان میرایی ۱۵٪ را به عنوان بهینه انتخاب کرد. البته باید توجه کرد که این مقدار می‌تواند بسته به بار در نظر گرفته شده و یا مشخصات سازه تغییر کند.

جدول ۳. میزان میرایی معادل مورد نیاز در هر طبقه بر حسب $kN.s/m$ برای نیل به درصد میرایی هدف.

طبقه	φ				
	(+/-۵٪)	(+/-۱۰٪)	(+/-۱۵٪)	(+/-۲۰٪)	(+/-۲۵٪)
۱	۹۵۶	۱۹۱۳	۲۸۶۹	۳۸۲۶	۴۷۸۲
۲	۱۳۶۳	۲۷۲۷	۴۰۹۰	۵۴۵۳	۶۸۱۷
۳	۱۴۱۹	۲۸۳۸	۴۲۵۷	۵۶۷۶	۷۰۹۴
۴	۱۱۳۸	۲۲۷۷	۳۴۱۵	۴۵۵۴	۵۶۹۲
۵	۸۸۶	۱۷۷۲	۲۶۵۷	۳۵۴۳	۴۴۲۹
Σ	۵۷۶۳	۱۱۵۲۶	۱۷۲۸۹	۲۳۰۵۲	۲۸۸۱۴

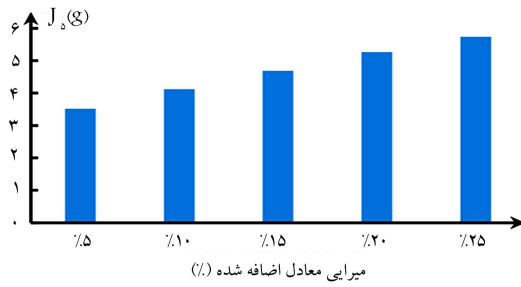


شکل ۷. جای‌گذاری میراگر در سازهی اصلی در یک قاب.

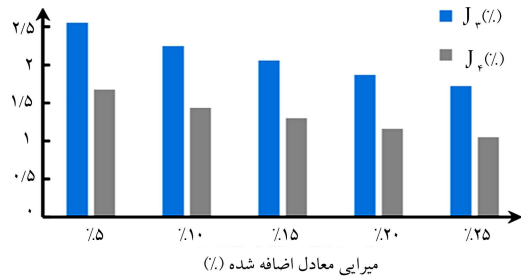
شتاب نیز باید به صورت مطلق و در کلیه‌ی طبقات بررسی شود. در شکل‌های ۸ب و ۸ج به ترتیب شتاب مطلق بیشینه‌ی کل سازه و بیشینه‌ی مجذور میانگین مربعات شتاب مطلق سازه در ترازهای متفاوت مشاهده می‌شود. با بررسی شکل ۸ می‌توان به این نکته اشاره کرد که شتاب‌های مطلق بیشینه‌ی سازه در اثر میراگرهای سیال ویسکوز، با افزایش میرایی معادل افزایش می‌یابند. اما در اینجا می‌توان عمل بهینه‌سازی را انجام داد و درصد میرایی هدف برای به دست آوردن شتاب مطلق بیشینه‌ی مورد نظر را که مانع آسیب شدید به انسان‌ها و اشیاء درون سازه شوند، به دست آورد. از آنجا که با افزایش میرایی، برش پایه‌ی وارد بر سازه نیز به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد (شکل ۵د)، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب درصد میرایی مناسب باید با توجه به ظرفیت اعضاء به کاررفته در سازه شامل ستون‌ها و پی متصل به آن‌ها صورت گیرد. در این مورد به خصوص می‌توان مشاهده کرد که درصد میرایی بهینه در حدود ۵٪ خواهد بود. اما باید معیار تغییرمکان و پایداری سازه نیز که قبلاً به آن اشاره شد، منظور شوند و بر مبنای اهمیت پارامترهای عملکردی، عددی میان ۵٪ و ۱۵٪ را برای مقاوم‌سازی سازه در برابر انفجار احتمالی اختیار کرد.

