

## Evaluation of the performance of a steel structure with Base Isolation under blast loads

Majid Moradi, HamidReza Tavakoli<sup>2\*</sup>, Miad Kiandoust<sup>3</sup>

1- PhD Student, Department of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2 -Associate Professor, Department of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

3-Graduated, Structure engineering, University of ghom

### ABSTRACT

The occurrence of terrorist attacks and bombings in recent years has shown the importance of constructive safety against blast loading more than ever before. Blast is one of the rare events that can cause many damages to the buildings during their lifespan. Investigating the behavior of structures under blast load can help to make managerial decisions for the safety of structures. In this research, the behavior of steel structures with seismic isolation of LRB type in different explosion scenarios was investigated using the concept of energy balance. Two types of 10-story steel structures with isolated and fixed-bases have been subjected to 12 types of blast loadings after designing. Initially, the performance of the structures under these loadings and the rotation of the plastic joints and drift of structures were evaluated and then, using the time history curves the depreciated and absorbed energies of the structure, balance of energy in each scenario are studied and the role of isolators in the creation of energy balance is investigated. The results show that the existence of depreciated plastic strain energy in seismic isolators reduce depreciated energy in other members and the amount of their damage will be decreased.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 13 May 2019

**Revise Date:** 28 May 2020

**Accept Date:** 02 September 2020

### Keywords:

Base Isolation

Blast Loading

Energy Balance

Steel Structure

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.185505.1860>

\*Corresponding author: HamidReza Tavakoli.

Email address: Tavakoli@nit.ac.ir

## ارزیابی عملکرد سازه فولادی ده طبقه دارای جداساز لرزه‌ای تحت بارهای انفجار

مجید مرادی<sup>۱</sup>، میعاد کیان دوست<sup>۲</sup>، حمیدرضا توکلی<sup>۳\*</sup>

۱- دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- فارغ‌التحصیل مهندسی سازه، دانشگاه قم، قم، ایران

۳- دانشیار دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

### چکیده

وقوع حملات تروریستی و بمب‌گذاری در سال‌های اخیر، اهمیت ایمنی سازه در برابر بار انفجار را بیشتر از گذشته نشان می‌دهد. انفجار از جمله حوادث نادری است که می‌تواند خسارات زیادی را در طول عمر مفید ساختمان‌ها در پی داشته باشد. بررسی رفتار سازه‌ها تحت بار انفجار می‌تواند به تصمیمات مدیریتی در جهت امنیت سازه‌ها کمک شایانی نماید. در این تحقیق رفتار سازه‌های فولادی با جداسازی لرزه‌ای از نوع *LRB* در سناریوهای مختلف انفجار با استفاده از مفهوم بالانس انرژی بررسی شده است. دو تیپ سازه‌ی فولادی ۱۰ طبقه‌ی جداسازی شده و سازه با پای ثابت پس از طراحی در معرض ۱۲ نوع بارگذاری انفجار قرار گرفته است. در ابتدا عملکرد سازه‌ها تحت این بارگذاری‌ها بررسی و دوران مفاصل پلاستیک و دریافت سازه‌ها ارزیابی شده و در ادامه با استفاده از منحنی‌های تاریخچه زمانی انرژی‌های تلف شده و جذب‌شده‌ی موجود در سازه، بالانس انرژی در هریک از سناریوها بررسی و نقش جداسازها در ایجاد بالانس انرژی بررسی شده است. نتایج نشان داده است انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده در جداسازهای لرزه‌ای باعث شده است انرژی تلف شده توسط سایر اعضا کاهش یابد و میزان خسارت در آن‌ها نیز کم شود.

کلمات کلیدی: جداساز لرزه‌ای، بارگذاری انفجار، بالانس انرژی، سازه فولادی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.185505.1860">https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.185505.1860</a>					
	10.22065/jsce.2020.185505.1860	۱۴۰۰/۰۷/۳۰	۱۳۹۹/۰۶/۱۲	۱۳۹۹/۰۶/۱۲	۱۳۹۹/۰۳/۰۸	۱۳۹۸/۰۲/۲۳
			حمیدرضا توکلی		*نویسنده مسئول:	
			Tavakoli@nit.ac.ir		پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

بارهای مختلفی در طول عمر سازه ممکن است ایمنی آن را به خطر بی اندازد [۱]. زلزله، انفجار، باد، و حوادثی مانند برخورد عوامل مختلف می‌تواند بار خارجی را به سازه وارد نماید. یک سیستم سازه‌ای باید توانایی مقابله با بارهای پیش‌بینی شده که ممکن است در طول عمر مفید آن به سازه وارد شود را داشته باشد [۲]. سیستم‌های مختلف باربر جانبی مهم‌ترین بخش سازه برای مقابله با عوامل عنوان شده است [۳]. با شدت گرفتن حملات تروریستی در جهان، لزوم بررسی رفتار سازه‌ها تحت بار انفجار بیش‌ازپیش اهمیت پیدا کرده است [۴]. 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 ضرایب قید شده به دست آورد [۵]. امروزه برای مقابله با بارهای جانبی سیستم‌های نوینی به وجود آمده است. یکی از متداول ترین سیستم نوین در این زمینه، جداسازهای لرزه‌ای هستند [۶]. جداسازی سازه‌های ساختمانی یک روش کنترل غیرفعال جهت محافظت ساختمان‌ها تحت تاثیر حرکت‌های جانبی خصوصاً زمین لرزه است. جداساز لرزه‌ای در فونداسیون سازه ساختمانی نصب می‌شود تا انرژی ورودی را جذب کند و از صدمه دیدن سازه در اثر بار خارجی که به ساختمان منتقل می‌شود جلوگیری کند [۷]. یکی از اهداف جداساز - لرزه‌ای فراهم کردن یک وسیله اتلاف انرژی به صورت کاهش شتاب انتقالی به روسازه است. در میان انواع گوناگون سیستم جداساز لرزه‌ای تکیه‌گاه لاستیکی سربی<sup>۱</sup> (LRB) در نیوزلند، ژاپن و ایالات متحده آمریکا مورد استفاده زیادی قرار گرفته است. این تکیه‌گاه از لایه‌های لاستیک و ورق‌های فولادی که از یک یا تعداد بیشتری هسته سربی که در سوراخی نصب می‌شود تشکیل شده است. [۸]. نصب سیستم های جداساز لرزه‌ای منجر به افزایش زمان تناوب اصلی سازه و کاهش نیروهای وارد بر آن می‌گردد. ساختمان‌هایی که به وسیله این نشیمن‌ها تقویت شده‌اند، در زلزله‌های ۱۹۹۴ نورث‌ریج<sup>۲</sup> و ۱۹۹۵ کوبه<sup>۳</sup> عملکرد خوبی داشته‌اند [۹]. تحقیقات فراوانی در رفتار سازه‌های جداسازی شده تحت بارهای خارجی که عموماً ناشی از زلزله است انجام گرفته است. پروویداکیس<sup>۴</sup> رفتار سازه‌های کامپوزیت بتنی- فولادی با استفاده از تحلیل پوش آور را بررسی کرد و نشان داد که استفاده از سیستم جداساز لرزه‌ای LRB باعث کاهش برش پایه ساختمان و متأسفانه افزایش دررفت طبقه اول که تحت تاثیر زمین لرزه نزدیک گسل قرار دارد می‌شود [۱۰]. جنگید<sup>۵</sup> پاسخ‌های دینامیکی ساختمان‌های چند طبقه جداسازی شده با جداساز LRB را تحت زلزله حوزه نزدیک گسل بررسی کرد [۸]. ون‌آی<sup>۶</sup> و همکارانش پاسخ‌های دینامیکی پل‌های جداسازی شده با جداساز LRB و جداسازی نشده با پایه بتنی ۵ دهانه را مقایسه کردند [۱۱].

طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم در برابر انفجار مقرون به صرفه نیست. ولی با تمهیداتی می‌توان از شدت و دامنه خسارات وارده کاست 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 پیکر بندی پایدار دست یابد تنها در صورتی که انرژی ورودی کاملاً توسط سازه اتلاف شود. در غیر اینصورت، انرژی ورودی باقی مانده 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 [۱۲] اظهار داشتند که به منظور جذب انرژی موثرترین هدف این است که بیشترین نیرو کاهش یابد و مدت زمان 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 [۱۳] جریان انرژی در حرکات ارتعاشی بدون بکارگیری مفاهیم تنش و کرنش بطور تحلیلی شرح

<sup>1</sup> Lead Rubber Bearing

<sup>2</sup> Northridge

<sup>3</sup> Kobe

<sup>4</sup> Providakis

<sup>5</sup> Jangid

<sup>6</sup> Wen-I Liao

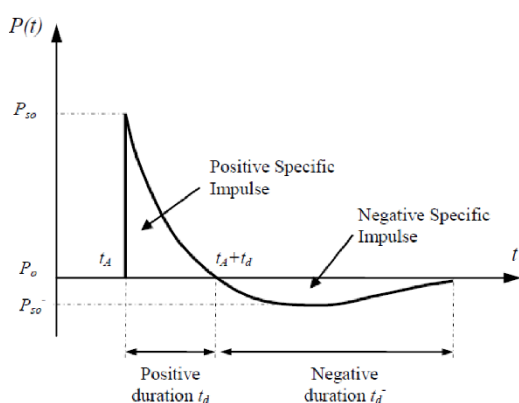
می‌دهد. کانگدا<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۹) اثر فاز مثبت انفجار را در سازه‌های دارای جداساز لرزه‌ای بررسی کردند [۱۴]. محبی<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۲) عملکرد سیستم‌های جداسازی را تحت اثر انفجار بررسی نمودند [۱۵]. ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) تاثیر جداساز لرزه‌ای را بر عملکرد سازه‌های فولادی در معرض بار انفجار بررسی کردند [۱۶].

