

Energy-based analysis of a steel moment frame with viscous damper under blast loading

MohammadJavad Goodarzi¹, Hosein Najafi², Majid Moradi^{3*}

1- Department of civil engineering, Technical and vocational university(TVU), Tehran, Iran

2- Master of Urban Management, Sari Municipality

3- PHD in Earthquake Engineering, Babol Noshirvani Technical University

ABSTRACT

The degree of control of the response and performance of structures under external loads is one of the most important issues in structural and earthquake engineering. Today, the use of modern systems to control structural vibrations has expanded significantly. Viscous dampers are one of the most common tools for controlling structural vibrations against external loads. One of these foreign burdens could be an explosion caused by terrorist attacks. In this research, it has been tried to investigate the behavior of structures with viscous dampers based on energy balance under explosion load. For this aim, two 10-story structures with Moment Resistance Frame (MRF) system and steel Moment Resistance Frame with viscous damper under different explosion scenarios have been analyzed and the dissipated and absorbed energies in the energy balance due to external work have been evaluated. First, to better understand the behavior of these structures, the performance of the structures is evaluated based on the plastic hinges and the relative displacement of the studied stories and finally the effect of viscous damper in reducing the damage of structures using energy balance concepts. The results show that in general, viscous dampers can reduce the damage to an acceptable level and control the behavior of the structure.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 January 2021

Revise Date: 05 October 2021

Accept Date: 15 November 2021

Keywords: Viscous Damper
Energy Balance
Blast Loading
Steel Structure

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.268835.2338

*Corresponding author: Majid Moradi
Email address: Majid_Moradi68@yahoo.com

تحلیل مبنی بر انرژی قاب ساختمانی فولادی مجهز به میراگر ویسکوز در معرض انفجار

محمدجواد گودرزی^۱، حسین نجفی^۲، مجید مرادی^{۳*}

۱- مری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۲- ارشد مدیریت شهری، کارشناس فنی معاونت فنی و امور عمرانی شهرداری ساری

۳- دکترای زلزله، دانشگاه صنعتی بابل

چکیده

میزان کنترل رفتار و عملکرد سازه تحت بارهای خارجی یکی از مهم‌ترین مباحث در مهندسی سازه و زلزله است. امروزه استفاده از سیستم‌های نوین جهت کنترل ارتعاشات سازه گسترش چشم‌گیری داشته است. میراگر ویسکوز یکی از متداول‌ترین ابزارها جهت کنترل ارتعاشات سازه در برابر بارهای خارجی است. یکی از این بارهای خارجی می‌تواند انفجار ناشی از حملات تروریستی باشد. در این تحقیق سعی شده است رفتار سازه‌های دارای میراگر ویسکوز با تکیه بر بالانس انرژی تحت بارگذاری انفجار بررسی گردد. بر این مبنا دو سازه‌ی ۱۰ طبقه با سیستم قاب خمشی تنها و قاب خمشی فولادی دارای میراگر ویسکوز تحت سناریوهای مختلف انفجار مورد تحلیل قرار گرفته و انرژی‌های تلف‌شده و جذب‌شده در بالانس انرژی با کار خارجی ناشی از آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ابتدا برای درک بهتر از رفتار سازه‌های مورد بررسی، عملکرد سازه‌ها بر اساس دوران مفاصل پلاستیک و جابجایی نسبی طبقات مورد بررسی و در نهایت تأثیر میراگر ویسکوز در میزان کاهش خسارت سازه‌ای با استفاده از مفاهیم بالانس انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد به‌طور کلی میراگر ویسکوز می‌تواند تا حد قابل قبولی خسارات وارده را کاهش دهد و رفتار سازه را کنترل نماید.

کلمات کلیدی: میراگر ویسکوز، بارگذاری انفجار، بالانس انرژی، سازه فولادی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.268835.2338	۱۴۰۱/۵/۰۱	۱۴۰۰/۸/۲۴	۱۴۰۰/۸/۲۴	۱۴۰۰/۷/۱۳	۱۳۹۹/۱۰/۲۷
10.22065/JSCE.2021.268835.2338					
مجید مرادی				*نویسنده مسئول:	
Majid_Moradi68@yahoo.com				پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

ارزیابی عملکرد سازه‌ها در برابر بار مختلف یکی از مهم‌ترین وظایف مهندسی سازه و زلزله است [۱]. وقوع حوادث گوناگون تروریستی در مورد سازه‌های مهم در سراسر جهان، اهمیت پرداختن به مبحث پدافند غیرعامل و طراحی ساختمان‌ها در اثر بارهای ضربه‌ای ناشی از انفجار را مورد توجه ویژه‌ای قرار می‌دهد. انفجار حاصل آزاد شدن ناگهانی انرژی است که می‌تواند به صورت احتراق گازها، انفجار هسته‌ای یا در اثر انواع مختلف بمب باشد. واحد TNT معمولاً به عنوان مرجعی برای تعیین قدرت انفجار استفاده می‌شود. زمانی که ماده منفجره از نوع TNT نباشد معادل آن را می‌توان از ضرابی به دست آورد [۲]. تحلیل‌های انفجاری سابقه‌ای در حدود چندین قرن دارد. تحلیل‌های ابتدایی که با روش‌های تقریبی انجام می‌گرفت به قرن‌های ۱۳ و ۱۱ میلادی باز می‌گردد. در سال ۱۹۱۹ قانون مقیاس برای انفجارهای ساده توسط هاپکینسون ارائه شد که پایه ریاضی نداشت ولی از نظر کاربردی بسیار با اهمیت بود [۳]. وی ادعا نمود که اگر دو ساختمان با شکل و مصالح مشابه ولی در اندازه‌های مختلف ساخته شوند و سپس تحت اثر انفجار قرار گیرند، مقدار ماده منفجره لازم برای ایجاد تأثیرات مشابه با توان سوم ابعاد ساختمان‌ها نسبت مستقیم دارد. این قانون به طور کامل و در سال ۱۹۲۱ توسط گرنز ارائه شد [۴]. هوراس لمب ریاضیدان دانشگاه منچستر تحقیقات بسیاری را در مورد هیدرودینامیک و پدیده انتشار امواج انجام داد [۵]. تیلور دانشمندی بود که مطالعاتش بر روی دینامیک موج‌های انفجار ناشی از مواد منفجره نقش بسیار زیادی در پیشرفت مرکز تحقیقات وزارت دفاع بریتانیا در سال‌های بین ۱۹۳۱ تا ۱۹۹۱ داشت. مقاله‌های نخست وی در مورد انتشار و استهلاک موج‌های انفجار ناشی از سلاح‌های متعارف بود ولی در مطالعات بعدی وی بر روی رفتار موج‌های انفجار ناشی از نخستین انفجار اتمی در نیومکزیکو متمرکز شد [۶]. در سال‌های اخیر نیز تحقیقاتی در زمینه بارهای انفجاری صورت گرفته است. یانگ (۲۰۱۹) به صورت آزمایشگاهی و عددی بر روی پاسخ دال‌های بتن‌آرمه در معرض بار انفجار تحقیق کرده است [۷]. وانگ (۲۰۱۷) بر روی سازه تأثیر FRP بر روی پاسخ سازه‌های بتن‌آرمه در معرض انفجار تحقیق کرده است. هادیان فر (۲۰۱۸) تأثیر عدم قطعیت‌ها را بر پاسخ ستون‌های فولادی در معرض بار انفجار بررسی کرده است [۸].

طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم در برابر انفجار مقرون به صرفه نیست. ولی با تمهیداتی می‌توان از شدت و دامنه خسارات وارده کاست [۹] و عملکرد سازه را ارتقا بخشید و میزان خرابی در آن را کاهش داد. در طی یک انفجار، مقدار زیادی انرژی به سازه تحمیل می‌گردد. این انرژی ورودی به دو صورت جنبشی و پتانسیل (کرنشی) در سازه پدیدار می‌گردد که باید به طریقی جذب و یا مستهلک شود. اگر هیچ نوع میرایی در سازه موجود نباشد، سازه تا بی‌نهایت به ارتعاش خود ادامه خواهد داد. اما عملاً به واسطه خصوصیات سازه، مقداری میرایی در آن به وجود می‌آید که موجب عکس‌العمل در مقابل ارتعاش سازه و میرا کردن آن می‌گردد. در سطح کلی، یک ساختمان می‌تواند تخریب نشود، و به پیکربندی پایدار دست یابد تنها در صورتی که انرژی ورودی کاملاً توسط سازه اتلاف شود. در غیر این صورت، انرژی ورودی باقی‌مانده موجب تخریب خواهد شد. در یک ساختمان معمولی، انرژی ورودی توسط اعضای سازه به صورت تبدیل به انرژی تغییر شکل خودشان اتلاف می‌شود. اعضای سازه می‌توانند مقدار محدودی از انرژی را قبل از ناپایدار شدن اتلاف کنند. گراپراساد و مخرج [۱۰] اظهار داشتند که به منظور جذب انرژی مؤثرترین هدف این است که بیشترین نیرو کاهش یابد و مدت‌زمان برای تغییر شکل افزایش یابد. تعدادی از محققان توجه خود را به انرژی سازه به عنوان کلیدی برای درک دینامیکی انفجار معطوف کرده‌اند. روش‌های مبتنی بر انرژی به مدت طولانی مورد بررسی قرار گرفته است. لوو [۱۱] جریان انرژی در حرکات ارتعاشی بدون بکارگیری مفاهیم تنش و کرنش به طور تحلیلی شرح می‌دهد. زینگ و پرایس [۱۲] یک مدل ریاضی برای توصیف نیرو جریان در یک زنجیره با لحاظ انرژی توسعه دادند. کارایی ساختمان را می‌توان با افزودن جاذب‌های انرژی (میراگر الحاقی) به ساختمان افزایش داد. بدین صورت که این وسایل قسمتی از انرژی ورودی را به تنهایی جذب و مستهلک می‌نمایند. دستگاه‌های مکانیکی مثل میراگرهای ویسکوز برای جذب شک در سیستم‌های نظامی برای سال‌های زیادی استفاده شده است و از سال ۱۹۹۰ به صورت گسترده برای حفاظت لرزه‌ای سازه‌ها استفاده شدند. تحقیقات بسیار کمی در استفاده از میراگرها برای حفاظت سازه‌ها در مقابل انفجار انجام شده است. با این حال روشن است که سازه‌ها در مقابل زمین‌لرزه‌ها با استفاده از میراگرها محافظت می‌شوند، بنابراین میراگرها باید ویژگی‌های مفید و خوبی برای مقاومت در مقابل انفجار نیز داشته باشند [۱۳].

میراگرهای ویسکوز به عنوان یکی از سیستم‌های جاذب انرژی، در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. عملکرد این میراگر به صورت فشرده شدن مایع لزج داخل سیلندر توسط پیستون است، درون پیستون، سیلندر دیگری وجود دارد که به وسیله سوراخ‌های ریزی مایع می‌تواند وارد آن شود، با اعمال فشار به سیستم مایع لزج با سرعت کمی بین دو سیلندر مبادله می‌شود و مقدار زیادی انرژی را تلف می‌کند. معادله تابع خروجی متداول و معمول میراگر ویسکوز به صورت رابطه $F = C.V^n$ مشخص می‌شود، که در آن F برابر نیروی خارجی، V برابر سرعت نسبی مقطع میراگر، C برابر ضریب میرایی و n توان ثابتی است که معمولاً مقداری بین $0/3$ و 2 است.

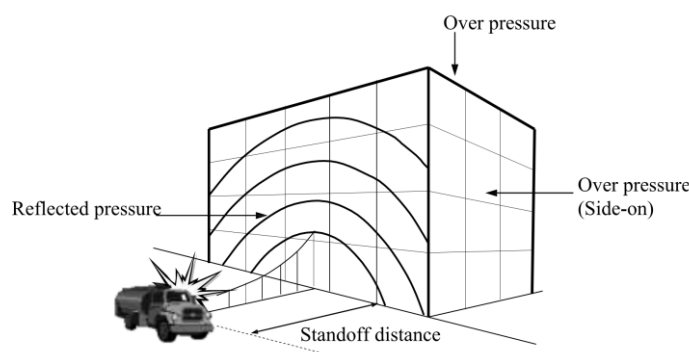
میاموتو و همکاران اثر میراگر ویسکوز مایع بر کاهش پاسخ ساختمان‌های فولادی تحت بارگذاری انفجاری را با پیروی از موضوعات زیر سنجیدند: توسعه‌ی یک بارگذاری انفجاری از یک ماده منفجره با ۳۱۱۱ پوند خرج، اثرات انفجار و مقایسه عملکرد یک قاب فولادی قراردادی همراه میراگر و بدون آن، همچنین یک ساختمان بتنی قراردادی با دیوار برشی، نتایج نشان می‌دهد میراگر ویسکوز مایع راه سودمندی برای بهبود قابل توجه عملکرد سازه‌های با قاب فولادی است [۱۳]. ایسلام [۱۴] مقاوم‌سازی یک ساختمان امنیتی در مصر با میراگر ویسکوز در مقابل بار انفجاری تحت فواصل مختلف ارزیابی کردند و بیان داشتند که استفاده از میراگر ویسکوز به عنوان گزینه اقتصادی در بهبود عملکرد سازه تحت بارگذاری انفجار مؤثر است.