۲.۳. جداگر لرزه‌یی

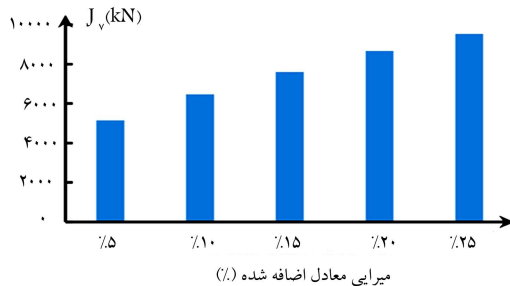
جداسازهای پایه، وسایلی هستند که در زیر سازه‌ها قرار می‌گیرند و آن‌ها را از آثار ویرانگر ناشی از نیروی جانبی زلزله، یا نوسان‌های ناشی از حرکت قطارها جدا می‌کنند. جداساز لرزه‌یی، ابزاری با سابقه در طراحی سازه‌هاست که به وسیله‌ی آن می‌توان سازه یا بخشی از آن یا حتی اجزاء داخلی قرار گرفته در سازه را از آثار مخرب شتاب زمین جداسازی کرد. یکی از اهداف جداسازی لرزه‌یی، منحرف ساختن بسامد اصلی سازه از بسامدهای غالب زلزله و بسامد اصلی روسازه است. هدف دیگر



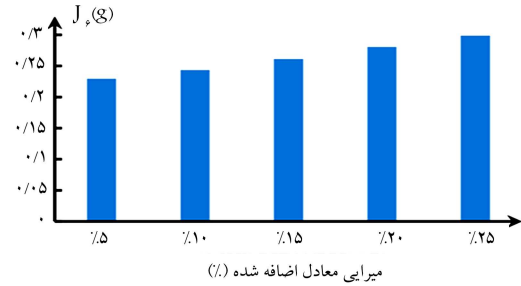
ب) بیشینه ی شتاب مطلق J_s ؛ میرایی معادل اضافه شده (%)



الف) بیشینه ی میزان دررفت J_p و بیشینه ی مجذور میانگین مربعات دررفت J_s ؛ میرایی معادل اضافه شده (%)



د) بیشینه ی میزان برش پایه J_v به ازای میرایی های هدف متفاوت اضافه شده به سازه. میرایی معادل اضافه شده (%)



ج) بیشینه ی مجذور میانگین مربعات شتاب مطلق J_p ؛ میرایی معادل اضافه شده (%)

شکل ۸. مقایسه‌ی پارامترهای عملکردی سازه بهسازی شده با میراگر در برابر قاب بهسازی نشده.

جدول ۴. پارامترهای m و B جهت محاسبه‌ی بیشینه‌ی جابه‌جایی خمیری طبق آیین‌نامه‌ی UBC-۱۹۹۷ [۲۳].

φ (%)	M	B
۵٪	۱۳٫۴۰	۲۰٫۵
۱۰٪	۷٫۶۷	۱۵٫۵
۱۵٪	۷٫۰۰	۱۲٫۵
۲۰٪	۷٫۳۳	۱۰٫۵

می‌گیرند (رابطه‌ی ۱۴):

$$k_1 = 5 \left(\frac{k}{N} \right); k_2 = 0.5 \left(\frac{k}{N} \right) \quad (14)$$

که در آن، N نماینده تعداد ستون‌های سازه است. نیروی تسلیم جداگر (F_y) نیز به صورت رابطه‌ی ۱۵ در نظر گرفته می‌شود:

$$F_y = 0.555 \left(\frac{k}{N} \right) D; D = m(T_D - 1.5) + B \quad (15)$$

در نیروی تسلیم جداگر، مؤلفه‌ی به نام D وجود دارد که ارتباط مستقیمی با جابه‌جایی خمیری سازه در بارگذاری لرزه‌یی دارد و مقدار پارامترهای m و B در آیین‌نامه‌ی UBC-۱۹۹۷ [۲۳]، میزان آن را مشخص می‌کند که در جدول ۴ نیز ارائه شده است.