با توجه به افزایش حملات تروریستی و احتمال حوادثی نظیر انفجار که جزو حوادثی با احتمال وقوع کم و تلفات و خسارات زیاد محسوب می‌شود، بررسی رفتار سازه‌ها تحت بارگذاری انفجار بخصوص در سازه‌های دارای جاذب‌های انرژی می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در جهت کاهش خسارات کمک شایانی نماید. از این رو در این تحقیق سعی شده است با تکیه بر بالانس انرژی در سازه ناشی از بارگذاری انفجاری، رفتار سازه‌های دارای جداساز و سازه‌های با پای ثابت در بارگذاری‌های مختلف انفجار بررسی و مقایسه گردد تا تاثیر وجود جداساز لرزه‌ای مشخص شود. در ادامه مدل‌های سازه‌ای و بارگذاری‌های در نظر گرفته شده معرفی شده است.

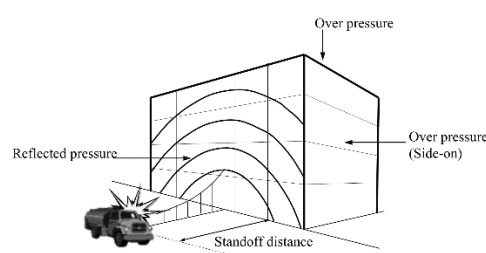
## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱ بارگذاری انفجار

انفجار در واقع آزاد سازی سریع و با مقیاس بالای انرژی است. انفجارها با توجه به ماهیتشان 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 [۱۷]. شکل ۱ کامیون معمول بمب‌گذاری شده با تاثیر فشار انفجار بر ساختمان را نشان می‌دهد. پارامترهای اصلی موثر را می‌توان با وزن خراج 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 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 [۱۷].



شکل ۲ تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار [۱۴]



شکل ۱ تاثیرات بار انفجاری بر روی ساختمان [۱۷]

<sup>7</sup> Kangda

<sup>8</sup> Mohebbi

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 بی دقتی شویم می‌توان تاریخچه زمان انفجار در فاز مثبت را به صورت یک بار مثلثی ایده آل سازی کرد [۱۷]. رابطه‌ی ۲ معرف این بارگذاری ایده آل 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 [۱۸].

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

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

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. 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 [۱۳]. رابطه‌ی میلز که در سال ۸۷ میلادی ارائه شده است، حداکثر اضافه فشار ناشی از انفجار را بر حسب کیلو پاسکال بدست می‌دهد [۱۳]. 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 بدست می‌دهد [۱۸].

$$p_{so} = \frac{0.975}{z} + \frac{1.455}{z^2} + \frac{5.85}{z^3} - 0.019 \text{ bar}, 0.1 \text{ bar} < p_{so} < 10 \text{ bar}, p_{so} = \frac{6.7}{z^3} + 1 \text{ bar}, p_{so} > 10 \text{ bar} \quad (4)$$

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

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

## ۲-۲- بالانس 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 محاسبه می‌شود:

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

مجموع کرنش را می توان به الاستیک (قابل برگشت) و پلاستیک (غیر قابل 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:

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

همچنین انرژی جنبشی با استفاده از رابطه زیر به دست می آید:

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

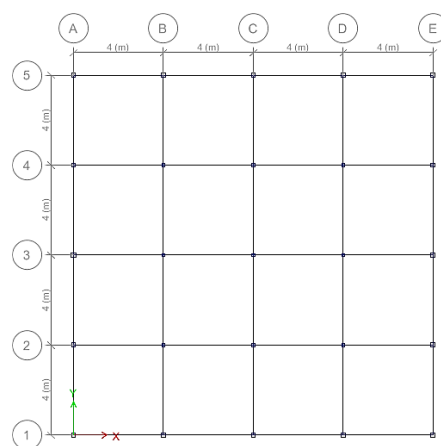
در صورتی که انرژی ورودی و انرژی داخلی در سازه به تعادل برسند سازه پایدار می ماند و در غیر این صورت سازه دچار ناپایداری و خرابی کلی می شود. یکی از قابلیت های نرم افزار پرفورم ارائه کارهای داخلی انجام شده در سازه به تفکیک انرژی کرنشی الاستیک، پلاستیک، جنبشی و میرایی ذاتی سیستم است. این انرژی ها هم می تواند به صورت تاریخچه زمانی و هم به صورت انرژی های کلی جذب شده و تلف شده از نرم افزار خروجی گرفته شود. شکل ده یک نمونه از منحنی های تاریخچه زمانی ای است که پس از تحقیق از نرم افزار خروجی گرفته شده است.

### ۳- مدل های سازه ای

برای بررسی اهداف مورد نظر در این تحقیق از سازه ی ۱۰ طبقه استفاده شده است. سازه به صورت ۴ دهانه ی ۴ متری با پلان متقارن (شکل ۳) با ارتفاع طبقات ۳ متر در نظر گرفته شده است. بار مرده ی کف برابر  $600 \text{ kg/m}^2$  و بار زنده برابر  $200 \text{ kg/m}^2$  در نظر گرفته شده است. ابتدا سازه ای با سیستم قاب خمشی ویژه مقاوم در برابر بار جانبی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران برای منطقه با لرزه خیزی زیاد طراحی گردید. سازه ی قاب خمشی ویژه پس از طراحی اولیه مجهز به جداساز لرزه ای از نوع LRB شده و سپس مورد تحلیل قرار گرفته است. برای طراحی سازه ها تنش تسلیم فولاد برابر  $2400 \text{ kgf/cm}^2$  و مدول الاستیسیته برابر  $2e+6 \text{ Kg/cm}^2$  در نظر گرفته شده است. برای مقاطع تیر از مقطع استاندارد W و برای ستون ها از مقطع استاندارد باکس استفاده شده است. مشخصات مقاطع مورد استفاده در سازه های مورد بررسی در جداول ۱ نشان داده شده است. سازه ها در ابتدا به صورت خطی در نرم افزار Etabs طراحی شده اند، پس از طراحی اولیه به صورت غیر خطی در نرم افزار perform-3D مدلسازی شده است. برای مدلسازی غیر خطی از مفصل پلاستیک متمرکز بر اساس آیین نامه ی Fema356 استفاده شده است.

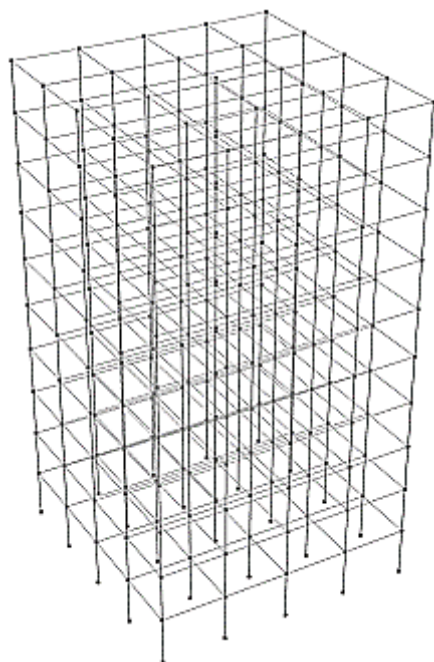
جدول ۱ مشخصات مقاطع سازه‌ای در دو سازه‌ی جداسازی شده و سازه با پای ثابت

ستون	تیر	بقه
Box360*360*	W12*40	
25		
box360*360*	W12*40	
25		
box340*340*	W12*40	
20		
box340*340*	W12*40	
20		
box260*260*	W12*35	
17		
box260*260*	W12*35	
17		
box240*240*	W12*35	
16		
box240*240*	W12*35	
16		
box200*200*	W12*22	
10		
box180*180*	W12*22	
10		0

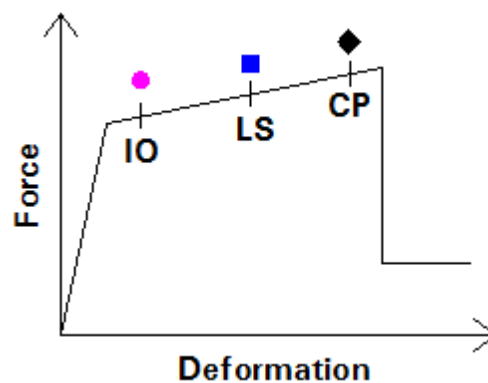


شکل ۳ پلان سازه

برای مدلسازی مفصل پلاستیک بر اساس استاندارد Fema356 [۲۰] ابتدا پارامترهای مدلسازی بر اساس مشخصات المان‌های مورد نظر استخراج و سپس مفاصل پلاستیک برای سه سطح عملکرد IO، LS و CP به صورت متمرکز تعریف شده است. مدل رفتاری مفصل پلاستیک متمرکز مورد نظر در این تحقیق در شکل ۴ و مدل سازه‌ای غیر خطی مدلسازی شده در نرم افزار Perform-3D در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ مدل سازه با سیستم قاب خمشی