در این تحقیق سعی شده است تا پاسخ دینامیکی، عملکرد و پایداری یک سازه ده طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی با و بدون میراگر ویسکوز تحت بارهای انفجار مورد مطالعه قرار گیرد. در ارزیابی رفتار این سازه سعی شده است تا بالانس انرژی ایجاد شده در سازه برای مقابله با انرژی ورودی ناشی از بار انفجار نیز بررسی شود. انرژی ورودی در سازه می‌تواند با انرژی جنبشی، انرژی تلف شده ناشی از میرایی، انرژی کرنشی الاستیک و انرژی کرنشی پلاستیک ایجاد بالانس کند. در این تحقیق نشان داده شده است تا سهم هر یک از انرژی‌ها در بالانس انرژی به چه صورت خواهد بود. همچنین مقایسه‌ای بین سازه‌ای که با میراگر ویسکوز و سازه‌ای که تنها با سیستم قاب خمشی طراحی شده است انجام شود تا بررسی شود کدام سازه رفتار بهتری در برابر بار انفجار خواهد داشت و بالانس انرژی در دو سازه به چه صورت انجام می‌شود. همچنین نشان داده شده است میزان سهم اتلاف انرژی میراگر ویسکوز در بالانس انرژی با انرژی ورودی در سازه‌ی دارای آنچه مقدار است.

۲- روش تحقیق

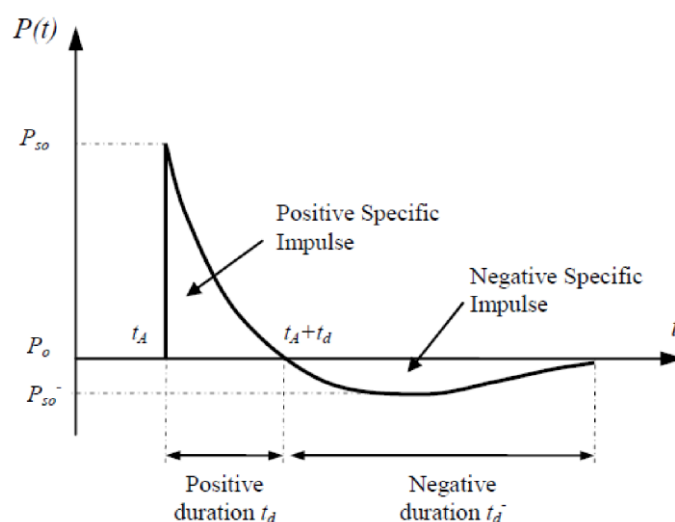
۲-۱- بار انفجار

انفجار در واقع آزاد سازی سریع و با مقیاس بالای انرژی است. انفجارها با توجه به ماهیت خود به سه گروه فیزیکی، شیمیایی و هسته‌ای تقسیم می‌شوند. قدرت یک بمب متعارف اساساً به دو متغیر وزن ماده‌ی منفجره و فاصله بمب از هدف وابسته است. وزن مواد منفجره اغلب با وزن معادل TNT بمب سنجیده می‌شود. انفجاری که در سال ۹۳ میلادی برج تجارت جهانی را لرزاند وزنی معادل ۸۱۶ کیلوگرم TNT داشت. انفجار ساختمان آلفرد پ. مورا ناشی از بمبی به وزن معادل ۱۸۱۴ کیلوگرم TNT بود [۱۵].



شکل ۱ تأثیرات بار انفجاری بر روی ساختمان [۱۵]

شکل ۱ کامیون معمول بمب گذاری شده با تاثیر فشار انفجار بر ساختمان را نشان می‌دهد. پارامترهای اصلی مؤثر را می‌توان با وزن خرج TNT و فاصله بین منبع انفجار و ساختمان تعریف کرد. موج انفجار بلافاصله به یک مقدار فشار بالاتر از اتمسفر محیط افزایش می‌یابد. افزایش فشار جانبی همانند گسترش موج شوک به بیرون از منبع انفجار متلاشی می‌شود. بعد از مدت کوتاهی، فشار پشت سمت مقابل ساختمان ممکن است به زیر فشار اتمسفر کاهش یابد. موج مکش نیز توسط ایجاد بادهای مکش بالا همراه با آثار تخریبی برای فاصله دور از منبع انفجار است.



تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار [۱۵]

تاریخچه زمان فشار ناشی از انفجار در فضای آزاد در شکل ۲ نشان داده شده است. فشار ناشی از انفجار به دو فاز مثبت و منفی تقسیم می‌شود. حداکثر اضافه فشار در فاز مثبت بلافاصله بعد از انفجار شکل می‌گیرد و آنگاه به صورت نمایی تا فشار اتمسفر کاهش می‌یابد. دامنه‌ی اضافه فشار در فاز منفی از دامنه‌ی اضافه فشار در فاز مثبت بسیار کمتر است. در مقابل فاز منفی مدت تداوم بیشتری نسبت به فاز مثبت دارد. این وضعیت در واقع معرف یک تابع نمایی است که در رابطه‌ی ۱ تعریف شده است [۱۶].

با توجه به اینکه فاز مثبت دامنه و سطح زیر منحنی بیشتری دارد، در تحلیل و طراحی سازه‌ها اغلب از این فاز استفاده می‌شود بدون آنکه دچار بی‌دقتی شویم می‌توان تاریخچه زمان انفجار در فاز مثبت را به صورت یک بار مثلثی ایدئال سازی کرد [۱۶]. رابطه‌ی ۲ معرف این بارگذاری ایدئال شده است. تحقیقات قبلی بر روی المان‌های سازه‌ای نشان می‌دهد استفاده از بارگذاری مثلثی به جای نمایی دقت قابل قبولی دارد و تا حدی محافظه کارانه است [۱۷].

$$p(t) = p_s^+ \left(1 - \frac{t}{T^+}\right) e^{\frac{-bt}{T^+}} \quad (1)$$

$$p(t) = p_{\max} \left(1 - \frac{t}{T_d}\right) \quad (2)$$

در روابط فوق P_s^+ و P_{\max} به ترتیب بیانگر حداکثر اضافه فشار در بارگذاری نمایی و مثلثی می‌باشند. T^+ و t_d مدت تداوم بارگذاری در الگوی بارهای نمایی و مثلثی و b یک پارامتر تجربی است.

۲-۲- پارامترهای بارگذاری انفجار

شدت یک انفجار غیر هسته‌ای اساساً به دو متغیر فاصله و وزن ماده منفجره بستگی دارد. برای این منظور اغلب از فاصله‌ی مقیاس شده استفاده می‌گردد. فاصله‌ی مقیاس شده در رابطه‌ی ۳ تعریف شده است.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (3)$$

در رابطه‌ی فوق R فاصله‌ی هدف از منبع انفجار و W وزن معادل TNT خرج انفجاری است. تاکنون روابط متعددی برای تخمین اضافه فشار ناشی از انفجار ارائه شده است. اغلب روابط تخمین شدت انفجار از فاصله‌ی مقیاس شده استفاده می‌کنند. مشهورترین این روابط، روابط براد است که در سال ۵۵ میلادی ارائه شده است [۱۶]:

$$p_{so} = \frac{6.7}{z^3} + 1bar, p_{so} > 10 bar \quad (4)$$

$$p_{so} = \frac{0.975}{z} + \frac{1.455}{z^2} + \frac{5.85}{z^3} - 0.019bar, 0.1 bar < p_{so} < 10 bar$$

رابطه‌ی میلز که در سال ۸۷ میلادی ارائه شده است، حداکثر اضافه فشار ناشی از انفجار را بر حسب کیلو پاسکال به دست می‌دهد [۱۶]:

$$P_{so} = \frac{1772}{z^3} - \frac{114}{z^2} + \frac{108}{z} \quad (5)$$

در بررسی تاثیر انفجار بر یک سازه و پاسخ سازه در برابر آن دو عامل نقش تعیین کننده دارند. نخست ماکزیمم اضافه فشار که در مورد شیوه تخمین آن بحث شد و دوم مدت زمان تداوم فاز مثبت. اصولاً یکی از ویژگی‌های اصلی بارگذاری انفجاری اعمال بار در زمان بسیار اندک است. برای تخمین مدت فاز مثبت انفجارها نمودارها و روابط تجربی بسیاری ارائه شده است. در این مقاله برای تخمین مدت تداوم فاز مثبت از رابطه کنی و گراهام استفاده می‌شود. این رابطه که با شماره ۶ مشخص شده است، مدت زمان فاز مثبت را بر حسب ثانیه به دست می‌دهد [۱۸]:

$$\frac{t_d}{W^{1/3}} = \frac{980 \left[1 + \left(\frac{z}{0.54} \right)^{10} \right]}{\left[1 + \left(\frac{z}{0.02} \right)^3 \right] \left[1 + \left(\frac{z}{0.74} \right)^6 \right] \sqrt{1 + \left(\frac{z}{6.9} \right)^2}} \quad (6)$$

۲-۳- انرژی در سازه

انرژی ورودی به سازه (کار خارجی) می‌تواند به انرژی جنبشی، انرژی کرنشی و انرژی‌های تلف شده توسط میرایی تبدیل شود. انرژی در اینجا به وضوح تعریف شده است. کار خارجی، کاری است که توسط نیروهای وارد شده انجام می‌گیرد. به عنوان مثال عملی که توسط شتاب ثقل بر روی جرم سازه انجام می‌شود. نیروی ثقلی کار خارجی را از طریق جابجایی ساختمان انجام می‌دهد. جریان کل انرژی وارد شده به سیستم (کار خارجی) باید مساوی کل مقدار انرژی در سیستم (مجموع انرژی داخلی و جنبشی) باشد [۱۹]. انرژی داخلی (کار تغییر شکل) با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$E_{int} = \int (\int \sigma d\varepsilon) dV \quad (7)$$

مجموع کرنش را می توان به الاستیک (قابل برگشت) و پلاستیک (غیرقابل برگشت) تقسیم کرد:

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \quad (8)$$

انرژی داخلی شامل مجموع انرژی کرنش الاستیک و کار ناشی از تغییر شکل ماندگار است:

$$E_{int} = \int (\int \sigma d\varepsilon) dV = \int (\int \sigma d\varepsilon^e) dV + \int (\int \sigma d\varepsilon^p) dV \quad (9)$$

$$\int (\int \sigma d\varepsilon^e) dV = \text{elastic strain energy}, \int (\int \sigma d\varepsilon^p) dV = \text{permanent deformation work.}$$

با این حال، تنها فقط تغییر شکل (انرژی داخلی) نتیجه کار خارجی انجام شده در یک سیستم نیست. بلکه اگر یک تیر با سرعت v سقوط کند، کار خارجی (توسط گرانش) به صورت انرژی جنبشی ظاهر می شود، اما با این تفاوت که هیچ کرنش و هیچ انرژی داخلی (بدون تغییر شکل) در سیستم ایجاد نمی شود. انرژی جنبشی با استفاده از رابطه ۱۰ به دست می آید:

$$E_{kin} = \int \frac{1}{2} \rho v^2 dV \quad (10)$$

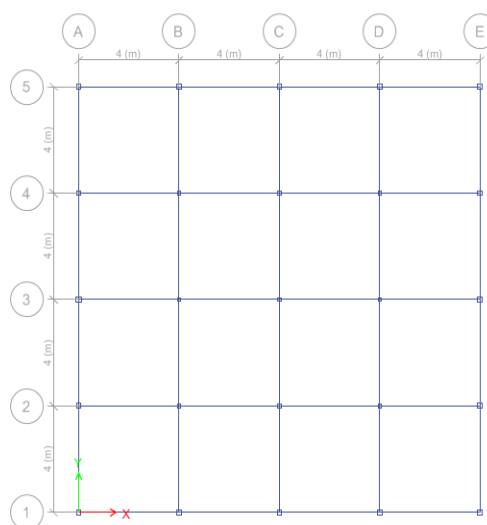
۲-۴- مدل سازه ای

برای بررسی اهداف مورد نظر در این تحقیق از سازه ای ۱۰ طبقه استفاده شده است. سازه به صورت ۴ دهانه ای ۴ متری با پلان متقارن (شکل ۳) با ارتفاع ۳ متر در نظر گرفته شده است. بار مرده ی کف برابر 600 kg/m^2 و بار زنده برابر 240 kg/m^2 در نظر گرفته شده است. ابتدا سازه ها با سیستم قاب خمشی ویژه برای ۷۵ درصد بار جانبی بر اساس آیین نامه ی ۷ ASCE طراحی شده است. پس از طراحی اولیه برای این سازه یک میراگر ویسکوز طراحی شده است. برای طراحی فرض شده است سازه در ایالت Montata با شتاب های $S_s=1.712g$ و $S_1=0.512g$ قرار دارد. پس از طراحی اولیه ی سازه، میراگرها برای میرایی ۲۵٪ بر اساس آیین نامه ی ۷ ASCE طراحی شده است. در این تحقیق میراگرهای ویسکوز غیر خطی با ضریب توان $n=0.5$ استفاده شده است. نیروی هر میراگر، ضریب میرایی کلی سازه و ضریب میرایی هر میراگر محاسبه شده است. پس از طراحی میراگرها با استفاده از روش تحلیل طیفی کنترل های لازم در سازه انجام شده است. در طراحی سازه ها از دو پارامتر نسبت DCR^۱ و دریفت سازه برای ارزیابی کفایت سازه ها استفاده شده است. همچنین سعی شده است تا مقاطع سازه ای به صورت تیپ انتخاب شوند تا مدل سازی غیرخطی سازه ها با سرعت بیشتری انجام شود. با این تفاسیر سعی شده است تا ضمن رعایت محدوده مجاز دریفت طبقات، نسبت DCR اعضای سازه ای نزدیک به یک باشد. ضمانت برای ارزیابی عملکرد دو سازه ی مورد نظر تحقیق می بایست یک تعادل بین نسبت DCRها در دو سازه نیز ایجاد شود تا پاسخ های سازه ها نزدیک به یکدیگر باشد که این نیز سختی کار طراحی را دوچندان کرده است. بنابراین می توان گفت با در نظر گرفتن نسبت DCR و دریفت مجاز، مقاطع طوری انتخاب شده اند که عملکرد سازه ها نزدیک به هم باشند. سازه ده طبقه از این جهت انتخاب شده است تا نماینده دسته ای از سازه های میان مرتبه (نه کوتاه و نه بلند) باشد. کاربری تمام طبقات نیز مسکونی فرض شده است.