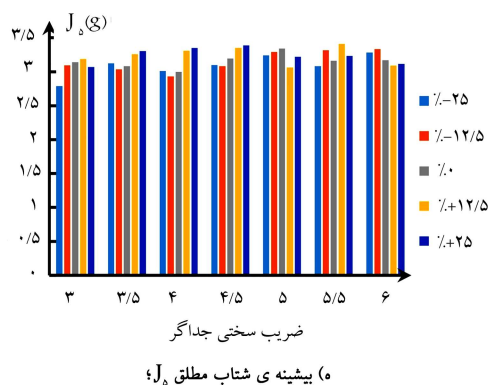
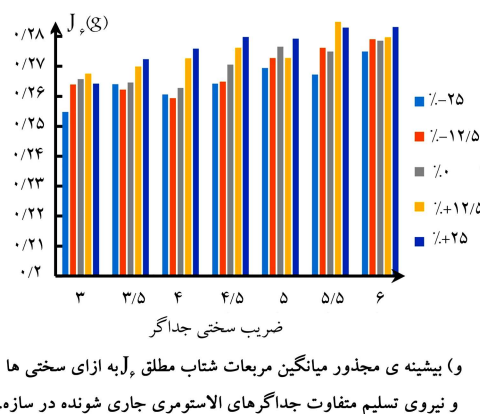
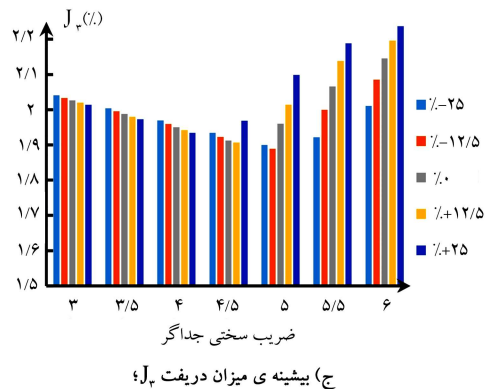
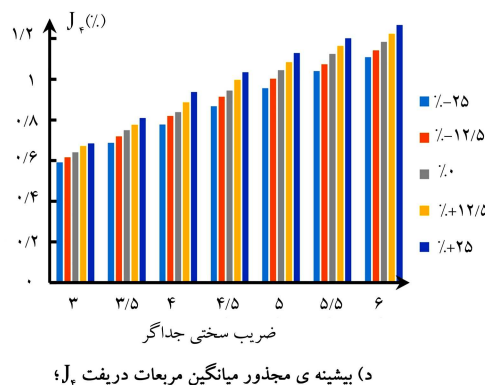
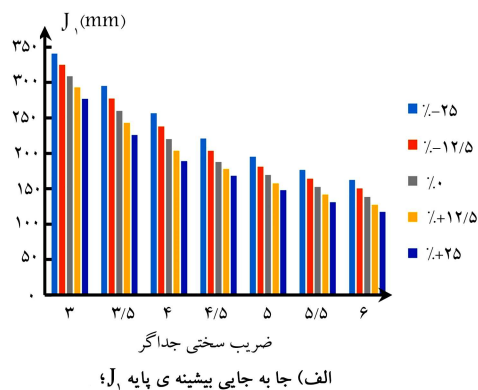
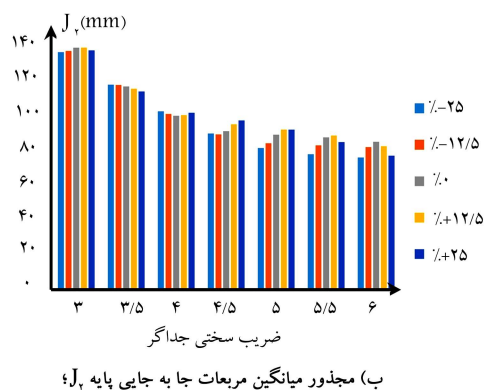
به جهت بررسی اثر سختی در پاسخ‌های سازه تحت بار انفجار، در رابطه‌ی ۱۴ ضرایب ۵ و ۰٫۵ به ترتیب بین محدوده‌های ۳-۶ و ۰٫۳-۰٫۶ تغییر داده شده و نتایج در حالت‌های مختلف به دست آمده است. همچنین به علت وجود عدم قطعیت در نیروی تسلیم و نیز وجود جداگری با مشخصات ذکر شده، نیروی تسلیم با ۲۵٪ اختلاف، مدل‌سازی شده است؛ تا اثر عدم قطعیت نیروی تسلیم جداگر در مدل‌سازی‌ها به خوبی مشاهده شود. در جدول ۵، میزان سختی هر جداگر بر حسب kN/m و نیروی تسلیم متناظر با آن بر حسب kN ارائه شده است.