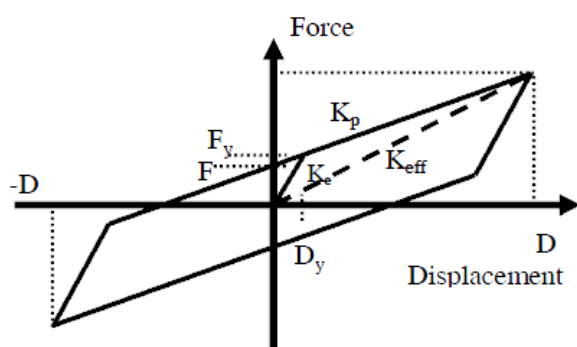


شکل ۴ مدل رفتاری مفصل پلاستیک متمرکز

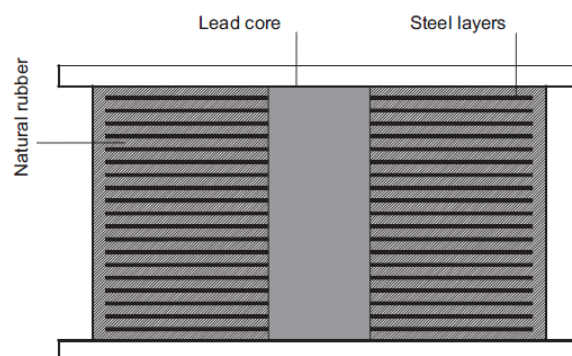
آئین‌نامه‌های مختلفی برای طراحی سازه‌ها در برابر بار انفجار وجود دارد. معیارهای پذیرش ارائه شده در این آئین‌نامه‌ها متفاوت است. برخی از این آئین‌نامه‌ها تنها معیار پذیرش را برای بار ثقیلی و شرایط دارای انحناء در تیر ارائه می‌دهند. این در حالی است که آئین‌نامه FEMA 356 معیار پذیرش را برای بار جانبی و بار ثقیلی ارائه می‌دهد. همچنین معیار پذیرش در این آئین‌نامه برای سه سطح IO، LS و CP ارائه شده است. همچنین استفاده از الزامات آئین‌نامه FEMA 356 برای بار انفجار در جهت اطمینان بیشتر است. بنابراین از این آئین‌نامه برای مدلسازی غیرخطی و معیارهای پذیرش استفاده شده است. سازه‌های دارای جداساز لرزه ای امروزه به طور وسیعی در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند و عموماً برای بارهای لرزه ای طراحی می‌شوند. از آنجائی که این سازه‌ها برای بار انفجار طراحی نمی‌شوند در این تحقیق سعی شده است تا عملکرد سازه‌های دارای جداساز لرزه ای که بر اساس بار لرزه ای طراحی شده اند تحت بار انفجار بررسی شود. معیار این تحقیق نیز ارزیابی عملکرد سازه‌های فولادی با ارتفاع متوسط بوده است بنابراین یک سازه ده طبقه فولادی برای مدلسازی و تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۳-۱-۱ مدلسازی جداساز

در این تحقیق عملکرد سازه‌های دارای انرژی در بارگذاری‌های انفجاری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همان‌طور که بیان شد برای مدلسازی سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای فرض شده است سازه‌ها دارای جداسازهای LRB است. وجود لاستیک در این نوع جداساز باعث می‌شود سازه دارای انعطاف‌پذیری بیشتری در جهت افقی باشد. همچنین وجود ورق‌های فولادی باعث می‌شود سختی قائم لازم در جداساز به عنوان تکیه‌گاه در سازه فراهم شود. شکل ۶ منحنی رفتاری جداساز را بر اساس مدل پرویداسکی [۱۰] نشان می‌دهد. در این تحقیق از مدل دو خطی وین برای مدل کردن جداساز لرزه‌ای استفاده شده است.



شکل ۷ منحنی رفتاری جداساز



شکل ۶ شکل شماتیک از جداساز لرزه‌ای LRB

جداسازها برای کل وزن سازه که از تحلیل خطی سازه قابل حصول است طراحی شده اند. شکل ۷ و جدول ۲ پارامترهای طراحی جداساز لرزه‌ای نشان داده شده‌اند.  $K_1$ ,  $K_{eff}$  و  $K_2$  به ترتیب سختی الاستیک، سختی موثر و سختی جداساز پس از تسلیم است.  $F_y$  نیروی تسلیم،  $DD$  جابجایی طرح،  $TD$  پیوند جداساز،  $QD$  مقاومت مشخصه و  $\alpha$  نسبت سختی ثانویه به سختی اولیه است. همچنین  $N$  ضخامت لایه‌های لاستیکی،  $NS$  تعداد صفحات پلاستیکی،  $dp$  قطر سرب و  $d$  قطر جداساز است. در این تحقیق از ۲۵ جداساز لرزه‌ای LRB در پای ساختمان استفاده شده است. در جدول ۲ مشخصات مکانیکی و ابعاد هر یک از جداسازهای طراحی شده نشان داده شده است.



جدول ۲ مشخصات جداسازهای طراحی شده

پارامتر	مقدار	واحد
$K_{eff}$	340.9681	KN/m
$K_1$	4147.381	KN/m
$K_2$	233.9041	KN/m
$Q_D$	32.11919	KN
$F_y$	63.2788	KN
$T_D$	3	Sec
$D_D$	0.3	m
Alfa	0.056398	
h	33	cm
N	6	
$t_r$	1.5	cm
$N_s$	1.5	
$t_s$	0.5	cm
$t_{tp}$	2.5	cm
$d_p$	14	cm
d	65	cm

## ۲-۳ بارگذاری انفجار

در این تحقیق ۱۲ سناریوی انفجار برای سازه‌های 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 محاسبه‌ی سطح وارده به سازه به نیرو تبدیل و در نهایت به صورت نقطه‌ای به سازه اعمال شده است. اضافه فشار ناشی از هر انفجار با استفاده از رابطه‌ی ۵ و زمان دوام آن نیز بر اساس رابطه‌ی ۶ برای هر نقطه از سازه که در معرض بارگذاری انفجار قرار دارد، محاسبه و به آن اعمال شده است. در جدول ۳ مشخصات هر سناریوی انفجار و فاصله‌ی مقیاس شده برای نزدیک‌ترین نقطه به سازه و همچنین زمان دوام اضافه فشار ناشی از انفجار برای این نقطه نشان داده شده است:

جدول ۳ مشخصات بارگذاری انفجار دریکی از وجه‌های ساختمان

نام	فاصله (متر)	جرم TNT (کیلوگرم)	فاصله مقیاس شده نزدیک‌ترین نقطه سازه به انفجار (m/Kg <sup>(1/3)</sup> )	زمان دوام نزدیک‌ترین 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
500-10	10	500	1.315396	6.070643
500-20	20	500	2.548033	11.57738
1000-1	1	1000	0.316228	2.472685
1000-5	5	1000	0.583095	1.003101
1000-10	10	1000	1.044031	5.601604
1000-20	20	1000	2.022375	11.82207
1000-30	30	1000	3.014963	16.86604

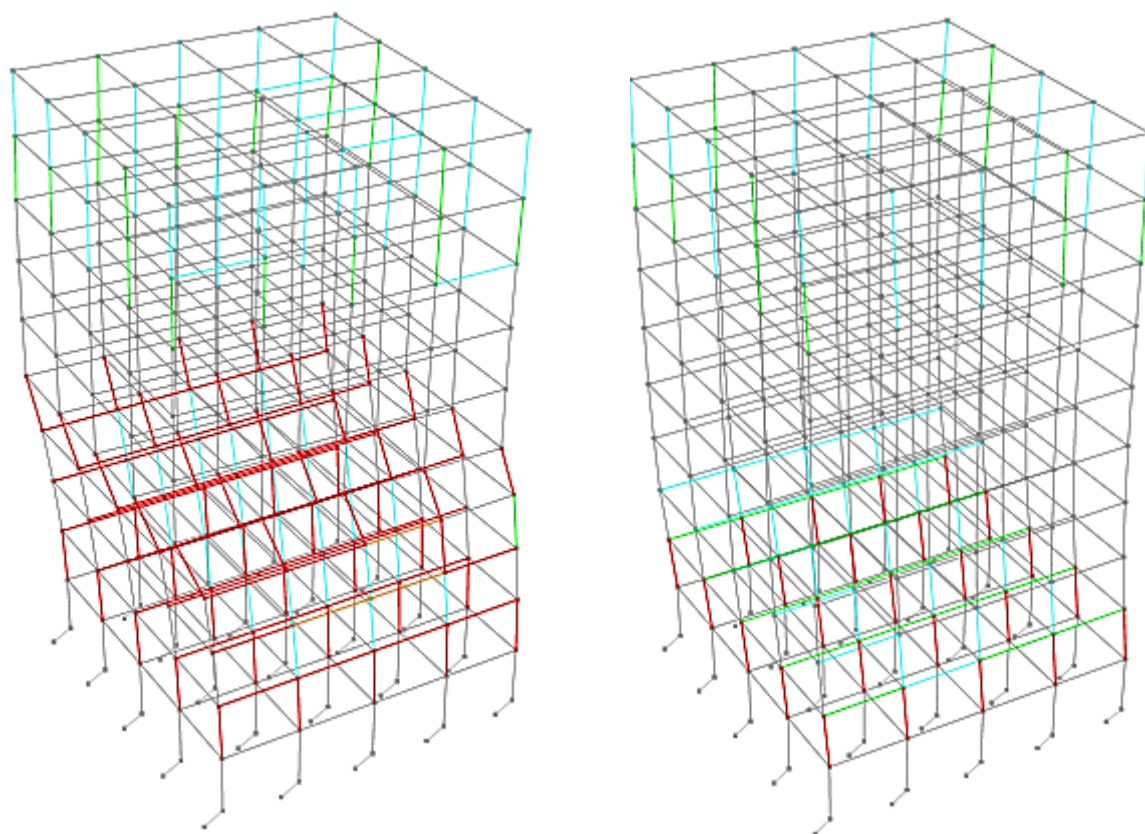
سطح اثر بار انفجار بر اساس فرضیه وجود دیوارهای پیرامونی در لحظه اولیه اعمال بار انفجار ایجاد شده است. به عبارت ساده تر فرض شده است در لحظه انفجار دیوارهای پیرامونی وجود داشته و بار انفجار بر آنها وارد شده است و آنها در این لحظه توانسته اند فشار ناشی از موج انفجار را به صورت نیرو به نقطه اتصال تیر و ستون‌ها انتقال دهند. سطح اثر نیروها بر اساس چشمه باربری قائم هریک از این گره‌ها از دیوارهای موجود که در معرض فشار ناشی از انفجار بودند محاسبه شده و پس از تبدیل شدن به نیرو به گره‌ها اعمال شده است. بنابراین می‌توان گفت دیوارهای خارجی و داخلی به طور مستقیم در مدلسازی شرکت داده نشده اند اما اثر دیوارهای خارجی در وجه انفجار در لحظه اولیه اثر فشار انفجار بر سازه در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت‌های زیادی در بارهای انفجار وجود دارد. میزان وزن مواد منفجره و فاصله انفجار می‌تواند هر مقداری باشد. بنابراین فاصله مقیاس شده، فشار ماکزیمم وارد بر سازه و زمان اثر این بار نیز می‌تواند مختلف باشد. با وجود اینکه چهار سطح برای بار انفجار در نظر گرفته شده است اما در منابع معمولاً بدون توجه به این سطوح با سناریو سازی بارهای انفجار در نظر گرفته می‌شوند. در این تحقیق نیز ۱۲ حالت بارگذاری انفجار انتخاب شده است تا میزان انفجار ضعیف تا قوی بجای چهار سطح در ۱۲ سناریو تعریف شود. در این ۱۲ حالت بارگذاری از سه وزن در فواصل مختلف استفاده شده است. بار متمرکز که به هریک از گره‌ها اعمال شده است از طریق تبدیل موج انفجار به نیروی متمرکز در محدوده چشمه باربری هر یک از گره‌ها محاسبه شده است. این بار متمرکز معادل نیروی ناشی از فشار انفجاری است که به وجه سازه در معرض موج انفجار وارد شده است و این فشار به صورت گسترده به دیوارها و المان‌های سازه ای وارد شده است. از حاصل ضرب این فشار در چشمه اتصال نیروی متمرکز وارد بر هر گره محاسبه شده است. این نیرو برای هر گره مقدار متفاوتی دارد چراکه فاصله هر گره از محل انفجار نسبت به موج انفجار با گره مجاور متفاوت است.