¹ Demand Capacity Ratio

جدول ۱ نتایج حاصل از طراحی در قالب مشخصات مقاطع سازه‌ای

نوع سازه	طبقه	تیر	ستون
قاب خمشی دارای میراگر	۱-۴	W12x35	Tube300x300x16
	۵-۸	W12x30	Tube200x200x16
	۱۰ و ۹	W12x19	Tube180x180x10
قاب خمشی ویژه	۱-۴	W12x40	Tube340x340x17.5
	۵-۸	W12x35	Tube240x240x16
	۱۰ و ۹	W12x22	Tube180x180x10



شکل ۳ پلان سازه

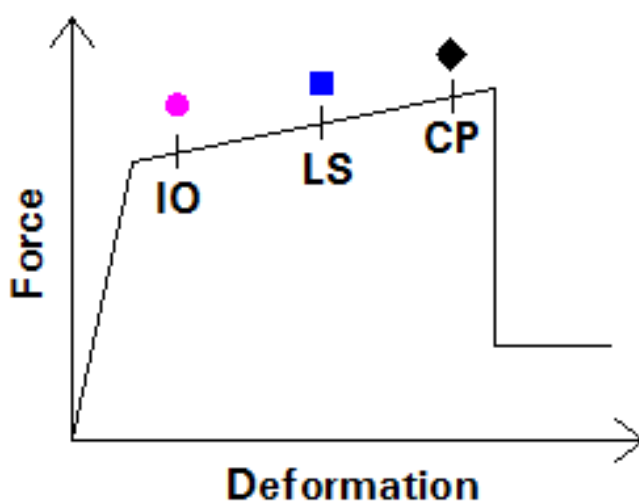
برای درک بهتر عملکرد سازه‌های دارای میراگر ویسکوز در بار انفجار، سازه‌های بدون میراگر نیز برای ۱۰۰٪ بار جانبی طراحی شده است. برای طراحی سازه‌ها تنش تسلیم فولاد برابر 2400 kgf/cm^2 و مدول الاستیسیته برابر 2000000 Kgf/cm^2 در نظر گرفته شده است. برای مقاطع تیر از مقطع استاندارد W و برای ستون‌ها از مقطع استاندارد Tube استفاده شده است. مشخصات مقاطع و میراگرهای مورد بررسی در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. سازه‌ها در ابتدا به صورت خطی در نرم‌افزار Etabs طراحی شده‌اند، پس از طراحی اولیه به صورت غیر خطی در نرم‌افزار perform-3D مدل‌سازی شده است. برای مدل‌سازی غیر خطی از مفصل پلاستیک متمرکز بر اساس آیین‌نامه‌ی Fema356 استفاده شده است. برای طراحی میراگر ویسکوز با فرض منطقه لرزه‌خیزی مورد نظر، ابتدا اشکال مودی تعیین شده، سپس نیروی وارد بر هر طبقه و نیروی مورد نیاز برای میراگرها محاسبه شده است و در نهایت ضریب میرایی میراگر ویسکوز محاسبه شده است. سپس با تعیین توان سرعت، مقدار سرعت برای هر میراگر تعیین شده است. پس از طراحی سازه، با داشتن چهار پارامتر نیرو، سرعت، توان سرعت و ضریب میرایی میراگر ویسکوز منحنی رفتاری میراگر تعیین و در نرم‌افزار پرفورم تعریف شده است.

جدول ۲ مشخصات میراگرهای مورد استفاده

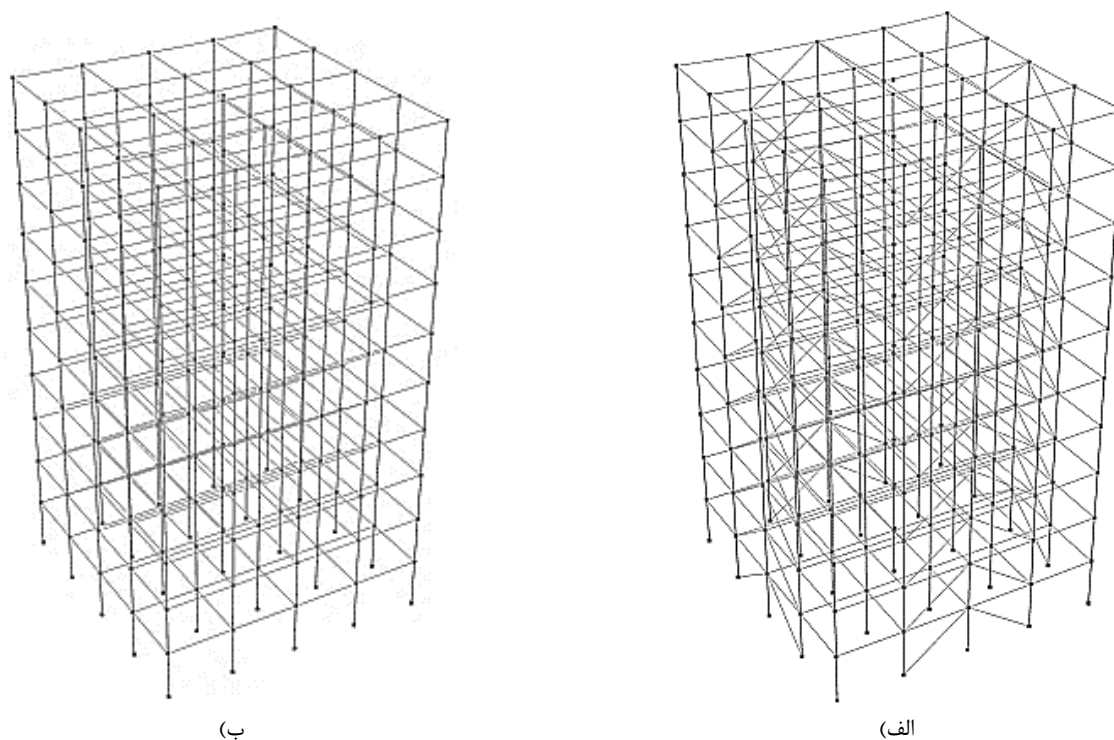
سازه	تعداد میراگر در هر راستا	ضریب سرعت	ضریب میرایی کلی سازه	ضریب میرایی هر میراگر	نیروی میراگر
۱۰ طبقه	۴۰	0.5	$58614154 \text{ Kg.sec}^{0.5}/\text{m}^{0.5}$	$732676.9 \text{ Kg.sec}^{0.5}/\text{m}^{0.5}$	7326769 Kgf

برای مدل‌سازی مفصل پلاستیک بر اساس استاندارد Fema365 ابتدا پارامترهای مدل‌سازی بر اساس مشخصات المان‌های مورد نظر استخراج و سپس مفاصل پلاستیک برای سه سطح عملکرد LS، IO و CP به صورت متمرکز تعریف شده است. مدل مفصل پلاستیک مورد نظر در شکل ۴ نشان داده شده است. مدل غیر خطی دارای میراگر ویسکوز مدل‌سازی شده در نرم‌افزار Perform-3D در شکل ۵ نشان داده شده است. پس از مدل‌سازی سازه برای اطمینان از صحت مدل و عملکرد میراگرها، سازه ابتدا بدون در نظر گرفتن بار ثقلی در معرض بار چرخه‌ای با دامنه‌ی افزایشی قرار گرفته و سپس منحنی هیستریزس میراگرها که می‌بایست به صورت حلزونی باشد بررسی شده تا صحت مدل ارزیابی شود. شکل ۶ منحنی ضرایب بار وارده به سازه و منحنی هیستریزس یکی از میراگرهای ویسکوز را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل مشخص می‌شود مدل‌سازی المان‌های میراگر به درستی می‌تواند رفتار میراگرهای ویسکوز را مدل‌سازی نماید.

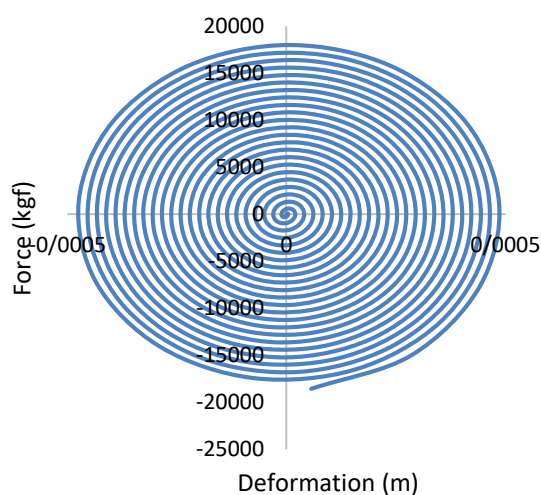
یکی از دستورالعمل‌های رایج، دستورالعمل *FEMA 356* هست که در آن مبانی و ضوابط ارزیابی ساختمان‌های موجود و یا بهسازی شده برای سطح عملکرد مورد نظر یا بهبود عملکرد آن‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای ارائه شده است. نکته‌ی مهم این است که آیین‌نامه‌های فوق، برای طراحی در برابر بارهای لرزه‌ای تدوین شده‌اند و با توجه به متفاوت بودن ماهیت بار انفجاری و رفتار سازه در برابر آن، ضروری است از آیین‌نامه‌هایی که برای طراحی سازه‌ها در برابر انفجار تدوین شده‌اند، استفاده شود. یکی از معتبرترین مراجع تحلیل و طراحی سازه‌ها در برابر انفجار *UFC 3-340-02-2014* است. در *UFC 3-340-02-2014* روند طراحی ارائه نشده است و تنها روش طراحی تیرها، ستون‌ها و دال‌های بتنی به صورت مجزا بیان گردیده است. همچنین با مقایسه‌ی معیارهای پذیرش تیرهای ارائه شده در *UFC 3-340-02-2014* با معیارهای تعیین شده در *FEMA 356* مشاهده می‌شود که *UFC 3-340-02-2014* برای در نظر گرفتن مقدار مجاز دوران‌ها، تنها بار قائم را به عنوان معیار در نظر گرفته است (تیرها دارای انحنای ساده می‌باشند). این در حالی است که در دستورالعمل لرزه‌ای *FEMA 356* و سایر مراجع طراحی لرزه‌ای، مقدار مجاز دوران‌ها بر اساس بارهای افقی زلزله در حضور بارهای قائم ثقلی تعیین شده است (تیرها دارای انحنای مضاعف می‌باشند). همچنین *UFC 3-340-02-2014* تنها برای دو گروه ایمنی ساکنین و حفاظت از تأسیسات معیارهای پذیرش را ارائه کرده است. این در حالی است که *FEMA 356* برای اعضای اصلی سه سطح عملکرد استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه‌ی فروریزش را ارائه نموده است. با توجه به نحوه‌ی بارگذاری انفجاری وارد بر قاب‌ها (بارهای افقی و قائم) در این تحقیق، برای تعریف سطوح عملکرد اعضا و مفاصل پلاستیک، از معیارهای پذیرش *FEMA 356* استفاده گردیده است. به علاوه، استفاده از معیارهای پذیرش *FEMA 356* در طراحی در برابر انفجار در جهت اطمینان است. زیرا مقادیر مجاز دوران در *FEMA 356* از مقادیر مجاز آیین‌نامه *UFC 3-340-02-2014* کم‌تر است. در طراحی قاب‌ها توصیه‌ها و محدودیت‌های ذکر شده در *UFC 3-340-02-2014* لحاظ گردیده است.