از یک سیستم جداساز، فراهم کردن وسیله‌ی اضافی برای میراسازی انرژی و در نتیجه کاستن از شتاب منتقل شده به روسازه است. دیدگاه اصلی در روش ذکر شده، جداساختن سازه از زمین (عموماً در جهت افقی) به منظور کاهش انتقال تحریک زلزله به سازه است. در مورد بار انفجار نیز می‌توان گفت که به صورت کلی سازه‌های سخت در برابر بارهای ضربه‌یی، تغییرشکل‌های کمتری نسبت به سازه‌های نرم می‌دهند؛ اما نیروهای به وجود آمده در سازه‌ی سخت بسیار شدیدتر از سازه‌ی نرم هستند، چراکه سازه‌های سخت توان تحمل تغییرشکل‌های بالا را ندارند و بارهای ضربه‌یی به سازه، سرعت اولیه اعمال می‌کنند. بنابراین، شتابی که در سازه‌ی سخت در اثر بارهای ضربه‌یی به وجود خواهد آمد، بسیار شدیدتر از سازه‌های نرم خواهد بود. به جهت راحتی کار و در دسترس بودن بیشتر جداگرهای الاستومری، فرض بر آن است که جداگر الاستومری جاری شونده در سازه استفاده شده است. همچنین در مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار از عنصر لینک^۵ به منظور مدل‌سازی جداگرها استفاده شده است.

در سازه‌ی موجود، طراحی جداگرهای لرزه‌یی بر مبنای مقاوم‌سازی آن در برابر زلزله صورت پذیرفته است. این کار به این علت صورت گرفته است که اولویت در سازه‌ی با اهمیت بالا، طراحی برای زلزله است و انفجار باید به عنوان عامل دوم بارگذاری شدید بررسی شود. همچنین طراحی جداگر لرزه‌یی بر مبنای تعیین سختی معادل برای سازه، براساس مود ارتعاشی اول سازه است. این سختی را می‌توان از رابطه‌ی ۱۳ به دست آورد [۲۲]:

$$k = \frac{4\pi^2 W}{T_D^2 g} \quad (13)$$

که در آن، W برابر وزن سازه، T_D برابر دوره‌ی تناوب مود اول سازه‌ی جداسازی شده و g برابر ضریب شتاب گرانش زمین است. با تقسیم سختی معادل مذکور بر تعداد ستون‌های سازه می‌توان سختی مؤثر هر جداگر را به دست آورد که معمولاً ۵ برابر آن را به عنوان سختی ابتدایی و نیمی از آن را برابر سختی ثانویه جداگر در نظر



شکل ۹. مقایسه‌ی پارامترهای عملکردی سازه بهسازی شده با جداگر لرزه‌یی برای جداگرهای با مشخصات مختلف.

با تحلیل سازه به کمک پارامترهای سختی در نظر گرفته شده برای جداگر لرزه‌یی، معیارهای عملکردی سازه را می‌توان براساس مشخصات جداگرها در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده کرد. نمودارهای ترسیم شده در شکل‌های ۹ الف و ب به خوبی نشان می‌دهند که با سختی‌های کمتر از ضریب ۵، جابه‌جایی‌ها به شدت افزایش می‌یابند و در ضرایب بزرگ‌تر از ۵، کاهش چشم‌گیری در پاسخ جابه‌جایی‌های سازه مشاهده نمی‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، ضریبی بهینه را می‌توان یافت که جابه‌جایی‌های تراز پایه در سازه را براساس آن کمیته کرد. در شکل ۹ ج نیز می‌توان مشاهده کرد که روند جابه‌جایی نسبی در سازه در حدود ضریب سختی ۴/۵ کمیته می‌شود و به ازاء مقادیر کمتر، کمی زیاد و به ازاء مقادیر بزرگ‌تر، به شدت زیاد می‌شود. همان‌گونه که در شکل‌های ۹ ه و ۹ و مشخص است، می‌توان دریافت که شتاب وارد بر سازه وابستگی خاصی به سختی و نیروی تسلیم سازه ندارد. مطلب

جدول ۵. سختی اولیه (kN/m) و نیروی تسلیم جداگر (kN) در حالت‌های مختلف.