برای محاسبه بار گره ای و رسیدن به تابع زمان-نیرو برای هر گره با توجه به فاصله و وزن ماده منفجره ابتدا فشار ناشی از موج انفجار برای هر مقدار فاصله و وزن ماده به همراه زمان اثر موج بر سازه محاسبه شده است. در ادامه با توجه به سطح بارگیری هر گره فشار وارده بر سازه به نیروی متمرکز تبدیل شده است. سپس با توجه به فاصله ی هر گره از محل انفجار و زاویه ی آن این نیروی وارده به دو نیروی قائم و افقی تجزیه شده است. سپس این دو نیرو با تابع زمان در تحلیل وارد شده و اثرات آن‌ها لحاظ شده است. در تمامی مدل‌ها

فرض شده است که TNT در یک کامیون با ارتفاع یک و نیم متر از سطح زمین واقع شده است. طبیعتاً با تغییر مرکز انفجار فاصله مقیاس شده تغییر می یابد. تغییر این فاصله باعث می شود مقدار فشار وارد بر هر گره به علاوه مدت زمان تاثیر آن تغییر یابد. این عوامل باعث می شود تا با تغییر فاصله هم مقدار نیروهای وارد بر گره ها و هم مدت زمان تاثیر این نیروها تغییر یابد. طبق آنچه در روند تحقیق مشاهده شده است این تغییرات برای گره های بالایی سازه که فاصله ی بیشتری نسبت به نقطه انفجار دارند تاثیر کمتری را نسبت به گره های پائینی که در مجاورت نقطه انفجار هستند دارد. این روش مدل سازی یک روش مدلسازی مرسوم در بررسی عملکرد سازه ها تحت بار انفجار است.

#### ۴- بررسی عملکرد سازه تحت بار انفجار

پس از مدل سازی سازه های قاب خمشی و سازه ی جداسازی شده و بارگذاری ثقلی و بار انفجار، سازه به صورت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحلیل شده و پاسخ سازه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در گام اول دوران مفاصل پلاستیک در سطوح عملکرد LS و CP مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل نشان می دهد سازه ی قاب خمشی در سناریوهای ۱-۵۰۰، ۵-۵۰۰، ۱۰۰۰-۱ و ۵-۱۰۰۰ دچار خرابی کلی شده است. این در حالی است که سازه ی جداسازی شده در سناریوهای ۱-۵۰۰ و ۱۰۰۰-۱ و ۵-۱۰۰۰ دچار خرابی کلی شده است، با این حال خرابی هایی به صورت محدود در سناریو ۵-۵۰۰ در سازه ی جداسازی شده وجود دارد. به طور مثال در سناریوی ۵-۵۰۰ در سازه ی جداسازی شده تعداد دوران های سطح CP برابر ۲۳ است اما مقادیر دریفت نشان می دهد سازه پس از اعمال بار به تعادل رسیده و خرابی کلی در سازه ایجاد نشده است. در شکل ۸ عملکرد سازه ی جداسازی شده در سناریوی ۱۰۰۰-۵ در دو لحظه ی ابتدای ارتعاش آزاد و ثانیه ی دوم ارتعاش آزاد نشان داده شده است. در این شکل خطوط قرمز نشان دهنده ی اعضای هستند که دوران مفاصل پلاستیک در آن ها به سطح CP رسیده است. بر اساس این شکل تشکیل مفاصل پلاستیک تنها در هنگام اعمال بار محدود نمی شود چنانچه بر اساس این سناریو اکثر دوران های مفاصل پلاستیک در ارتعاش آزاد سازه تشکیل شده است. در جدول ۴ تعداد مفاصل پلاستیک در ستون های سازه های جداسازی شده و سازه ی قاب خمشی در دو سطح LS و CP نشان داده شده است. بر اساس این جدول با افزایش مقادیر TNT تعداد مفاصل افزایش و با افزایش فاصله تعداد مفاصل کاهش یافته است. نتایج نشان می دهد در حالت کلی سازه ی جداسازی شده عملکرد بهتری را نسبت به سازه ی با تکیه گاه ثابت داشته است. همچنین رنگ قرمز در این جدول نشان می دهد سازه در آن سناریو دچار خرابی کلی شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۸ سطح عملکرد مفاصل پلاستیک در سازه‌ی ۱۰ طبقه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای در سناریوی انفجار ۱۰۰۰-۵ الف) در لحظه‌ی ابتدایی ارتعاش آزاد (ب) در ثانیه‌ی دوم ارتعاش آزاد

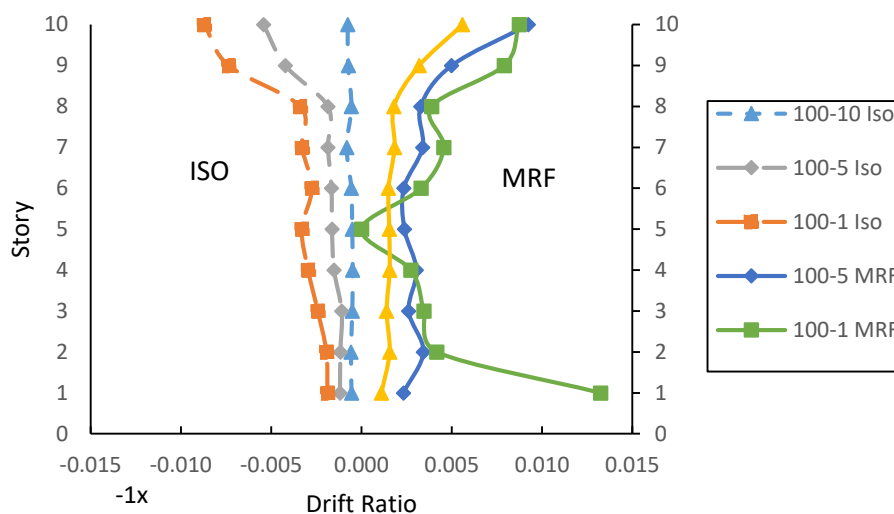
جدول ۴ تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در ستون‌های سازه‌های مورد نظر

نام	سازه‌ی جداسازی شده		سازه دارای سیستم قاب خمشی ویژه	
	تعداد مفاصل پلاستیک در سطح عملکرد LS	تعداد مفاصل پلاستیک در سطح عملکرد CP	تعداد مفاصل پلاستیک در سطح عملکرد LS	تعداد مفاصل پلاستیک در سطح عملکرد CP
100-1	۰	۰	۵۶	۳
100-5	۰	۰	۰	۰
100-10	۰	۰	۰	۰
500-1	۳۸	۹۸	۱۱۸	۱۲۵
500-5	۱۴	۲۲	۳۲	۵۰
500-10	۰	۰	۰	۰
500-20	۰	۰	۰	۰
1000-1	۵۱	۱۰۵	۲۰۱	۱۸۲
1000-5	۳۵	۹۵	۴۱	۱۱۵
1000-10	۱	۰	۵	۰
1000-20	۰	۰	۰	۰
1000-30	۰	۰	۰	۰

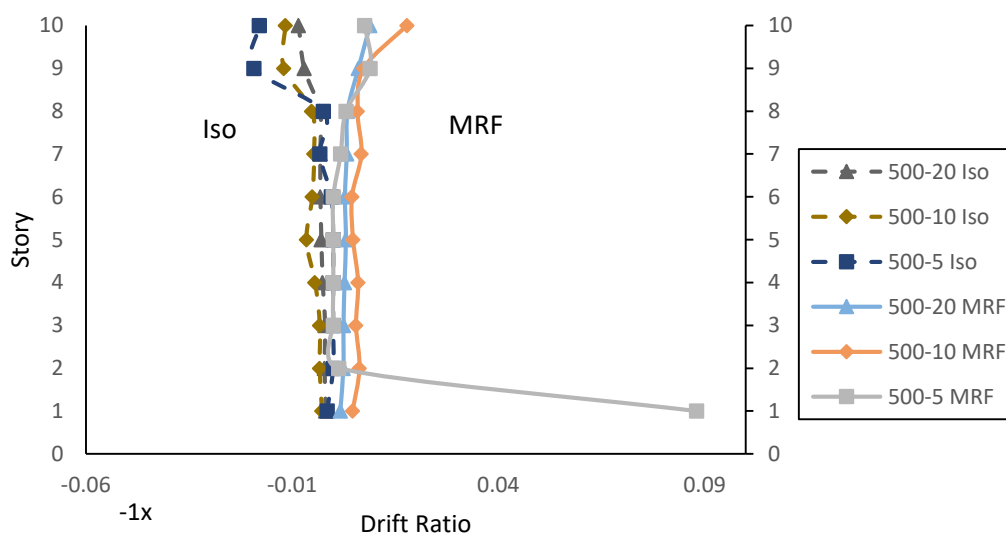
در شکل ۹ مقادیر دررفت سازه‌های مورد بررسی در سناریوهای مورد نظر نشان داده شده است. برای بررسی راحت‌تر و مقایسه‌ی بهتر پاسخ‌های سازه‌های جداسازی شده و سازه با پای ثابت، پاسخ مورد نظر در این تحقیق در یک منحنی نشان داده شده است بنابراین محور افقی در سمت چپ هر منحنی می‌بایست در ضریب ۱- ضرب شود. همچنین در این تحقیق عبارت ISO معرف نتایج در سازه‌ی جداسازی شده و عبارت MRF معرف نتایج سازه‌ی با پای ثابت است. بر اساس شکل ۹-الف در بار گذاری انفجار با وزن ۱۰۰ کیلو TNT سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای مقادیر دررفت کمتری را نسبت به سازه‌ی قاب خمشی تجربه کرده است.