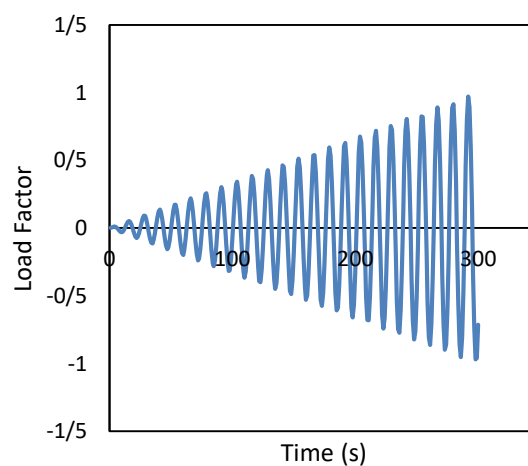
شکل ۴ مدل مفصل پلاستیک



شکل ۵ مدل‌های سازه‌ای (الف) سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز (ب) سازه‌ی بدون میراگر ویسکوز



(ب)



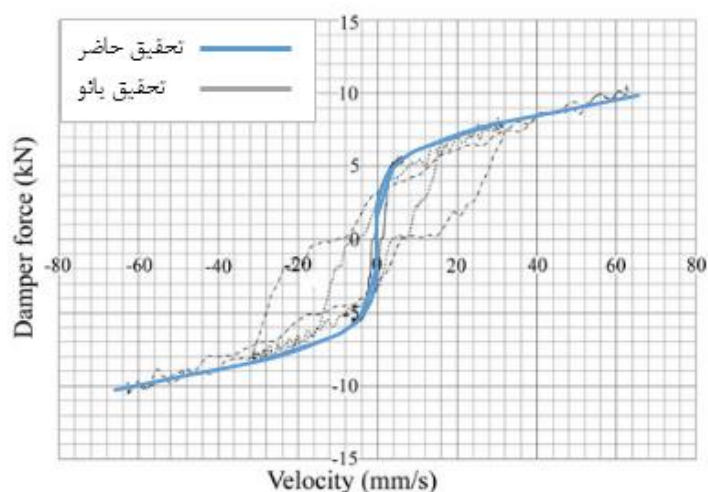
(الف)

شکل ۶ منحنی رفتاری میراگر ویسکوز (الف) بار اعمالی به سازه (ب) منحنی هیستریزس میراگر ویسکوز در طبقه‌ی پنجم

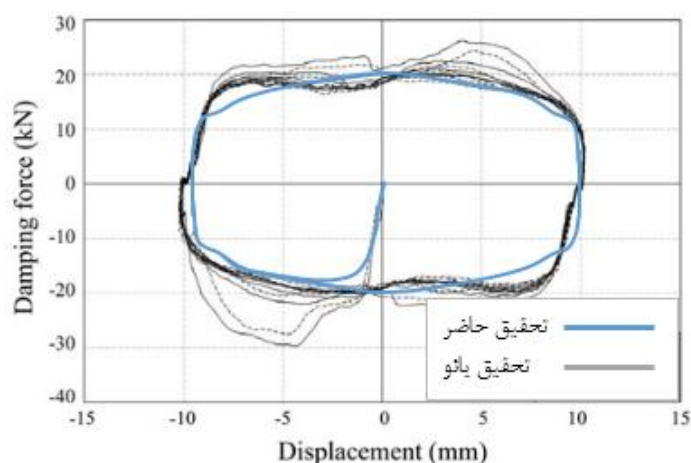
به طور معمول رفتار میراگرهای ویسکوز مبتنی بر سرعت است و منحنی نیرو-تغییر مکان در آن‌ها از همان ابتدا روندی غیر خطی دارد و همانند یک بیضی است. قطرهای این بیضی در میراگرهای ویسکوز منطبق بر محورهای نیرو-تغییر مکان هستند (برخلاف میراگر ویسکوز الاستیک). این موارد در منابع [۲۰، ۲۱] آورده شده است. بنابراین طبیعی است که منحنی نیرو تغییر مکان در المان ویسکوز به صورت یک بیضی باشد. از آنجائی که بار وارده چرخه‌ای است منحنی هیستریزس نیز به صورت حلزونی شکل درمی‌آید و با افزایش مقدار نیروی وارده وسعت این حلزونی نیز بیشتر می‌شود.

۲-۵- اعتبار سنجی نتایج

برای اعتبار سنجی نتایج و رفتار مربوط به میراگر ویسکوز از یک تحقیق آزمایشگاهی مبتنی بر رفتار چرخه‌ای استفاده شده است. یائو و همکاران (۲۰۱۴) [۲۲] یک میراگر ویسکوز را در معرض بار چرخه‌ای قرار داده و سپس منحنی رفتاری آن را بررسی کردند. برای مدل‌سازی عددی این میراگر در نرم‌افزار پرفورم از مدل رفتاری Fluid Damper استفاده شده است. ضرایب Rae at last segment طوری کالیبره شده است که هم ضریب C0 مطابق با داده‌های تحقیق شود و هم منحنی رفتاری به منحنی رفتاری ارائه شده در تحقیق یائو نزدیک باشد. منحنی‌های نیروی میرائی-تغییر مکان و نیروی میرایی سرعت به عنوان دو خروجی تحقیق یائو برای ارزیابی صحت نتایج انتخاب شده است. نتایج مدل‌سازی عددی تحقیق حاضر و مقایسه آن با مدل آزمایشگاهی یائو در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد انطباق مناسبی بین مدل آزمایشگاهی یائو و مدل ارائه شده در این تحقیق وجود دارد.



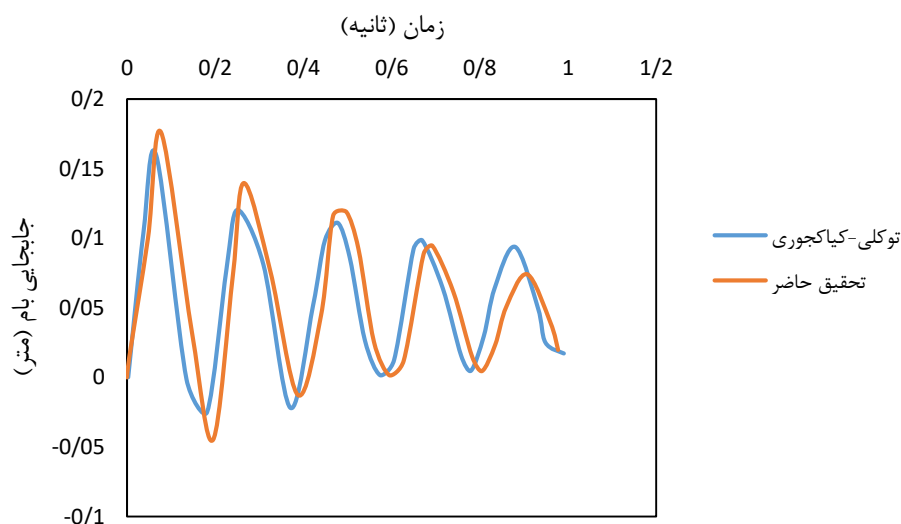
(الف)



(ب)

شکل ۷ نتایج اعتبار سنجی الف) مقایسه منحنی رفتاری نیرو-سرعت در مدل عددی تحقیق حاضر با تحقیق یائو ب) مقایسه منحنی رفتاری نیرو-تغییر مکان در مدل عددی تحقیق حاضر با تحقیق یائو

برای اطمینان از صحت محاسبات بار انفجار و ارزیابی پاسخ دینامیکی سازه مورد نظر تحقیق از مدل عددی توکلی و کیاکجوری [۲۳] استفاده شده است. آنها یک قاب فولادی پنج طبقه را تحت بار انفجار تحلیل کرده اند. مدل عددی آن ها در نرم افزار آباکوس انجام شده و قاب تحت بار انفجاری معادل با ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۱۵ متر قرار گرفته است. آن ها در ابتدا یک سازه سه بعدی را طراحی کرده و سپس یک قاب را به صورت دو بعدی در نرم افزار آباکوس مدل کرده اند. در نهایت جابجایی افقی قاب به عنوان پاسخ سازه جهت اعتبار سنجی استخراج و مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد پاسخ مدل سازی شده در تحقیق حاضر (منحنی نارنجی در شکل ۸) همگرایی نزدیکی با مدل عددی توکلی-کیاکجوری (منحنی آبی در شکل ۸) دارد.



شکل ۸ مقایسه مدل عددی تحقیق حاضر با مدل عددی توکلی-کیاکجوری جهت اعتبار سنجی

۳- سناریوهای بار گذاری

در این تحقیق ۱۲ سناریوی انفجار برای سازه های عنوان شده در قسمت قبل در نظر گرفته شده است. در هر سناریو فرض شده است بارهای وارده به سازه معادل بار ناشی از انفجار مقادیر مختلف TNT در فواصل مختلف بوده است. در هر سناریو دو پارامتر اضافه فشار ناشی از انفجار و مدت زمان دوام این فشار محاسبه و سپس با محاسبه ی سطح وارده به سازه به نیرو تبدیل و در نهایت به صورت نقطه ای به سازه اعمال شده است. اضافه فشار ناشی از هر انفجار با استفاده از رابطه ی ۵ و زمان دوام آن نیز بر اساس رابطه ی ۶ برای هر نقطه از سازه محاسبه و به آن اعمال شده است. برای وجه هایی از سازه در معرض انفجار قرار داشتند، ابتدا فشار ناشی از موج انفجار محاسبه شده است. سپس با توجه به سطح بارگیر هر گره (محل اتصال تیر به ستون در وجه مورد نظر سازه) نیروی معادل با آن فشار محاسبه و به سازه اعمال شده است. در جدول ۳ مشخصات هر سناریوی انفجار و فاصله ی مقیاس شده برای نزدیک ترین نقطه به سازه و همچنین زمان دوام اضافه فشار ناشی از انفجار برای این نقطه نشان داده شده است:

جدول ۳ مشخصات بار انفجاری

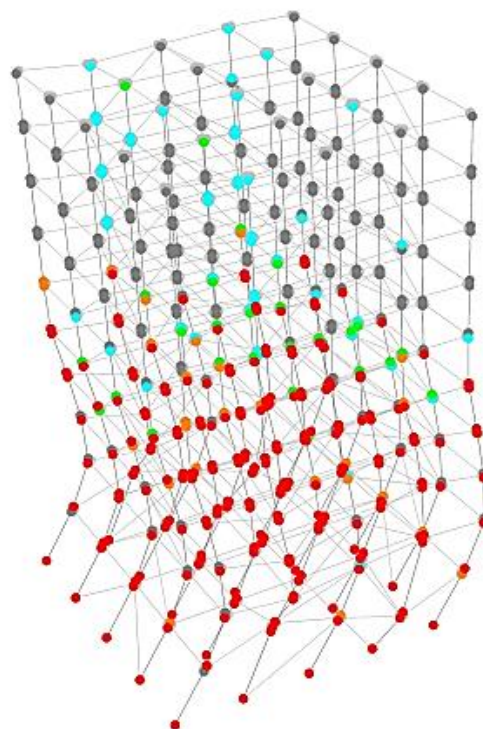
نام	فاصله (متر)	جرم TNT (کیلوگرم)	فاصله مقیاس شده نزدیک ترین نقطه سازه به انفجار	زمان دوام نزدیک ترین نقطه سازه به انفجار (ms)
100-1	1	100	0.681292	0.798462
100-5	5	100	1.256241	3.363129
100-10	10	100	2.249296	6.053435
500-1	1	500	0.39842202	1.00460205
500-5	5	500	0.734654	1.811421

6.070643	1.315396	500	10	500-10
11.57738	2.548033	500	20	500-20
2.472685	0.316228	1000	1	1000-1
1.003101	0.583095	1000	5	1000-5
5.601604	1.044031	1000	10	1000-10
11.82207	2.022375	1000	20	1000-20
16.86604	3.014963	1000	30	1000-30

۴- نتایج تحلیل

۴-۱- عملکرد سازه در بارهای انفجار

پس از مدل سازی و تعیین بارهای وارد بر سازه، تحلیل دینامیکی غیر خطی در سازه‌ها انجام شده و سپس عملکرد سازه‌های مورد بررسی تحت بارهای عنوان شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این قسمت از پژوهش معیارهای دوران مفاصل پلاستیک و تغییرات تغییر مکان جانبی نسبی طبقات تحت بارهای انفجاری مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. نتایج تحلیل نشان داده است که ستون‌های سازه‌ی ۱۰ طبقه دارای میراگر ویسکوز هنگامی که در معرض سناریوهای ۱-۵۰۰، ۱-۱۰۰۰ و ۵-۱۰۰۰ قرار می‌گیرد از سطح عملکرد CP عبور کرده و دچار خرابی کلی می‌شود. شکل ۹ دوران مفاصل پلاستیک ستون را در سطوح عملکرد CP در سناریوی ۱-۱۰۰۰ نشان می‌دهد. بر اساس این شکل بسیاری از ستون‌های سازه به سطح عملکرد CP (نقاط قرمز رنگ) رسیده یا از آن رد شده‌اند که این امر نشان‌دهنده‌ی خرابی کلی در سازه است.