Variation	Stiffness					
	۳	۳/۵	۴	۴/۵	۵	۵/۵
	۲۲۸۰	۲۶۶۰	۳۰۴۰	۳۴۲۰	۳۸۰۰	۴۱۸۰
-۲۵٪	۳۹	۴۶	۵۲	۵۹	۶۵	۷۲
-۱۲/۵٪	۴۵	۵۳	۶۰	۶۸	۷۵	۸۳
۰٪	۵۱	۶۰	۶۸	۷۷	۸۵	۹۴
+۱۲/۵٪	۵۷	۶۷	۷۶	۸۶	۹۵	۱۰۵
+۲۵٪	۶۳	۷۴	۸۴/۰	۹۵	۱۰۵	۱۱۶

ساختمان‌ها، ممکن است نیاز به مقاوم‌سازی سازه‌ی اصلی نیز داشته باشد؛ چرا که نیروی میراگرها از طریق مهاربندی به ستون‌ها منتقل می‌شود و بنابراین در برابر بارهای عظیمی همچون انفجار، ستون‌ها نیروی محوری شدیدی را متحمل می‌شوند. نتایج به‌دست آمده را می‌توان به این صورت خلاصه کرد:

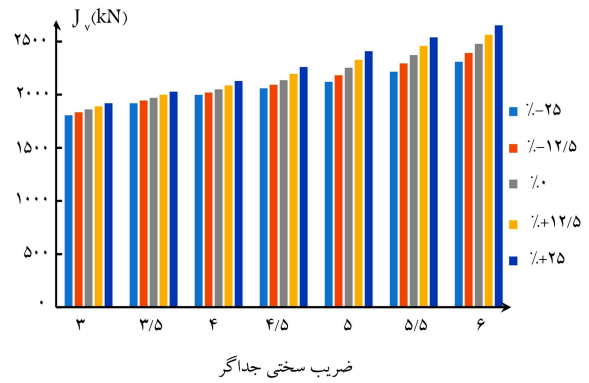
۱. میراگرهای سیال ویسکوز، در برابر بارهای ناشی از انفجار می‌توانند پاسخ‌های تغییرمکانی سازه را کاهش دهند، اما پاسخ‌های مذکور با افزایش میرایی از یک حد مشخص، دیگر به میزان زیادی کاهش نمی‌یابند. جابه‌جایی نسبی (J_r) به ازاء افزایش میرایی به میزان ۵٪، ۶۱٪ کاهش داشته است. این در صورتی است که به ازاء افزایش میرایی به میزان ۱۰٪، نسبت به میرایی ۵٪، این میزان حدود ۳۱٪ کاهش می‌یابد. بنابراین، با افزایش میرایی اضافی از ۵٪ به ۱۰٪، میزان کاهش جابه‌جایی‌های نسبی در سازه تقریباً نصف شده است. البته باید توجه داشت در میزان میرایی اضافی ۲۵٪، میزان J_r به حدود ۱۷٪ محدود شده و این میزان در هیچ‌یک از جداگرهای بررسی شده وجود نداشته است.

۲. میراگرهای سیال ویسکوز، در برابر بارهای انفجار، شتاب مطلق و مجذور میانگین مربعات شتاب مطلق سازه را افزایش می‌دهند. برای میرایی اضافی ۵٪، افزایش صورت‌گرفته حدود ۲۴٪ و برای میرایی اضافی ۲۵٪، میزان شتاب مطلق سازه نسبت به سازه‌ی خالی تقریباً ۱۰٪ افزایش را متحمل خواهد شد. در مورد معیار E_r نیز، برای میرایی اضافی ۵٪ و ۲۵٪، میزان تغییرات به ترتیب ۴٪ و ۳۶٪ افزایش را نشان می‌دهند.

۳. از آنجایی که استفاده از میراگرهای سیال ویسکوز موجب اعمال بارهای اضافی به قاب ساختمانی می‌شود، در صورتی که ساختمان با میراگرهای سیال ویسکوز در برابر انفجار مقاوم‌سازی شود، باید تقویت اعضا و شالودای سازه را نیز در نظر گرفت. در صورتی که در مورد استفاده از جداگر نیاز به تقویت اعضا و شالوده نیست و فقط باید آثار مرتبه‌ی دوم حرکت سازه روی پی بررسی شود. برش پایه در استفاده از میراگرهای سیال ویسکوز، در حالت بهینه (میرایی اضافی ۱۰٪) حدود ۶۰٪ افزایش را تجربه می‌کند. این در حالی است که در مورد استفاده از جداگرها در حالت بهینه، برای سازه‌ی مقاوم‌سازی شده در برابر انفجار، برش پایه در حدود ۵۰٪ کاهش را تجربه کرده است.