بر اساس این شکل با افزایش فاصله مقادیر دررفت ایجاد شده در سازه کاهش یافته است. همچنین روند افزایش دررفت با کاهش فاصله نیز در سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای از سازه‌ی قاب خمشی کمتر بوده چنانچه در سازه‌ی قاب خمشی در سناریوی ۱-۱۰۰ مقدار دررفت به یکباره نسبت به سناریوی ۵-۱۰۰ افزایش یافته است اما این روند در سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای بسیار کمتر بوده است. در شکل ۹-ب مقادیر دررفت برای مقدار ۵۰۰ کیلوگرم TNT در دو سازه‌ی جداسازی شده و پای ثابت نشان داده شده است. بر اساس این شکل دررفت سازه در سناریوی ۵-۵۰۰ در سازه‌ی با پای ثابت به شدت افزایش یافته است که نشان می‌دهد سازه تحت این سناریو دچار خرابی کلی شده است. مقادیر دررفت در این شکل نشان می‌دهد وجود جداساز لرزه‌ای پاسخ تغییر مکانی سازه را در سناریوی انفجار به شدت کاهش داده و حتی در سناریوی ۵-۵۰۰ از خرابی کلی سازه جلوگیری کرده است.

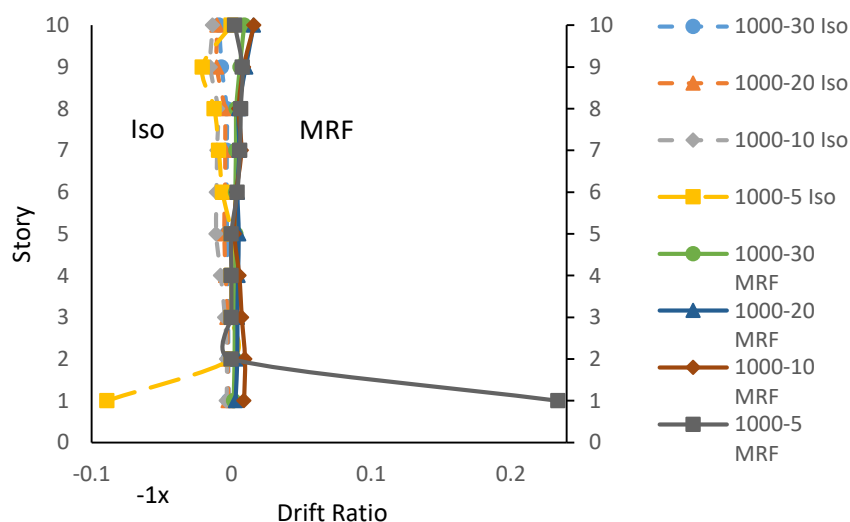
شکل ۹-ج مقادیر دررفت سازه‌ی جداسازی شده و پای ثابت را برای بار انفجار ناشی از ۱۰۰۰ کیلو TNT نشان می‌دهد. بر اساس این شکل سازه‌ی با پای ثابت در سناریوی ۵-۱۰۰۰ دچار خرابی کلی در سازه شده است اما در این سناریو سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای در مقدار دررفت کمتری را تجربه کرده است. با مقایسه‌ی مقادیر دررفت در سناریوهای مختلف می‌توان نتیجه گرفت مقادیر دررفت با کاهش فاصله‌ی مقیاس شده افزایش می‌یابد این افزایش در سازه‌ی با پای ثابت بیشتر از سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای است.



الف)



(ب)



(ج)

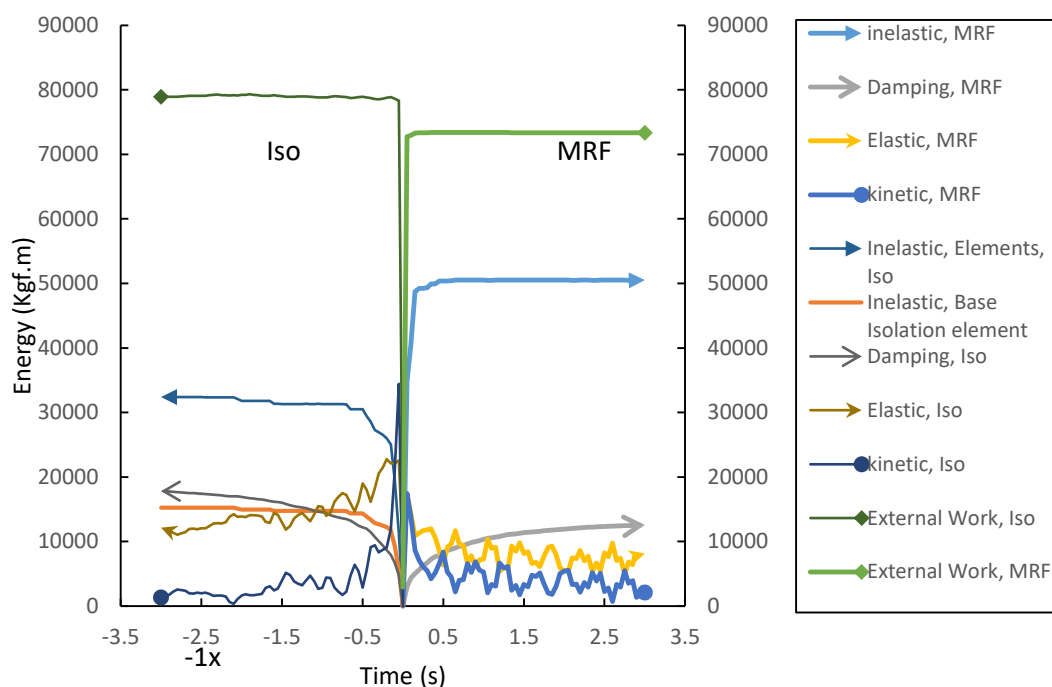
شکل ۹ منحنی پیشینه دریفت طبقات تحت بار انفجار با وزن TNT الف ۱۰۰ (ب) ۵۰۰ (ج) ۱۰۰۰ کیلو

## ۵- بالانس انرژی در سناریوی بارگذاری انفجار

همان‌طور که در بخش ۲-۲ 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 تلف شده 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 تلف شده و غیر قابل 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.

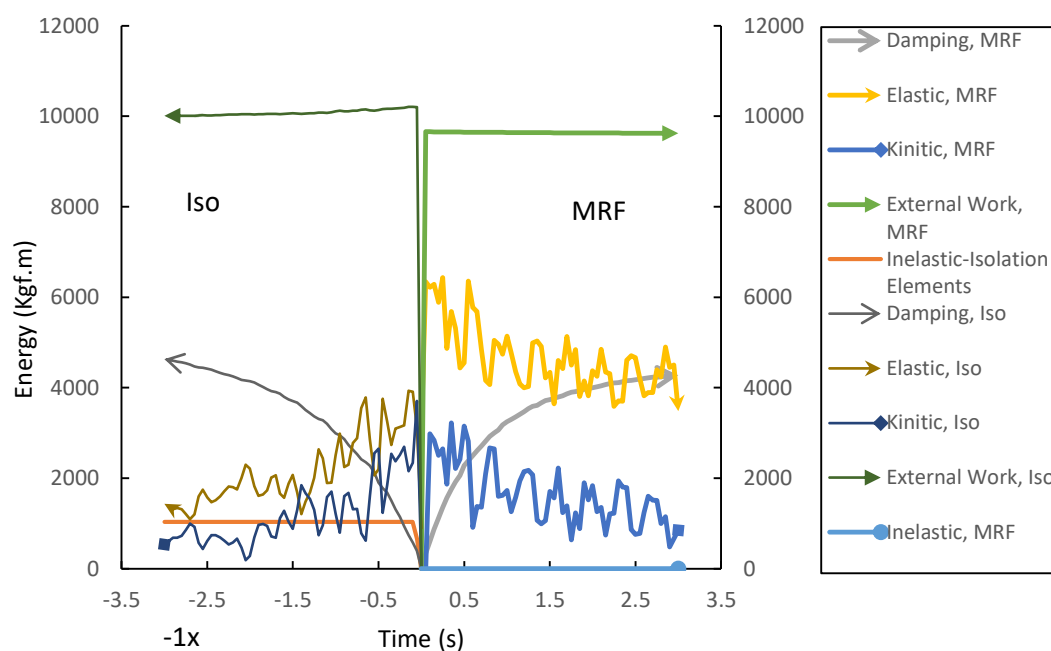
در شکل ۱۰ مقادیر کار خارجی و داخلی انجام شده در سازه‌های جداسازی شده و با پای ثابت نشان داده شده است. برای مقایسه‌ی بهتر مقادیر انرژی در دو سازه‌ی جداسازی شده و پای ثابت منحنی‌ها در یک شکل نشان داده شده است. بر اساس این شکل کار خارجی انجام شده در سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای مقداری از سازه‌ی قاب خمشی بیشتر است. در واقع تغییر مکان موجود در جداسازها و انرژی تلف شده در آن باعث شده است کار خارجی انجام شده بیشتر از سازه‌ی با پای ثابت باشد. بر اساس این شکل مقدار انرژی کرنشی پلاستیک در اعضای سازه‌ی تیر و ستون در سازه‌ی با پای ثابت بیشتر از سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای است. در واقع انرژی تلف شده در جداسازها باعث شده است المان‌های تیر و ستون انرژی کرنشی پلاستیک کمتری را تلف کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد در این سناریو انرژی جنبشی، کرنشی الاستیک و انرژی تلف شده توسط میرایی ذاتی سازه در سازه‌ی جداسازی شده بیشتر از سازه‌ی با پای ثابت است.