شکل ۹ سطح عملکرد مفاصل پلاستیک در سازه‌ی ۱۰ طبقه‌ی دارای میراگر ویسکوز در سناریوی انفجار ۱-۱۰۰۰

جدول ۴ تعداد دوران مفاصل پلاستیک تشکیل شده در ستون‌ها را در سطح عملکرد LS و CP نشان می‌دهد. بر اساس این جدول دوران مفاصل پلاستیک در ستون‌ها با افزایش وزن TNT و کاهش فاصله افزایش یافته و با کاهش وزن TNT و افزایش فاصله سطح ایمنی بالاتری را ایجاد می‌نماید.

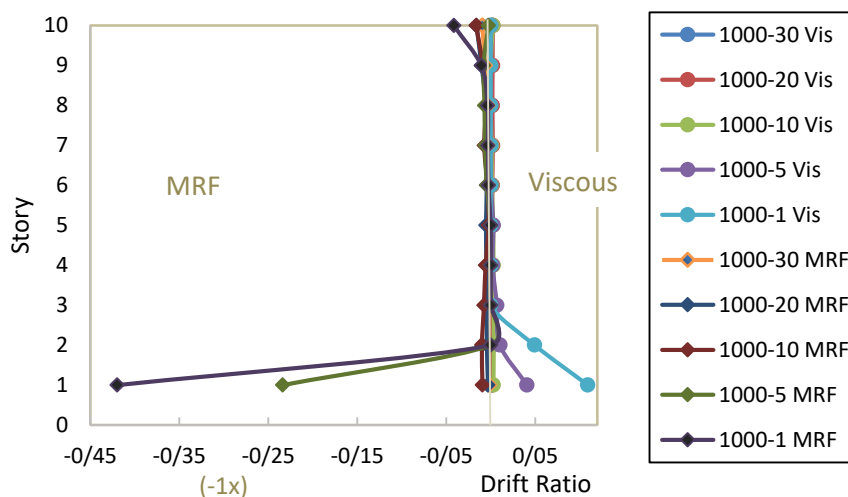
جدول ۴ تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در ستون‌های سازه‌های مورد نظر

سازه دارای سیستم قاب خمشی ویژه		سازه دارای میراگر ویسکوز		نام
تعداد مفاصل پلاستیک در سطح عملکرد CP	تعداد مفاصل پلاستیک در سطح عملکرد LS	تعداد مفاصل پلاستیک در سطح عملکرد CP	تعداد مفاصل پلاستیک در سطح عملکرد LS	
۳	۵۶	۰	۳	100-1
۰	۰	۰	۰	100-5
۰	۰	۰	۰	100-10
۱۲۵	۱۱۸	۱۱۰	۱۱۵	500-1
۵۰	۳۲	۲	۲۸	500-5
۰	۰	۰	۰	500-10
۰	۰	۰	۰	500-20
۱۸۲	۲۰۱	۱۷۵	۱۸۰	1000-1
۱۱۵	۴۱	۵۴	۳۶	1000-5
۰	۵	۰	۳	1000-10
۰	۰	۰	۰	1000-20
۰	۰	۰	۰	1000-30

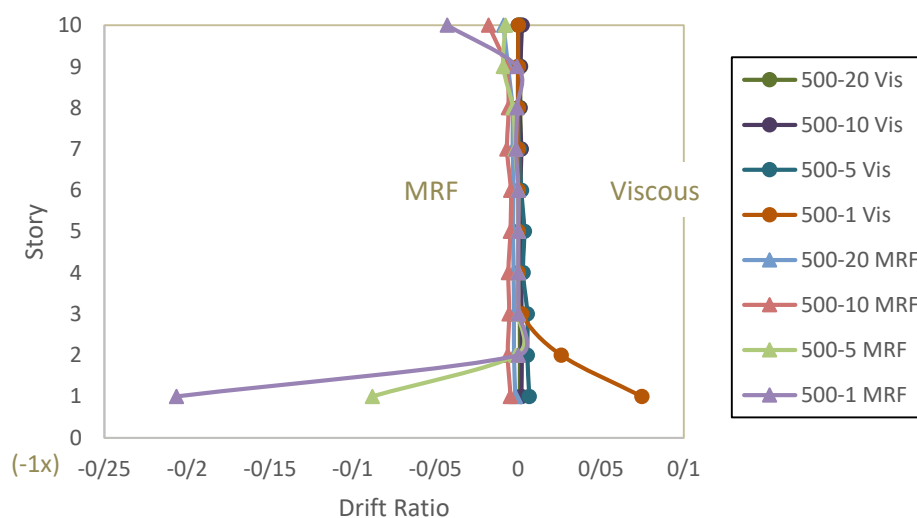
بررسی نتایج حاصل از تحلیل در سازه‌ی دارای سیستم قاب خمشی ویژه (MRF) نشان می‌دهد در سناریوی ۱-۱۰۰ تعداد مفاصل پلاستیک در سطح عملکرد LS و CP بیشتر از سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز است. به طور کلی با مقایسه‌ی دوران مفاصل پلاستیک در سازه‌های دارای میراگر ویسکوز و بدون آن مشاهده می‌شود در سازه‌هایی که دچار خرابی کلی در سازه‌ها می‌شود وجود میراگر ویسکوز باعث می‌شود سازه با تعداد مفاصل پلاستیک کمتری دچار خرابی کلی شود از طرفی سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز تحت سناریوی ۵-۵۰۰ دچار خرابی کلی نشده است اما در سازه‌ی قاب خمشی خرابی کلی در سازه اتفاق افتاده است. با توجه به نتایج تحلیل مشاهده شده است برخی از مفاصل پلاستیک در مدت دوام بار انفجار (td) و مابقی نیز در ارتعاش آزاد سازه تشکیل شده است. سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز با وجود اینکه برای ۷۵٪ بار جانبی طرح طراحی شده است، عملکرد بهتری نسبت به سازه‌ی قاب خمشی داشته است به طوری که در تمامی سناریوهای بارگذاری انفجار تعداد دوران مفاصل پلاستیک ایجاد شده در سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز کمتر از سازه‌ی قاب خمشی بوده است.

در ادامه تغییرمکان جانبی نسبی سازه‌های مورد نظر در سناریوهای بارگذاری انفجار عنوان شده بحث خواهد شد. برای ارزیابی و مقایسه‌ی راحت‌تر منحنی تغییرمکان جانبی نسبی دو سازه‌ی مورد بحث در این تحقیق در یک شکل قرار گرفته است بنابراین مقادیر محور افقی در سمت چپ نمودار باید در ضریب ۱- ضرب شوند. شکل ۱۰ الف منحنی تغییرمکان جانبی نسبی سازه‌ها را در سناریوی بار انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT نشان می‌دهد بر اساس این شکل مقادیر تغییرمکان جانبی نسبی سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز در تمامی سناریوهای انفجار کمتر از سازه‌ی قاب خمشی است. همچنین در سناریوهای ۱-۱۰۰۰ و ۵-۱۰۰۰ که سازه‌ها با خرابی کلی همراه هستند مقادیر تغییرمکان جانبی نسبی سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز کمتر از سازه‌ی دارای قاب خمشی است که نشان می‌دهد میزان ناپایداری سازه در سازه‌های بدون میراگر ویسکوز بیشتر از سازه‌های دارای میراگر است. همچنین با افزایش فاصله از محل انفجار بیشینه تغییر مکان نسبی در طبقات سازه کاهش می‌یابد. طبیعتاً بین آستانه فروپاشی (که در اکثر مراجع مقدار آن برای ۰/۰۴ و یا در روش ۲۰٪ تغییرمکان جانبی نسبی متناظر با ۲۰٪ شیب منحنی IDA در ناحیه خطی) و تغییرمکان جانبی نسبی نقطه ناپایداری سازه (تغییرمکان جانبی نسبی ۰/۱ یا نقطه‌ای که شیب منحنی IDA به صفر می‌رسد) تفاوت وجود دارد (برای مطالعه بیشتر مرجع [۹] پیشنهاد می‌شود). اگر مقدار ۰/۱ به عنوان تغییرمکان جانبی نسبی ناپایداری در نظر گرفته شود طبیعتاً در سناریوهایی مانند ۱-۱۰۰۰ و ۵-۱۰۰۰ سازه با سیستم قاب خمشی به مرز ناپایداری می‌رسد و اگر تغییرمکان جانبی نسبی ۰/۰۴ به عنوان تغییرمکان جانبی نسبی حد آستانه فروپاشی در نظر گرفته شود در سناریوهایی مانند ۵-۱۰۰۰ سازه دارای میراگر ویسکوز به این مرز رسیده است.

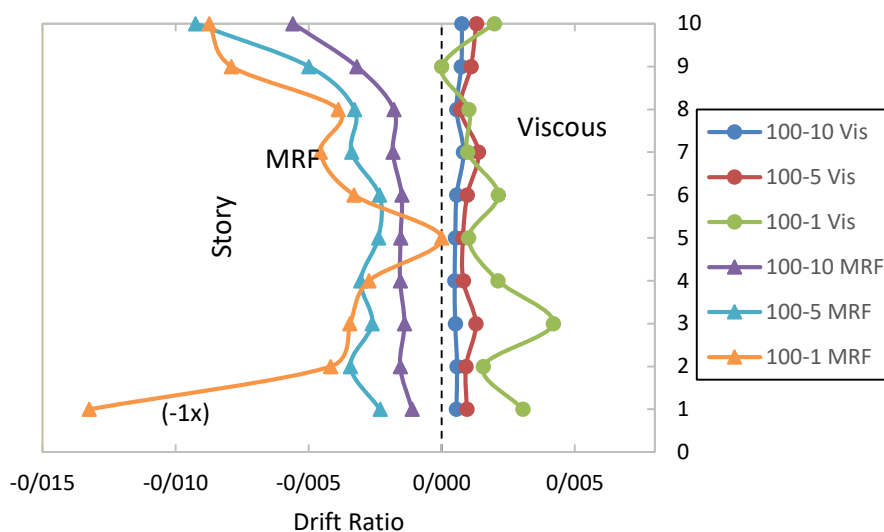
در شکل‌های ۱۰ ب و ۱۰ ج به ترتیب بیشینه تغییرمکان جانبی نسبت‌بقات در سناریوهای انفجار ۵۰۰ و ۱۰۰ KG TNT نشان داده شده است. بر اساس این شکل‌ها مشاهده می‌شود با کاهش وزن مواد منفجره (TNT) مقدار پاسخ سازه با کاهش همراه است. به طور کلی هرچه فاصله‌ی مقیاس شده در سناریوی انفجار کاهش کمتر باشد پاسخ سازه بیشتر می‌شود و هرچه فاصله‌ی مقیاس شده بیشتر باشد پاسخ سازه کمتر می‌شود. بر اساس نتایج این تحقیق در صورتی که فاصله‌ی مقیاس شده در سناریوهای انفجار بیشتر از ۱ باشد پاسخ سازه بسیار کم بوده و رفتار سازه تنها شامل ارتعاشات الاستیک است. در واقع در فاصله‌ی مقیاس شده‌ی بیشتر از یک مقادیر تغییرمکان جانبی نسبی هیچ‌یک از سازه‌ها طبقه بیشتر از مقدار تغییرمکان جانبی نسبی در سطح عملکرد IO نیست با این وجود به صورت محدودی دوران مفاصل پلاستیک در سازه به سطح عملکرد LS می‌رسد.