۴. تغییر نیروی تسلیم جداگرها به ازاء سختی ثابت، در جابه‌جایی مطلق سازه و برش پایه‌ی سازه تأثیر چندانی نداشته است. از آنجایی که سختی جداگرها در این مقایسه یکسان است، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر جابه‌جایی مطلق سازه و برش پایه‌ی سازه با سختی جداگر، رابطه‌ی بیشتری نسبت به نیروی تسلیم دارند.

۵. میزان شتاب‌های مطلق در سازه، رابطه‌ی خاصی با نیروی تسلیم و میزان سختی جداگر ندارد. این پدیده به علت ماهیت ضربه‌یی بار انفجار و عدم ارتباط آن با مشخصات مکانیکی است. البته باید توجه داشت تقریباً در تمامی موارد میزان شتاب مطلق در طبقات مختلف سازه یا تغییر چندانی نداشته و یا افزایش یافته است. بیشترین میزان تغییرات شتاب مطلق تقریباً ۱۷٪ افزایش و کمترین آن حدود ۳٪ کاهش بوده است.



شکل ۱۰. نمودار برش پایه‌ی اعمال شده‌ی بیشینه (J_v) بر سازه در اثر انفجار به ازاء مشخصات مختلف جداگر لرزه‌یی.

ذکر شده را می‌توان در این حقیقت خلاصه کرد که بار ضربه‌یی به‌صورت سرعت و شتاب تحت تأثیر جرم سازه قرار دارد و ارتباط زیادی به سختی و مشخصات غیرخطی سازه ندارد، چرا که بیشترین اتلاف انرژی و جابه‌جایی در تراز پایه صورت می‌پذیرد و طبقات جابه‌جایی نسبی زیادی ندارند. همچنین در نمودار شکل ۱۰ می‌توان میزان بیشینه‌ی برش پایه وارد بر سازه را در اثر مشخصات مکانیکی متفاوت جداگرهای مختلف مشاهده کرد. در سختی‌های بالاتر از ۴٪ می‌توان مشاهده کرد اثر تغییرات و عدم قطعیت نیروی تسلیم در میزان برش پایه بسیار مشهودتر است. اما در هر حال می‌توان مشاهده کرد که بیشترین برش پایه در نمودار شکل ۱۰ از حالت قاب بهسازی نشده کمتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت جداگرهای لرزه‌یی توان کاهش برش پایه وارد بر سازه را به‌صورت مؤثری دارند و به‌طور کلی در اثر نیروی انفجار، نیروی کمتری به اعضا و پی سازه وارد خواهد شد. اما از طرف دیگر، جابه‌جایی‌های تراز پایه‌ی سازه، افزایش چشم‌گیری خواهد داشت.

در پایان باید انتخاب جداگر را همان‌گونه که در شکل‌ها مشخص است، بر مبنای جابه‌جایی نسبی بیشینه‌ی سازه و جابه‌جایی بیشینه‌ی تراز پایه انتخاب کرد. جابه‌جایی بیشینه‌ی تراز پایه، معیاری برای پایداری کلی سازه و جداگر لرزه‌یی ارائه می‌دهد و به طراح کمک شایانی برای انتخاب سختی مناسب در برابر بار تخمین زده شده می‌کند. جابه‌جایی نسبی بیشینه‌ی سازه نیز پایداری طبقات یک سازه را در نظر می‌گیرد. در این مورد خاص که بررسی شده است، می‌توان مشاهده کرد که ضریب سختی ۴٫۵ میزان پارامتر مذکور را به ۲٪ محدود می‌کند که برای کنترل پایداری طبقات، بسیار مناسب است.