شکل ۱۰ منحنی انرژی در سازه‌ها در سناریوی ۱۰-۱

در شکل ۱۱ منحنی‌های انرژی در سناریوی ۱۰-۵ برای دو سازه‌ی جداسازی شده و سازه‌ی با پای ثابت نشان داده شده است. بر اساس این شکل مقدار انرژی کرنشی پلاستیک در سازه‌ی با پای ثابت تقریباً صفر است. در واقع سازه کار خارجی اعمال شده را توسط انرژی کرنشی، انرژی الاستیک و انرژی تلف شده توسط میرایی ذاتی در سیستم مستهلک کرده است. این در حالی است که در سازه‌ی جداسازی شده مقداری از انرژی ورودی به صورت انرژی هیستریزس در جداساز تلف شده است. اتلاف انرژی در این سناریو در باعث شده است سازه انرژی الاستیک کمتری را برای ایجاد بالانس انرژی ذخیره نماید. در این سناریو نیز به علت اتلاف انرژی در جداساز لرزه‌ای مقدار کار خارجی انجام شده در سازه‌ی دارای جداساز بیشتر از سازه‌ی با پای ثابت است. با مقایسه‌ی شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود با

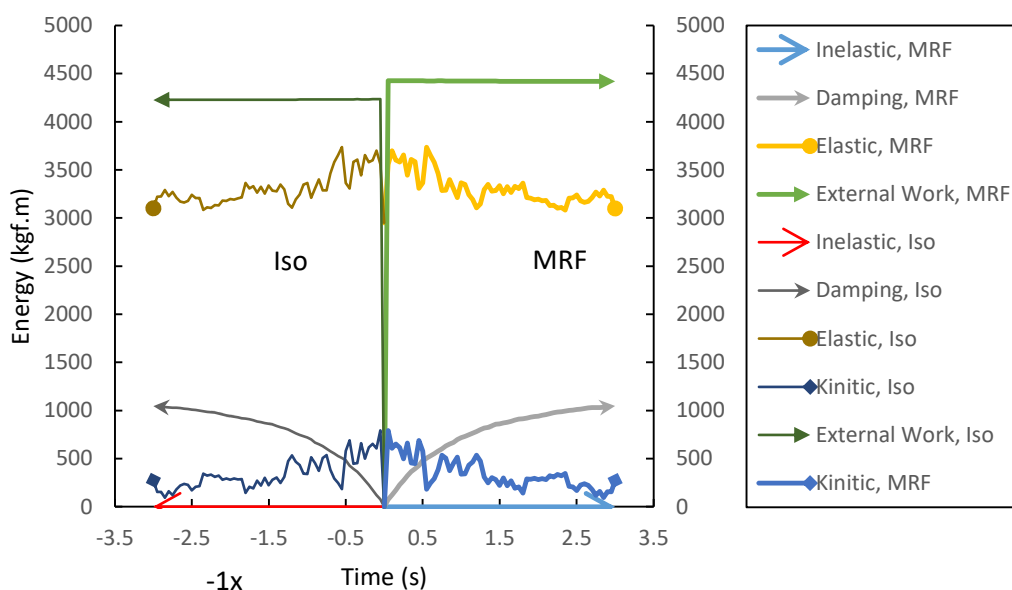
افزایش فاصله از محل انفجار مقدار کار خارجی انجام شده در سیستم کاهش یافته و انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده در سیستم نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱ منحنی انرژی در سازه‌ها در سناریوی ۱۰۰-۵

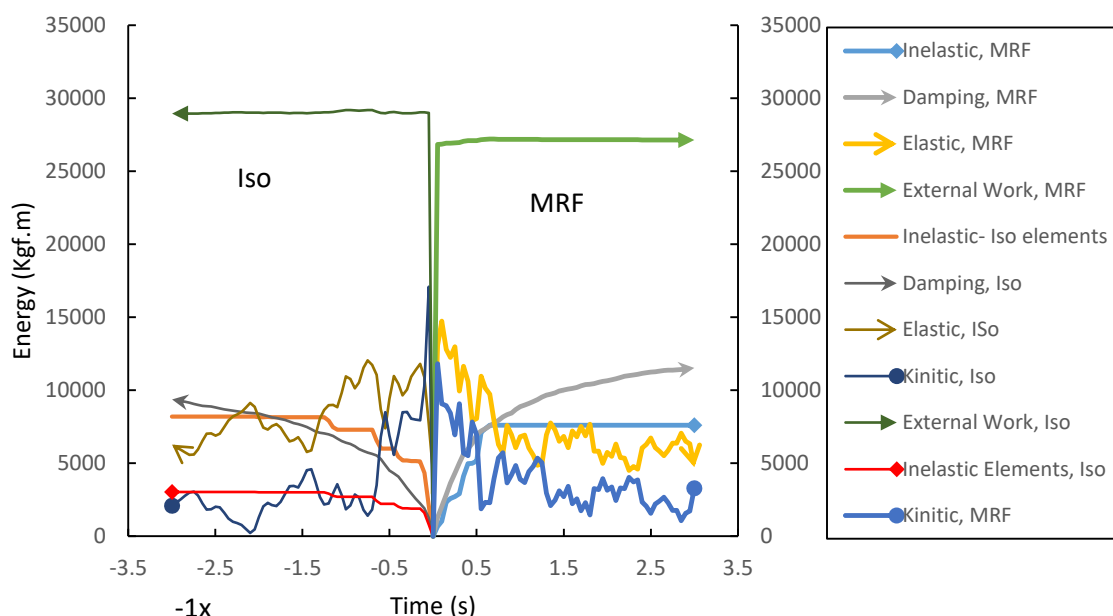
در شکل ۱۲ منحنی انرژی‌های موجود در بالانس انرژی در سناریوی انفجار ۱۰۰-۱۰ نشان داده شده است. بر اساس این شکل کار خارجی انجام شده در این سناریو بسیار کمتر از سناریوهای ۱۰۰-۱ و ۱۰۰-۵ است. همچنین در این سناریو کار خارجی انجام شده نسبت به سازه‌ی با پای ثابت کمتر است. در این سناریو انرژی کرنشی پلاستیک در دو سازه‌ی مورد بررسی تقریباً برابر صفر است. نکته‌ی جالب در این سناریو این است که رفتار سازه‌ی جداسازی شده در این سناریو تا حدود زیادی شبیه به سازه‌ی با پای ثابت است و در واقع سازه‌ی جداسازی شده همانند سازه‌ی با پای ثابت عمل کرده است. در واقع در این سناریو به علت انرژی ورودی ناچیز، جداسازها یا تغییر مکانی نداشته و یا تغییر مکان آن‌ها بسیار ناچیز بوده است.





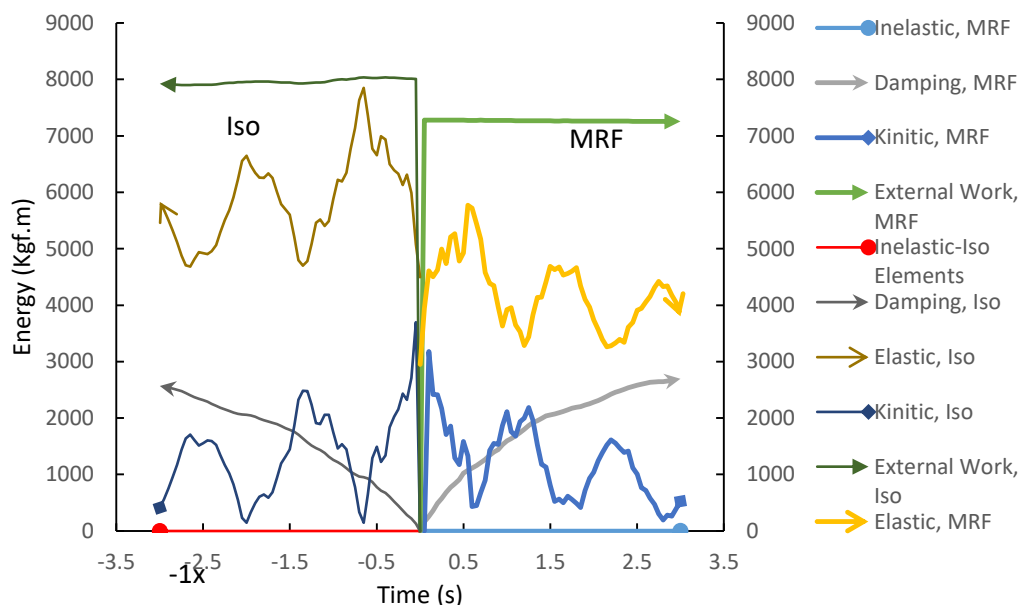
شکل ۱۲ منحنی انرژی در سازه‌ها در سناریوی ۱۰۰-۱۰

در شکل ۱۳ منحنی‌های انرژی در سناریوی ۵۰۰-۱۰ نشان داده شده است. بر اساس این شکل کار خارجی انجام شده در سازه‌ی جداسازی شده مقداری بیشتر از سازه‌ی با پای ثابت است. انرژی کرنشی الاستیک ذخیره شده در سیستم در دو سازه‌ی جداسازی شده و با پای ثابت تقریباً مشابه هم است. انرژی جنبشی موجود در سازه‌های نیز در این سناریو تقریباً روند یکسانی را طی می‌کنند. در این سناریو در سازه‌ی با پای ثابت مقداری از انرژی توسط انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده است این در حالی است که تقریباً به همین اندازه در سازه‌ی جداسازی شده انرژی توسط جداساز مستهلک شده است. انرژی مستهلک شده در جداسازها باعث شده است انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده در المان‌های تیر و ستون کاهش یابد و به عبارت دیگر خسارت ناشی از بار گذاری در این سازه نسبت به سازه‌ی با پای ثابت با کاهش روبه رو شود.