(الف)



(ب)

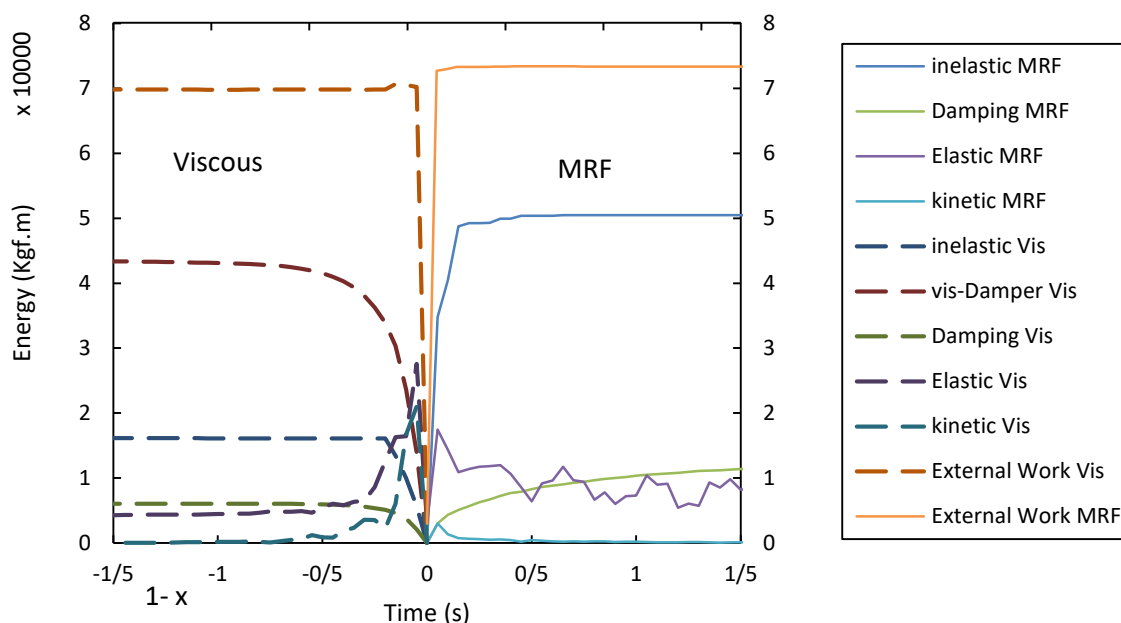


(ج)

شکل ۱۰ منحنی تغییر مکان جانبی نسبی سازه‌ها تحت بار انفجار الف) ۱۰۰۰ kg TNT (ب) ۵۰۰ kg TNT (ج) ۱۰۰ kg TNT

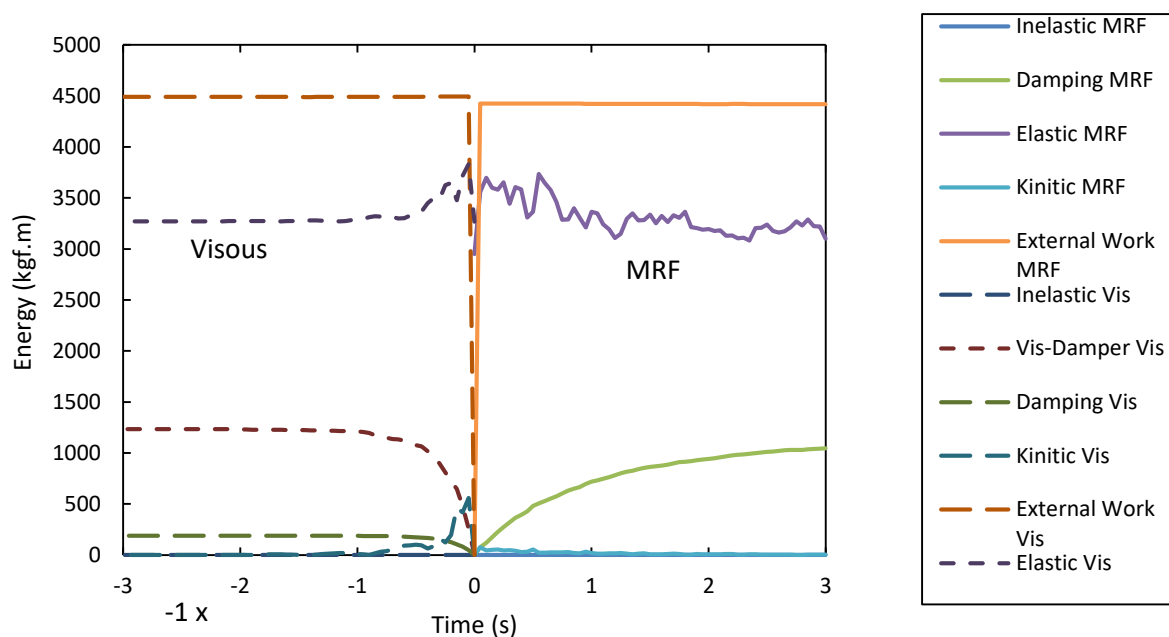
۴-۲- جریان انرژی در سناریوهای بارگذاری انفجاری

همان‌طور که قبلاً بیان شد انرژی ورودی در سازه به صورت‌های مختلفی در سازه مستهلک می‌شود. انرژی ورودی به سازه (کار خارجی) می‌تواند به انرژی جنبشی، انرژی کرنشی و انرژی‌های تلف‌شده توسط میرایی تبدیل شود. انرژی کرنشی به دو انرژی کرنشی الاستیک و کرنشی پلاستیک تقسیم می‌شود. در انرژی کرنشی الاستیک که ناشی از تغییر شکل‌های الاستیک است انرژی به صورت انرژی پتانسیل در اعضا ذخیره می‌شود و در صورت باربرداری و بازگشت اعضا به شرایط بدون بار، این انرژی آزاد خواهد شد. در انرژی کرنشی پلاستیک به دلیل وجود تغییر شکل‌های ماندگار در سازه و اعضا انرژی به صورت گرما تلف‌شده و غیرقابل بازگشت است. عوامل مختلف میرایی در سازه نیز به صورت مختلف باعث اتلاف انرژی در سازه‌ها می‌شوند. بنابراین انرژی ورودی در سازه‌های معمولی به صورت انرژی ناشی از میرایی ذاتی سازه، انرژی جنبشی، انرژی کرنشی الاستیک و انرژی کرنشی پلاستیک تلف می‌شود. در سناریوی انفجار، وقتی مواد منفجره، منفجر می‌شود حجم زیادی از انرژی در نزدیکی سازه آزاد می‌شود. این انرژی در اثر برخورد با سازه باعث ایجاد تغییر شکل و حرکت در سازه خواهد شد. این کار خارجی انجام شده در سازه باید به وسیله‌ی عوامل و نیروهای داخلی سیستم به تعادل برسد. برای ایجاد بالانس انرژی، سازه با توجه به کار خارجی انجام شده و مقابله با انرژی ورودی در سیستم، سازه با تغییر شکل‌های الاستیک، پلاستیک، میرایی و انرژی جنبشی سعی می‌کند تا تعادل را ایجاد نماید. در شکل ۱۱ منحنی انرژی ورودی و انرژی‌های جذب‌شده و تلف‌شده در سازه‌ها در سناریوی ۱۰۰- نشان داده شده است. در سازه‌ی قاب خمشی کار خارجی به صورت انرژی کرنشی الاستیک، کرنش پلاستیک، انرژی ناشی از میرایی و انرژی جنبشی مستهلک می‌شود و در سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز انرژی تلف‌شده توسط میراگر نیز اضافه می‌شود. انرژی الاستیک در مبدأ زمان از صفر شروع نمی‌شود زیرا وجود بار ثقلی و ایجاد دوران‌ها و تغییر شکل‌های الاستیک باعث می‌شود انرژی الاستیک به صورت انرژی پتانسیل در سازه ذخیره شود. به همین دلیل به علت وجود بار ثقلی این انرژی در پایان آنالیز نیز به صفر نمی‌رسد و همچنان به صورت ذخیره‌شده در سازه باقی می‌ماند. همچنین در سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز به علت تغییر شکل‌های کمتر، کار خارجی انجام شده مقداری کمتر از سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز است.



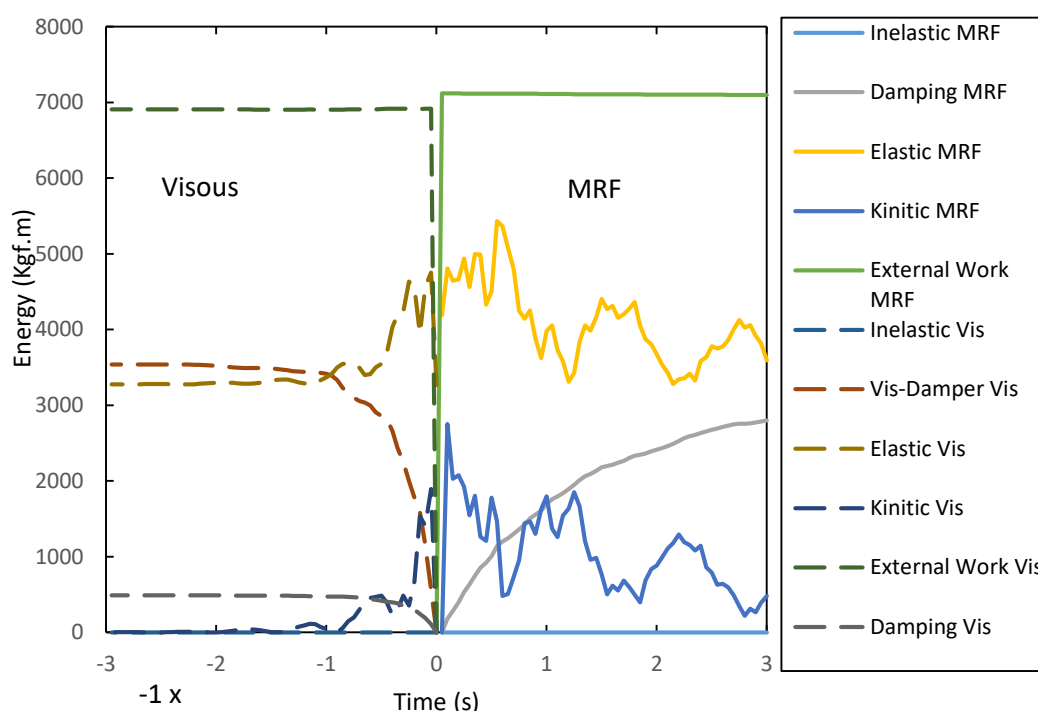
شکل ۱۱ منحنی‌های انرژی در سناریوی ۱۰۰-۱

بر اساس شکل ۱۱ در سازه‌ی قاب خمشی پس از اعمال بار انفجار بخش زیادی از کار خارجی توسط انرژی کرنشی پلاستیک میرا می‌شود و مابقی توسط میرایی داخلی و انرژی کرنشی الاستیک مستهلک می‌شود. این در حالی است که در سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز انرژی ورودی در مرحله‌ی اول توسط میراگر ویسکوز و انرژی کرنش پلاستیک مستهلک شده و در فاز بعدی انرژی باقی‌مانده به‌صورت انرژی جنبشی و انرژی کرنشی الاستیک مستهلک می‌شود. با مقایسه‌ی رفتار دو سازه مشخص می‌شود وجود میراگر ویسکوز باعث می‌شود انرژی کرنشی پلاستیک تلف‌شده کاهش یابد. در شکل ۱۲ منحنی‌های انرژی برای سناریوی ۱۰۰-۱۰ نشان داده شده است.



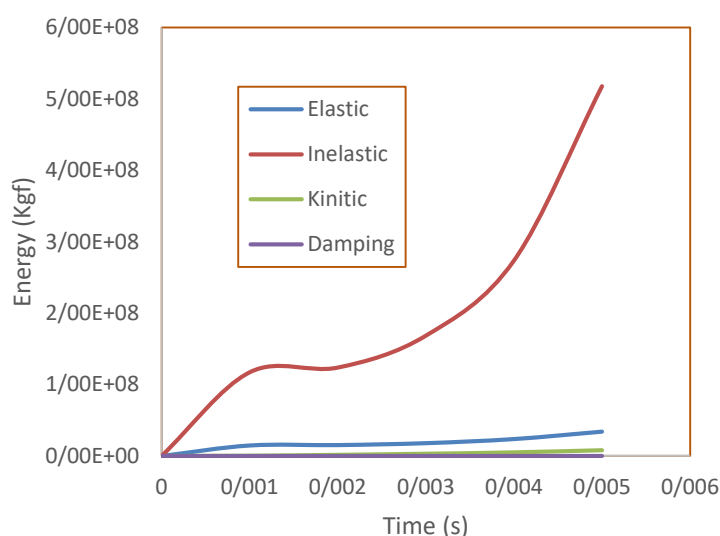
شکل ۱۲ منحنی‌های انرژی در سناریوی ۱۰۰-۱۰

بر اساس شکل ۱۲ و با مقایسه با سناریوی ۱-۱۰۰ مشخص می‌شود با زیاد شدن فاصله‌ی مقیاس شده از مقدار انرژی کرنشی پلاستیک کاسته شده و انرژی تلف‌شده ناشی از میراگر ویسکوز و انرژی الاستیک نقش بارزتری در ایجاد بالانس انرژی دارند. در شکل ۱۳ منحنی انرژی در سناریوی ۲۰-۵۰۰ نشان داده شده است. بر اساس این شکل در سناریوی ۲۰-۵۰۰ سهم انرژی کرنشی پلاستیک در استهلاک انرژی بسیار ناچیز است و سازه توانسته است با استفاده از میرایی و انرژی جنبشی و انرژی کرنشی الاستیک بالانس انرژی را ایجاد نماید. بر اساس این شکل در سازه‌ی بدون میراگر سهم انرژی جنبشی بیشتر از سازه‌ی دارای میراگر است. در واقع وجود میراگر ویسکوز تا حدی توانسته است ارتعاشات ناشی از بارگذاری انفجار را کنترل نماید بنابراین در سازه‌ی بدون میراگر انرژی جنبشی بارزتر از سازه‌ی دارای میراگر بوده و سازه ارتعاشات بیشتری را تجربه خواهد نمود. پس از اعمال بار انفجار در این سناریو ایجاد بالانس در سازه‌ی بدون میراگر وابسته به انرژی جنبشی و انرژی کرنش الاستیک است و در واقع مقادیر این دو در طی زمان با فازهای مخالف هم تغییر می‌نماید چنانکه در زمانی که انرژی الاستیک (پتانسیل) افزایش می‌یابد، انرژی جنبشی با کاهش روبه‌رو می‌شود. و وجود میرایی ذاتی باعث می‌شود به‌مرور زمان انرژی جنبشی کاهش یابد تا سازه به سکون برسد.