۴. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، دو روش کارآمد در کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی در برابر بار انفجار مطالعه و نتایج آن‌ها بحث و بررسی شده است. در کاهش پاسخ‌های انفجار نشان داده شده است که میراگرهای سیال ویسکوز آثار بسیار مثبتی می‌توانند در کاهش پاسخ‌ها داشته باشند؛ اما آن‌ها توانایی کاهش برش حاصل از بار انفجار را ندارند. همچنین استفاده از میراگرهای مذکور به‌صورت سنتی (در مسیر مهاربندی) در

پانویس‌ها

1. confined mander

2. fiber section
3. Matlab
4. damper (exponential)
5. plastic(wen)

(References) منابع

1. Brode, Harold L. "Numerical solutions of spherical blast waves", *Journal of Applied Physics*, **26**(6), pp. 766-775 (1955).
2. Newmark, N.M. and Hansen, R.J., *Design of Blast Resistant Structures*, Shock and Vibration Handbook, 3 (1961).
3. U.S. Department of the Defense, "Structures to resist the effects of accidental explosions", UFC 3-340-02 (2008).
4. Karlos, V. and Solomos, G. "Calculation of blast loads for application to structural components", Publications Office of the European Union, Luxembourg (2013).
5. Jacinto, A.C., Ambrosini, R.D. and Danesi, R.F. "Experimental and computational analysis of plates under air blast loading", *International Journal of Impact Engineering*, **25**(10), pp. 927-947 (2001).
6. Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A. and et al. "Blast loading and blast effects on structures-An overview", *Electronic Journal of Structural Engineering*, **7**, pp. 76-91 (2007).
7. Hussein, A.T. "Non-linear analysis of SDOF system under blast load", *European Journal of Scientific Research*, **45**(3), pp. 430-437 (2010).
8. Figuli, L., Stefan J. and Papan, D. Modelling and testing of blast effect on the structures", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **44**(5), IOP Publishing (2016).
9. Elsanadedy, H.M., Almusallam, T.H., Alharbi, Y.R. and et al. "Progressive collapse potential of a typical steel building due to blast attacks", *Journal of Constructional Steel Research*, **101**, pp. 143-157 (2014).
10. Abdollahzadeh, Gh. and Nemati, M. "Risk assessment of structures subjected to blast", *International Journal of Damage Mechanics*, **23**(1), pp. 3-24 (2014).
11. Goel, M.D. and Matsagar, V.A. "Blast-resistant design of structures", *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, **19**(2), 04014007 (2013).
12. Li, J., Wu, Ch. and Hao, H. "An experimental and numerical study of reinforced ultra-high performance concrete slabs under blast loads", *Materials & Design*, **82**, pp. 64-76 (2015).
13. Hao, H., Hao, Y., Li, J. and et al. "Review of the current practices in blast-resistant analysis and design of concrete structures", *Advances in Structural Engineering*, **19**(8), pp. 1193-1223 (2016).
14. Miyamoto, H.K. and Taylor, D. "Structural control of dynamic blast loading", *Advanced Technology in Structural Engineering*, pp. 1-8 (2000).
15. Mondal, P.D., Ghosh, A. and Chakraborty, S. "Fluid viscous damper in mitigation of structural vibration effect due to underground blast", *International Journal of Materials and Structural Integrity*, **8**(4), pp. 273-290 (2014).
16. Serror, M.H., Diab, R.A. and Mourad, Sh.A. "Behavior of steel moment resisting frames with supplemental damping devices", *Journal of Advanced Research*, **5**, pp.607-620 (2014).
17. Huang, Y.-N. and Whittaker, A.S. "Response of conventional and base-isolated nuclear power plants to blast loading", *Proceedings of 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Espoo (Helsinki), Finland (2009).
18. Zhang, R. and Phillips, B.M. "Numerical study on the benefits of base isolation for blast loading", *6th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, 11th International on Advance Smart Materials and Smart Structures Technology Workshop*.
19. Zhang, R. and Phillips, B.M. "Performance and protection of base-isolated structures under blast loading", *Journal of Engineering Mechanics*, **142**(1), 04015063 (2015).
20. Draganić, H. and Sigmund, V. "Blast loading on structures", *Technical Gazette*, **19**(3), pp. 643-652 (2012).
21. Cimellaro, G.P. and Retamales, R. "Optimal softening and damping design for buildings", *Structural Control and Health Monitoring*, **14**(6), pp. 831-857 (2007).
22. Villegas-Jimenez, Omar, and Arturo Tena-Colunga. "Procedure for the design of base isolated structures located on the Mexican Pacific Coast", *Memorias, 12th World Conference on Earthquake Engineering* (2000).
23. Code, Uniform Building "Uniform building code", International conference of building officials, USA (1997).