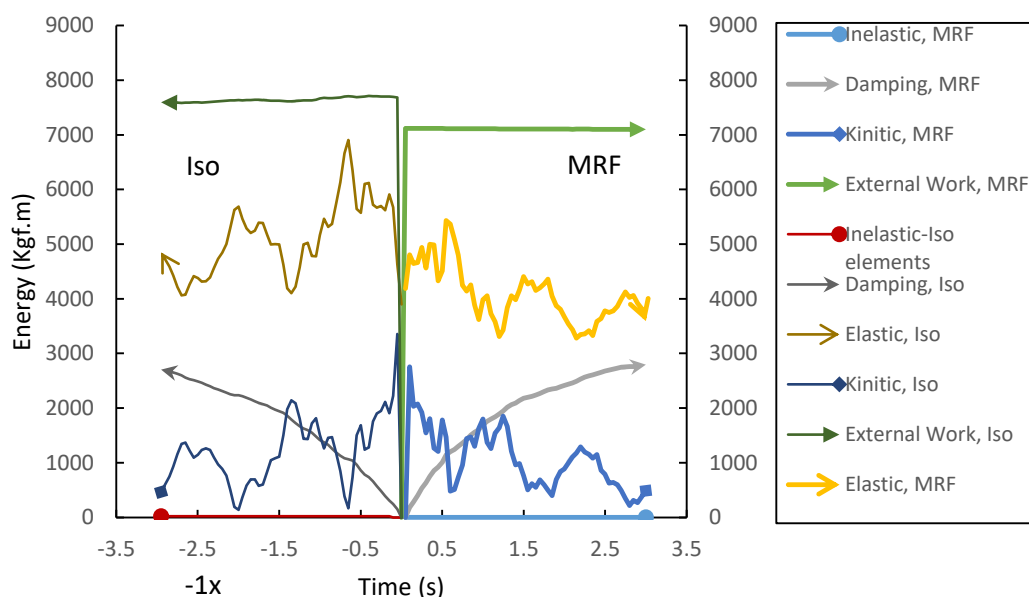


شکل ۱۳ منحنی انرژی در سازه‌ها در سناریوی ۵۰۰-۱۰

در شکل ۱۴ و ۱۵ منحنی‌های تاریخچه زمانی کار خارجی و انرژی‌های داخلی در دو سناریوی ۲۰-۵۰۰ و ۳۰-۱۰۰۰ نشان داده شده است. در این دو سناریو همانند سناریوی ۱۰-۱۰۰ انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده در سیستم بسیار ناچیز بوده و همچنین بالانس انرژی در سازه‌ی دارای جداساز همانند سازه‌ی با پای ثابت بوده است.



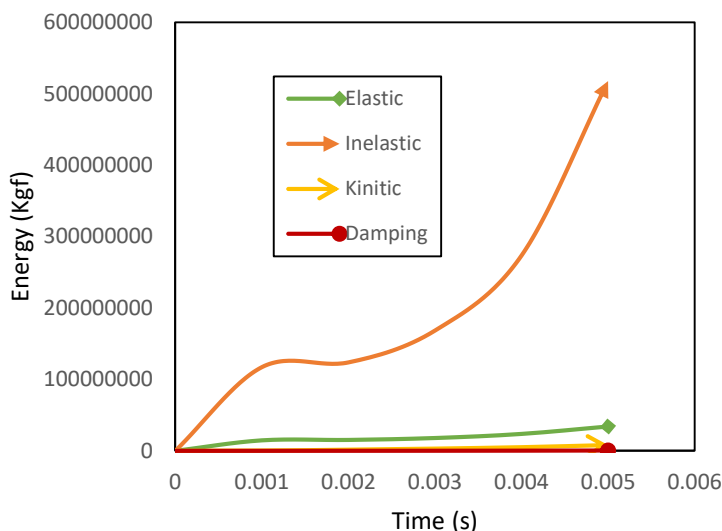
شکل ۱۴ منحنی انرژی در سازه‌ها در سناریوی ۳۰-۱۰۰۰



شکل ۱۵ منحنی انرژی در سازه‌ها در سناریوی ۲۰-۵۰۰

در شکل ۱۶ 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

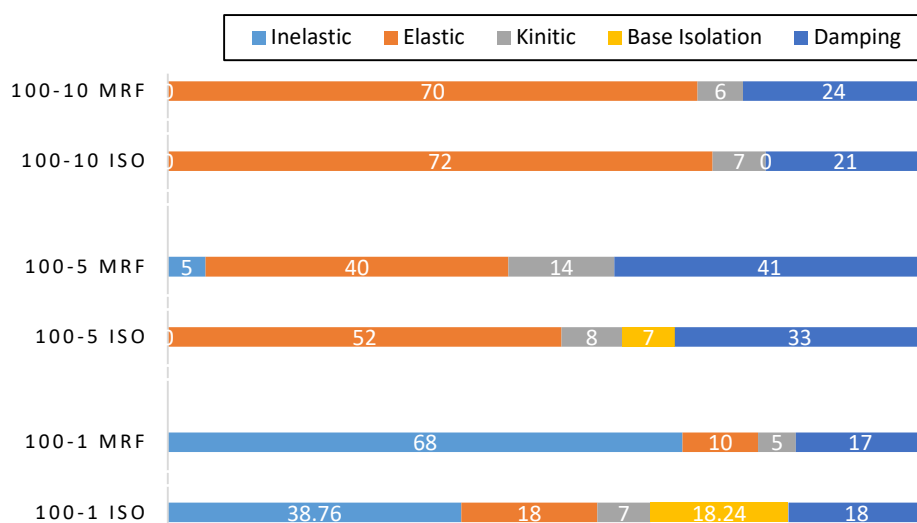
تحلیل دچار خرابی کلی می‌شود. در این سناریو بیشترین مقدار انرژی مربوط به انرژی کرنشی است و انرژی کرنش الاستیک سهم بسیار کمی در جذب و ایجاد بالانس انرژی دارد. در این سناریوی در لحظه‌ای که انرژی کرنشی پلاستیک به حداکثر مقدار خود می‌رسد خرابی کلی در سیستم حاصل می‌شود. بنابراین در سناریوهای ۱-۱۰۰۰، ۵-۱۰۰۰، ۵-۵۰۰ که سازه دچار خرابی کلی می‌شود در واقع ظرفیت سازه برای ایجاد بالانس انرژی بین کار خارجی و کار داخلی وجود ندارد و با رسیدن به ظرفیت انرژی نهایی، سازه دچار خرابی کلی می‌شود.



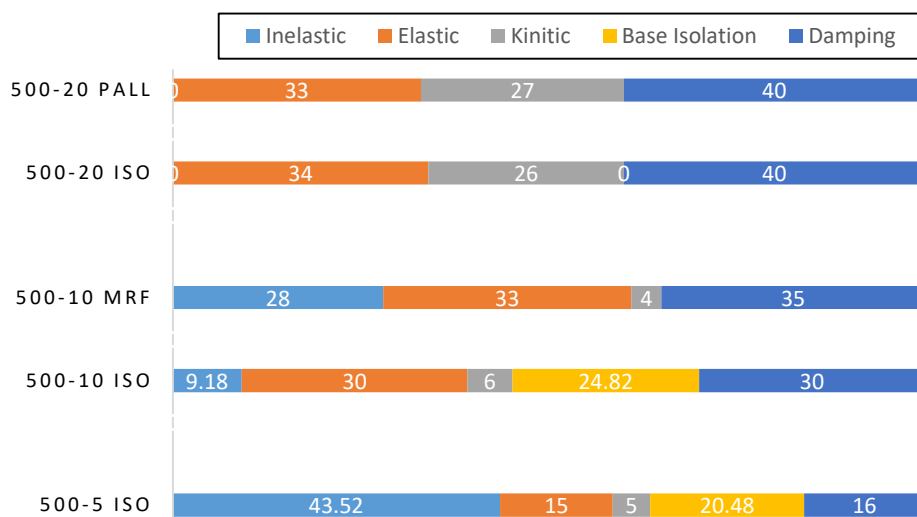
شکل ۱۶ منحنی انرژی در سازه‌ی قاب خمشی در سناریوی ۱-۱۰۰۰

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 ۱۷ درصد انرژی‌های مختلف ذخیره شده و تلف شده در سازه‌های دارای جداساز و با پای ثابت نشان داده شده است.