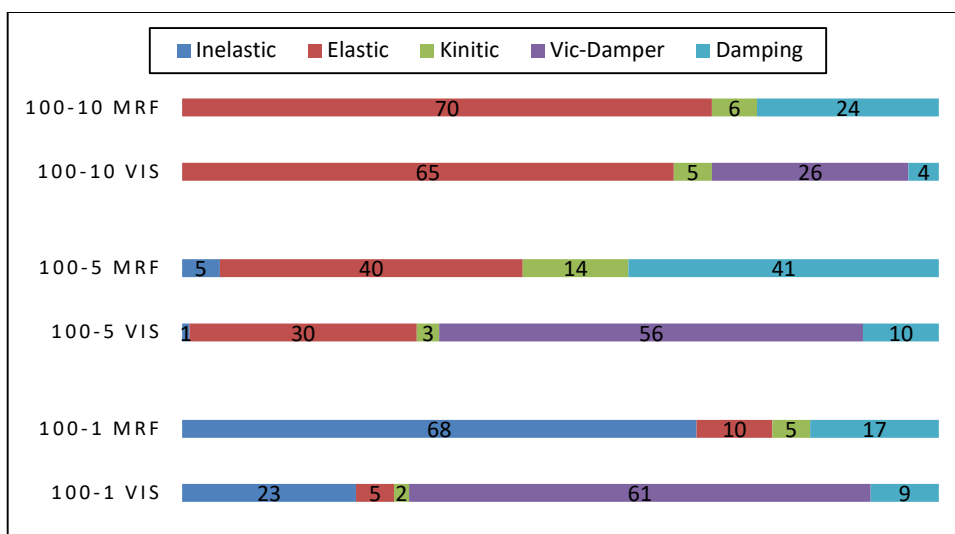
شکل ۱۳ منحنی‌های انرژی در سناریوی ۲۰-۵۰۰

در شکل ۱۴ منحنی تاریخچه زمانی انرژی برای سازه‌ی قاب خمشی در سناریوی ۱-۱۰۰۰ نشان داده شده است. در این سناریو انرژی ورودی در سازه به قدری زیاد بوده است که سازه ظرفیت ایجاد بالانس انرژی را نداشته است. در واقع مجموع ظرفیت سازه در انرژی کرنشی پلاستیک و الاستیک و میرایی ذاتی در سیستم آن‌قدری نبوده است که بالانس انرژی در سازه ایجاد شود و سازه در مراحل ابتدایی تحلیل دچار خرابی کلی می‌شود. در این سناریو بیشترین مقدار انرژی مربوط به انرژی کرنشی است و انرژی کرنش الاستیک سهم بسیار کمی در جذب و ایجاد بالانس انرژی دارد. در این سناریوی در لحظه‌ای که انرژی کرنشی پلاستیک به حداکثر مقدار خود می‌رسد و در مدت کوتاهی این مقدار به شدت افزایش می‌یابد خرابی کلی در سیستم حاصل می‌شود.

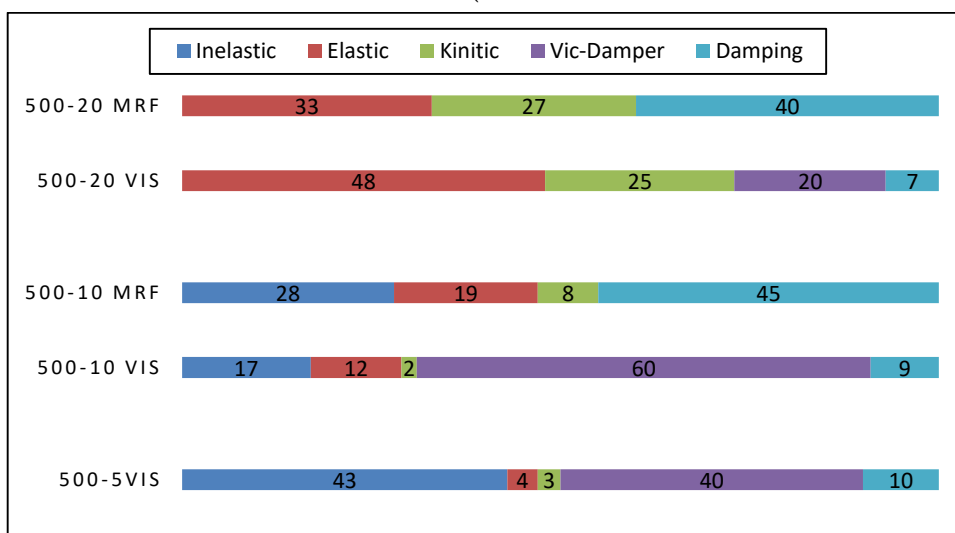


شکل ۱۴ منحنی انرژی درونی سازه با سیستم قاب خمشی بدون میراگر ویسکوز در سناریوی ۱-۱۰۰۰

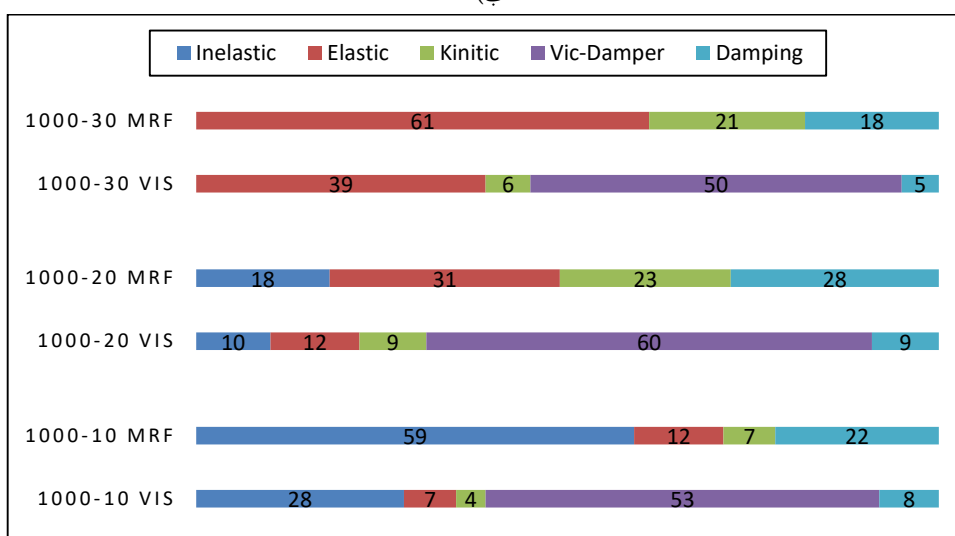
برای درک بهتر از ایجاد بالانس انرژی در سناریوهای انفجار عنوان شده بهتر است سهم انرژی‌های مختلف تلف شده و ذخیره شده در سازه‌ها تعیین شود. در شکل ۱۵ درصد انرژی‌های مختلف ذخیره شده و تلف شده در سازه‌های دارای میراگر ویسکوز و سازه‌ی قاب خمشی نشان داده شده است. بر اساس این نمودار با افزایش فاصله‌ی محل انفجار از سازه درصد انرژی کرنشی پلاستیک کاهش می‌یابد علاوه بر این مقدار درصد انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده در سازه‌ی قاب خمشی بیشتر از سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز است به طوری که در سناریوی ۱-۱۰۰ درصد انرژی کرنشی پلاستیک در سازه‌ی دارای میراگر برابر ۲۳ و در سازه‌ی قاب خمشی برابر ۶۸ درصد است. این افزایش ۳ برابر نشان می‌دهد در این سناریو آسیب‌های وارده، تغییر شکل‌های ماندگار و عملکرد سازه در سازه‌ی قاب خمشی بیشتر از سازه‌ی دارای میراگر است. تاثیر بکارگیری میراگر ویسکوز در سناریوی ۱-۱۰۰ آن قدر زیاد است که به تنهایی ۶۱٪ انرژی ورودی توسط میراگرها تلف می‌شود. افزایش فاصله‌ی محل انفجار از سازه سهم انرژی تلف شده توسط میراگرها در سازه‌های دارای میراگر ویسکوز کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش فاصله بالانس انرژی با انرژی کرنشی الاستیک ایجاد می‌شود به طوری که در سناریوی ۱۰۰-۱۰ حدود ۶۵٪ انرژی ورودی به انرژی کرنشی الاستیک تبدیل و این مقدار در سازه‌ی دارای قاب خمشی در حدود ۷۰٪ است. با مقایسه‌ی درصد انرژی‌های مختلف مشاهده می‌شود سهم انرژی تلف شده به وسیله‌ی میرایی ذاتی سازه در سازه‌ی قاب خمشی فولادی بیشتر از سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز است. در شکل‌های ۱۵ ب و ۱۵ ج درصد انرژی‌های مختلف تلف شده و جذب شده برای بار انفجار ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلو TNT نشان داده شده است. در این حالت‌ها نیز همانند بار ۱۰۰ کیلوگرم وجود میراگر ویسکوز باعث می‌شود انرژی کرنشی پلاستیک در سازه کاهش یافته و از میزان خسارت نیز کاسته شود. همچنین با افزایش فاصله سهم انرژی کرنشی پلاستیک در ایجاد بالانس انرژی کاهش یافته و سهم انرژی کرنشی الاستیک افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)



(ج)

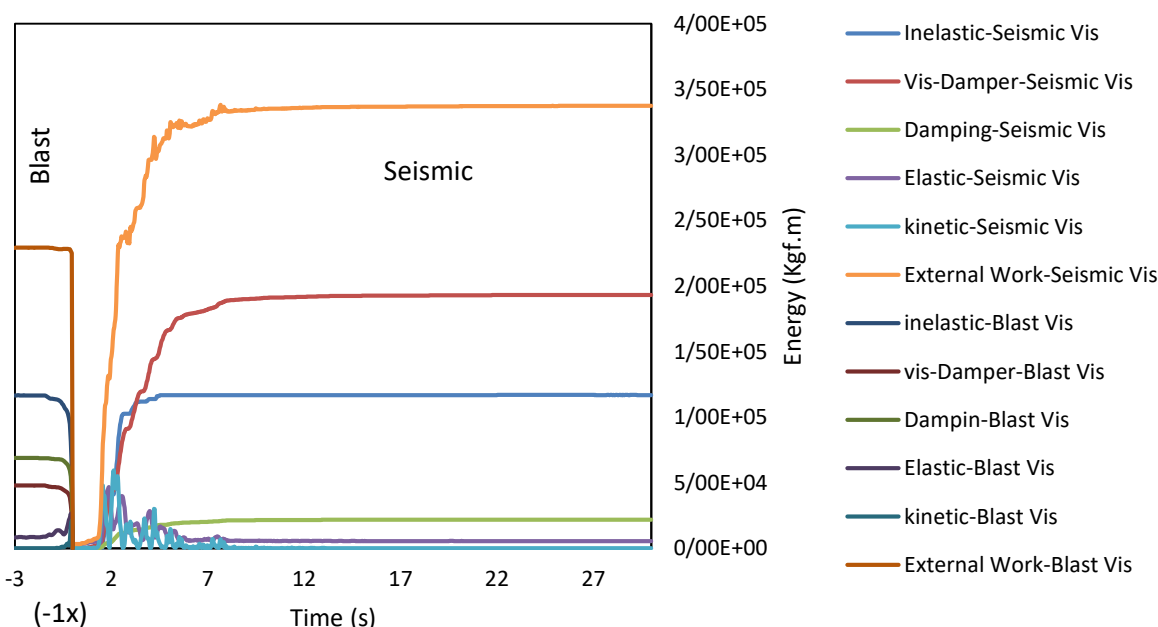
شکل ۱۵ درصد انرژی‌های جذب‌شده و تلف‌شده در سازه تحت انفجار الف (100 kg TNT ب) (۵۰۰ ج) ۱۰۰۰

۵- مقایسه‌ی جریان انرژی در سناریوی انفجار و زلزله

یکی از تفاوت‌های بار لرزه‌ای و بار انفجار مربوط به انرژی ورودی است. انرژی ورودی در بار لرزه‌ای به طور مستمر در طول زمان به سازه وارد می‌شود این درحالی است که انرژی ورودی در سناریوی انفجار در کسری از زمان در ابتدا به سازه وارد شده و سپس قطع می‌شود. برای مقایسه‌ی انرژی‌های جذب‌شده و تلف‌شده در دو سناریوی انفجار و زلزله، سازه در معرض یک شتاب‌نگاشت قرار گرفته است. مشخصات شتاب‌نگاشت مورد نظر در جدول ۵ نشان داده شده است. سرعت موج برشی در زمین این ایستگاه برابر با ۴۸۷ متر بر ثانیه ارائه شده است که بر اساس استاندارد ASCE 7 زمین کلاس C محسوب می‌شود که منطبق بر فرض اولیه‌ی طراحی سازه است. شتاب‌نگاشت پس از مقیاس به طیف طرح آیین‌نامه‌ی ASCE 7 به سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز اعمال شده و منحنی‌های تاریخچه زمانی انرژی‌های ورودی، جذب‌شده و تلف‌شده‌ی آن استخراج شده است. در شکل ۱۶ منحنی انرژی‌های تلف‌شده و جذب‌شده در سناریوی انفجار ۵-۵۰۰ و زلزله‌ی عنوان شده نشان داده شده است. از آنجائی که تحلیل انجام شده تنها تحت یک رکورد صورت پذیرفت و این رکورد مربوط به زلزله بم و ایستگاه بم بوده است که بیشترین PGA را در بین رکوردهای ثبت‌شده در این زلزله داشته است و طیف پاسخ آن بالاتر از طیف طرح قرار داشت لذا نویسندگان از اعمال ضریب مقیاس کاهنده به آن خودداری کرده و با قبول ضریب مقیاس یک همان رکورد را به سازه اعمال کردند. در این تحقیق هیچ تحلیل پوش اوری انجام نشده است.