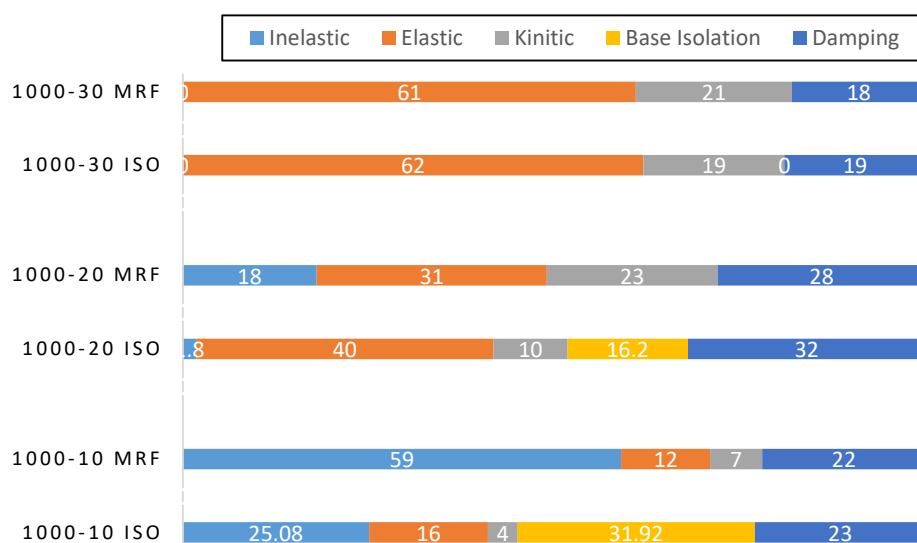
بر اساس شکل ۱۷ الف در یک وزن مشخصی از بار انفجار افزایش فاصله باعث کاهش انرژی کرنشی پلاستیک در سازه‌ها می‌شود. در سازه‌های دارای جداساز لرزه‌ای مقدار انرژی کرنشی تلف شده توسط المان‌های تیر و ستون کمتر از سازه‌ی قاب خمشی است. به صورت کلی با افزایش فاصله‌ی سازه از محل انفجار سهم انرژی کرنشی تلف شده در سازه به انرژی کرنشی الاستیک، یا انرژی ذخیره شده در سازه (انرژی پتانسیل) تبدیل می‌شود که این انرژی به مرور زمان به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و انرژی جنبشی نیز توسط میرایی ذاتی در سازه مستهلک خواهد شد. در یک فاصله‌ی ثابت با افزایش بار انفجار، مقدار انرژی کرنشی پلاستیک در سازه‌ها افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد وجود جداساز لرزه‌ای در سناریوهایی که در آن انرژی کرنشی پلاستیک در سازه وجود دارد می‌تواند مقدار انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده توسط المان‌های تیر و ستون را کاهش دهد، چنانچه در سناریوی ۱-۱۰۰ در حدود ۲۹٪ از انرژی کرنشی تلف شده توسط المان‌های تیر و ستون کاهش یافته است که نشان می‌دهد میزان خسارت وارده به سازه می‌تواند تا حدود زیادی کاهش یابد. بر اساس نتایج بدست آمده این نتیجه حاصل می‌شود که اگر مقدار فاصله‌ی مقیاس شده از حدی کمتر شود و تغییر مکان پلاستیک در سازه وجود نداشته باشد رفتار سازه‌ی جداسازی شده و پای ثابت تقریباً همانند هم خواهد بود و وجود جداساز تأثیری بر عملکرد سازه ندارد اما هرچه فاصله‌ی مقیاس شده بیشتر باشد نقش جداساز در استهلاک انرژی بیشتر خواهد بود به طوری که در سناریوهای ۵-۵۰۰ و ۱۰-۵۰۰ به ترتیب ۲۴ و ۲۰ درصد از انرژی ورودی توسط جداساز مستهلک خواهد شد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۷ درصد انرژی‌های جذب شده و تلف شده در سازه تحت انفجار الف (100 kg TNT ب) (500 kg TNT ج) (1000 kg TNT د)

## ۶- نتایج

با توجه به اینکه سیستم جداساز لرزه‌ای یکی از پرکاربردترین سیستم‌های مدرن در جهت جذب انرژی ورودی در سازه‌ها است، در این تحقیق رفتار سازه‌های دارای جداساز لرزه‌ای در سناریوی انفجار بر مبنای بالانس انرژی بررسی شده است. برای رسیدن به این هدف یک سازه‌ی ۱۰ طبقه با سیستم قاب خمشی طراحی گردید. پس از طراحی سازه‌ی اولیه، جداساز لرزه‌ای از نوع LRB طراحی و به سازه‌ی اولیه اضافه شده است. برای بارگذاری انفجار از ۱۲ سناریوی مختلف استفاده شده است که هر سناریو به دو تیپ سازه‌ی دارای جداساز و سازه با پای ثابت وارد شده است. ابتدا عملکرد دو سازه‌ی جداسازی شده تحت سناریوهای انفجار بررسی گردید. نتایج نشان داده است سازه‌ی دارای جداساز لرزه‌ای عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سازه با پای ثابت داشته است. در ادامه بالانس انرژی در سازه‌های دارای جداساز و بدون جداساز بررسی شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در سناریوهایی که بار چندانی به سازه وارد نمی‌شود مانند بارگذاری انفجار معادل با ۱۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۱۰ متری، جداساز لرزه‌ای تأثیری بر بالانس انرژی نداشته و رفتار سازه‌ی دارای جداساز و بدون جداساز تقریباً یکسان است. همچنین وجود جداساز هنگامی که سازه تحت بار انفجار نسبتاً زیاد مانند انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۱۰ متری قرار می‌گیرد، در حدود ۳۰٪ از انرژی ورودی توسط جداساز مستهلک شده که این میزان باعث می‌شود انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده توسط سایر اعضا از ۵۹٪ به حدود ۲۵٪ کاهش یابد که نشان می‌دهد انرژی تلف شده در جداسازها باعث می‌شود سهم انرژی کرنشی پلاستیک سایر اعضا در بالانس انرژی کاهش یابد و سطح ایمنی سازه افزایش یابد. همچنین در بارگذاری‌های انفجار شدید مانند انفجار ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ی ۱ متری از سازه‌ها، وجود جداساز تأثیری بر ناپایداری سازه نداشته و سازه‌های جداسازی شده و سازه با پای ثابت دچار خرابی کلی شده اند و بالانس انرژی در سازه ایجاد نشده است. در کل می‌توان نتیجه گرفت انرژی تلف شده توسط جداساز لرزه‌ای از میزان خسارت به اعضای سازه‌ای می‌کاهد.

## قدردانی

این تحقیق تحت حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با شماره گرنت BUT/388011/98 قرار گرفت.

## مراجع

- [1] Tavakoli, H.R, Moradi Afrapoli, M., (2018), Robustness Analysis of Steel Structures with Various Lateral Load Resisting Systems under Seismic Progressive Collapse, *Engineering Failure Analysis*, 83., 89-101.
- [2] Tavakoli, H. And Kiakojouri, F., (2012) Influence Of Sudden Column Loss on Dynamic Response Of Steel Moment Frames Under Blast Loading, *International Journal Of Engineering-Transactions B: Applications*, 26, 197-206.
- [3] Tavakoli, H.R, Kiakojouri, F., (2012), Progressive collapse of frame structures: suggestions for robustness assessment, *Scientia Iranica*, 21(2), 329-338.
- [4] Tavakoli, H.R., Rashidi Alashti, A., (2013), Evaluation of progressive collapse potential of multi-story moment resisting steel frame buildings under lateral loading , *Scientia Iranica*, 20(1), 77-86.
- [5] Bangash, T.,(2006), *Explosion-resistant buildings: design, analysis, and case studies*, Springer Science & Business Media.
- [6] Tavakoli, H.R., Naghavi, F., and Goltabar, R., (2015), Effect of base isolation systems on increasing the resistance of structures subjected to progressive collapse, *Earthquakes and Structures*, 9 (3), 639-656.
- [7] Kang, B.S, Li, L., and Ku, T.W., (2009), Dynamic response characteristics of seismic isolation systems for building structures, *Journal of mechanical science and technology*, vol. 23, pp. 2179-2192.
- [8] Jangid, R., (2007), Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions, *Engineering Structures*, vol. 29, pp. 2503-2513.
- [9] Naeim, F., and Kelly, J. M., (1999), Design of seismic isolated structures from theory to practice. John Willey and sons, Inc., NY, 1999.
- [10] Providakis, C., (2008), Pushover analysis of base-isolated steel-concrete composite structures under near-fault excitations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 28, pp. 293-304.
- [11] Liao, W., Loh, C., and Lee, B., (2004), Comparison of dynamic response of isolated and non-isolated continuous girder bridges subjected to near-fault ground motions, *Engineering Structures*, vol. 26, pp. 2173-2183.
- [12] Guruprasad, S., Mukherjee, A., (2000), Layered sacrificial claddings under blast loading Part I—analytical studies, *International Journal of Impact Engineering*. 24(9): p. 957-973.
- [13] Loizeaux, M. and A.E. Osborn, (2006) Progressive Collapse—An Implosion Contractor’s Stock in Trade. *Journal of performance of constructed facilities*. 20(4): p. 391-402.
- [14] Kangda, M.Z., Bakre, S. (2019), Positive-Phase Blast Effects on Base-Isolated Structures, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(5): 4971–4992.
- [15] Mohebbi, M., Dadkhah, H.D., (2017), Performance of Semi-Active Base Isolation Systems under External Explosion, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 17(10).
- [16] Zhang, R., Phillips, B.M., (2016), Performance and Protection of Base-Isolated Structures under Blast Loading, *Journal of Engineering Mechanics*, 142(1).
- [17] Ngo, T., (2007) Blast loading and blast effects on structures—an overview, *Electronic Journal of Structural Engineering*. 7: p. 76-91.
- [18] Oskouei, A.V., and F. Kiakojouri. (2012) Steel Plates Subjected to Uniform Blast Loading. *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publ.
- [19] Szyniszewski, S. and T. Krauthammer, (2012) Energy flow in progressive collapse of steel framed buildings. *Engineering Structures*. 42: p. 142-153
- [20] FEMA356. *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*; Federal Emergency Management Agency, Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings in to a national consensus standard, 2000.