جدول ۵ مشخصات بار لرزه‌ای

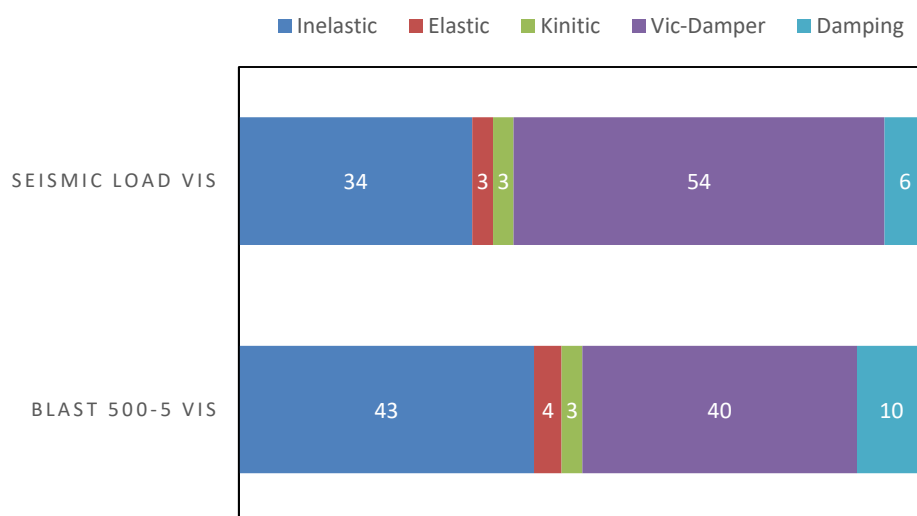
ضریب مقیاس	بیشینه شتاب	سال وقوع	بزرگا	مکانیسم خرابی	ایستگاه	نام
۰.۶۵	0.8g	۲۰۰۳	۶.۶	strike slip	بم	بم



شکل ۱۶ منحنی انرژی در دو سناریوی زلزله و انفجار ۵-۵۰۰

انرژی ورودی در بار لرزه‌ای به صورت گسترده در طول زمان به سازه وارد می‌شود در صورتی که در بار انفجار در کسری از زمان در ابتدا به سازه وارد می‌شود و پس از آن بالانس انرژی متناسب با این انرژی ورودی در سازه صورت می‌گیرد همچنین بار لرزه‌ای به صورت شتاب به مرکز جرم هر طبقه وارد می‌شود در حالی که بار انفجار به صورت نیرو به وجهی که انفجار اتفاق می‌افتد وارد می‌شود. رکورد زلزله بم در ایستگاه بم دارای اثرات جهت داری زلزله است که با اثر آن به سازه، انرژی در زمان بسیار کمی به سازه وارد خواهد شد که از این لحاظ رکورد مناسبی برای مقایسه می‌باشد. برای مقایسه بالانس انرژی در دو بارگذاری لرزه‌ای و انفجار از بار انفجار ۵-۵۰۰ استفاده شده

است. در این دو بارگذاری مقدار انرژی کرنشی تلف شده در المان‌ها تقریباً یکسان محاسبه شده است. اما تفاوت اصلی در میزان انرژی تلف شده در میراگر ویسکوز است. این میراگر در سناریوی بار لرزه‌ای تقریباً چهار برابر بیشتر از بار انفجار انرژی تلف کرده است. این مطلب نشان می‌دهد کاربرد میراگر ویسکوز و تاثیر آن بر عملکرد سازه در جهت کمتر کردن میزان آسیب در بارگذاری لرزه‌ای بیشتر از بارگذاری انفجار است. در شکل ۱۷ درصد مشارکت انرژی‌های داخلی سازه در بارگذاری لرزه‌ای و انفجار نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد درصد انرژی کرنشی پلاستیک در کل سازه در بارگذاری انفجار در سناریوی ۵-۵۰۰ بیشتر از بار لرزه‌ای ناشی از رکورد زلزله بم با بیشینه شتاب $g+0.65$ است. همچنین درصد مشارکت میراگر ویسکوز در بالانس انرژی در بارگذاری لرزه‌ای بیشتر از سناریوی بارگذاری ۵-۵۰۰ است. تمامی این موارد را باید با این فرض بررسی کرد که انرژی کل ورودی در بارگذاری لرزه‌ای بیشتر از بارگذاری انفجار است (در حدود ۳۰٪ بیشتر).



شکل ۱۷ درصد انرژی‌های جذب‌شده و تلف‌شده در سازه تحت بار انفجار و لرزه‌ای

خلاصه و نتیجه‌گیری

در این تحقیق سازه‌های ۱۰ طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی و قاب خمشی فولادی دارای میراگر ویسکوز تحت سناریوهای مختلف انفجار تحت تحلیل قرار گرفته‌اند. در ابتدا رفتار سازه‌ها با اولویت قرار دادن عملکرد آن‌ها بر اساس دوران مفاصل پلاستیک و میزان بیشینه تغییر مکان جانبی نسبی طبقات تحت تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان داده است با اینکه المان‌های تیر و ستون در سازه‌ی دارای میراگر ویسکوز برای ۷۵٪ بار جانبی طرح، طراحی شده است اما وجود میراگر ویسکوز باعث کاهش پاسخ سازه تحت سناریوهای مختلف انفجار شده است. با بررسی بالانس انرژی در سازه‌ها مشخص شده است وجود میراگر ویسکوز باعث شده است یک پارامتر جدید در بالانس انرژی سازه ایجاد شود، انرژی تلف‌شده به وسیله میراگر ویسکوز باعث کاهش انرژی کرنشی پلاستیک در سازه‌ها شده و به تبع آن خسارت وارده نیز کاهش یافته است. همچنین در مواردی وجود میراگر ویسکوز از ایجاد خسارت کلی در سازه جلوگیری کرده و باعث ایجاد بالانس بین انرژی‌های ورودی و انرژی داخلی سیستم شده است. بنابراین می‌توان به صورت خلاصه بیان نمود وجود میراگر ویسکوز باعث شده است پاسخ دینامیکی سازه به بار انفجار مانند نسبت تغییر مکان جانبی نسبی، انرژی کرنشی پلاستیک و تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در سطوح مختلف با کاهش روبرو شود. به عنوان مثال در سناریوی ۵-۱۰۰ وجود میراگر ویسکوز باعث شده است تا ۸۰٪ انرژی تلف شده توسط المان‌های تیر و ستون در سازه کاهش یابد. در سناریوی ۱-۱۰۰ این مقدار به ۶۶٪ رسیده است. در سناریوی ۵-۵۰۰ سازه دارای میراگر ویسکوز در حدود ۳۹٪ انرژی تلف شده کمتری را صرفاً در تیر و ستون تجربه کرده است که این مقدار در سناریوی ۱۰-۱۰۰۰ به ۵۲٪ رسیده است. بنابراین می‌توان بیان نمود استفاده از میراگر ویسکوز در سازه‌هایی که ممکن است در معرض انفجار قرار گیرند علاوه بر اینکه خود این المان‌ها در ائتلاف انرژی نقش دارند از میزان انرژی تلف شده توسط المان‌های تیر و ستون نیز می‌کاهند و میزان آسیب را کاهش می‌دهند که نشان می‌دهد سازه‌های دارای میراگر ویسکوز دارای ایمنی بیشتری نسبت به سازه‌های قاب خمشی در سناریوهای انفجاری هستند.

منابع

- [۱] Tavakoli, H., Afrapoli, M.M., (2018), Robustness analysis of steel structures with various lateral load resisting systems under the seismic progressive collapse. *Engineering Failure Analysis*, 83, 88-101.
- [۲] Xiao, W., Andrae, M., Gebbeken, N., (2020), Air Blast TNT Equivalence Concept for Blast-Resistant Design. *International Journal of Mechanical Sciences*, DOI, 105871.
- [۳] Baker, J.F., Williams, E.L., 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*, Thomas Telford Ltd, pp. 3: 80-112.
- [۴] Brode, H.L., (1959), Blast wave from a spherical charge. *The Physics of Fluids*, 2, 217-229.
- [۵] Lamb, H., Hydrodynamics, Cambridge university press 1932.
- [۶] Taylor, G., (1939), The propagation and decay of blast waves. *The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor*, 3, 221-235.
- [۷] Yang, F., Feng, W., Liu, F., Jing, L., Yuan, B., Chen, D., (2019), Experimental and numerical study of rubber concrete slabs with steel reinforcement under close-in blast loading. *Construction and Building Materials*, 198, 423-436.
- [۸] Hadianfard, M.A., Malekpour, S., Momeni, M., (2018), Reliability analysis of H-section steel columns under blast loading. *Structural Safety*, 75, 45-5.
- [۹] Moradi, M., Abdolmohammadi, M., (2020), Seismic fragility evaluation of a diagrid structure based on energy method. *Journal of Constructional Steel Research*, 174, 106311.
- [۱۰] Guruprasad, S., Mukherjee, A., (2000), Layered sacrificial claddings under blast loading Part I—analytical studies. *International Journal of Impact Engineering*, 24, 957-973.
- [۱۱] Loizeaux, M., Osborn, A.E., (2006), Progressive Collapse—An Implosion Contractor's Stock in Trade. *Journal of performance of constructed facilities*, 20. ۴۰۲-۳۹۱ ,
- [۱۲] Bažant, Z.P., Verdure, M., (2007), Mechanics of progressive collapse: Learning from World Trade Center and building demolitions. *Journal of Engineering Mechanics*, 133, 308-319.
- [۱۳] Miyamoto, H.K., Taylor, D., Structural control of dynamic blast loading, *Advanced Technology in Structural Engineering 2000*, pp. 1-8.
- [۱۴] El-Arab, I.M.E., (2016), Strengthening of existing security buildings against vehicle bomb using fluid viscous dampers, in Egypt. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 7, 37-47.
- [۱۵] Mottram, T. (2011). *Structural Engineering Failures::: Lessons for Design*, Thomas Telford Ltd.
- [۱۶] Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J., (2007), Blast loading and blast effects on structures—an overview. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 7, 76-91.
- [۱۷] Oskouei, A.V., Kiakoouri, F. (2012). Steel Plates Subjected to Uniform Blast Loading, *Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ*, pp. 35-40.
- [۱۸] Council, A.T., Quantification of building seismic performance factors, US Department of Homeland Security, FEMA2009.
- [۱۹] Szyniszewski, S., Krauthammer, T., (2012), Energy flow in progressive collapse of steel framed buildings. *Engineering Structures*, 42, 142-153.
- [۲۰] Akcelyan, S., Lignos, D.G., Hikino, T., (2018), (Adaptive numerical method algorithms for nonlinear viscous and bilinear oil damper models subjected to dynamic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, 488-502.
- [۲۱] Narkhede, D.I., Sinha, R., (2014), Behavior of nonlinear fluid viscous dampers for control of shock vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, 333, 80-98.
- [۲۲] Yao, Y., Chang, K., Chen, T., Yu, C., (2014), The dynamic performance of a shear thickening fluid viscous damper, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 37 (8), 983-994.
- [۲۳] Tavakoli, H.R., Kiakoouri, F., (2013), "Influence of Sudden Column Loss on Dynamic Response of Steel Moment Frames under Blast Loading", *International Journal of Engineering*, 26, 453-461.