

## ارزیابی بالانس انرژی در سازه‌های فولادی دارای میراگر اصطکاکی پال تحت بارگذاری انفجار

مجید مرادی<sup>۱</sup>، حمیدرضا توکلی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۲۴

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۴-۱۱

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۴-۱۲

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۴-۱۹

### کلمات کلیدی:

میراگر اصطکاکی پال

بارگذاری انفجار

سازه فولادی

بالانس انرژی

**خلاصه:** امروزه از المان‌های زیادی در جهت کنترل ارتعاشات و کاهش آسیب‌های سازه‌ای استفاده می‌شود. میراگر اصطکاکی پال یکی از این المان‌ها است. این میراگر با اتلاف انرژی می‌تواند به کاهش خسارات سازه‌ای کمک کند. بارهایی مانند بار لرزه‌ای و انفجار هر یک میزان قابل توجهی از انرژی را به سازه تحمیل می‌کنند. این انرژی باید توسط المان‌های سازه‌ای جذب یا دفع شود تا تعادل مجدد در سازه ایجاد شود. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از مفاهیم بالانس انرژی در سازه، عملکرد یک ساختمان ده طبقه دارای میراگر اصطکاکی پال تحت بارهای متعدد انفجار بررسی شود. دو سازه ده طبقه با سیستم قاب خمشی با و بدون میراگر اصطکاکی پال در معرض ۱۲ بار انفجار قرار گرفته و عملکرد آن‌ها با استفاده از مفاهیم دوران مفاصل پلاستیک، دریافت و انرژی کرنشی پلاستیک بررسی شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد دوران مفاصل پلاستیک، دریافت طبقات و انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده در المان‌های سازه‌ای در سازه دارای میراگر اصطکاکی پال کمتر از سازه‌ی بدون میراگر است. انرژی تلف شده در میراگر اصطکاکی پال از سهم انرژی کرنشی پلاستیک در سایر اعضا می‌کاهد و این عامل باعث کاهش آسیب‌های سازه‌ای می‌شود.

### ۱- مقدمه

معرفی راهکارهای گوناگون برای کاهش پاسخ سازه در برابر نیروهای دینامیکی می‌باشد بدین منظور استفاده از سیستم‌های کنترل در سازه‌ها یکی از راه‌های مؤثر در کاهش ارتعاشات آن‌ها و حفاظت اعضای سازه‌ای و غیر سازه‌ای می‌باشد [۱]. کنترل لرزه‌های سازه به معنای کاهش پاسخ سازه ناشی از نیروهای جانبی است و بخشی از حفاظت سازه‌ای می‌باشد که در آن حرکت سازه توسط سیستم کنترلی تنظیم می‌گردد. سیستم‌های کنترل بر اساس استفاده از منابع انرژی به چهار گروه اصلی شامل سیستم‌های کنترل فعال، غیرفعال، نیمه فعال و مرکب طبقه بندی می‌شوند [۲]. سیستم‌های کنترل غیرفعال برای عملکرد نیاز به منبع انرژی خارجی نداشته و نیروی کنترل توسط حرکت سازه ایجاد می‌شود. از میان سیستم‌های کنترل غیرفعال، میراگرهای اصطکاکی به دلیل دارا بودن مکانیسم ساده،

بارهای مختلفی در طول عمر سازه ممکن است ایمنی آن را به خطر بی‌اندازد [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]. امروزه برای مقابله با بارهای جانبی سیستم‌های نوینی به وجود آمده است. در دهه‌های اخیر، یکی از موضوعات اساسی تحقیقات،

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Tavakoli@nit.ac.ir



های تجارت جهانی را توصیف کند.

امروزه تحقیقات مفصلی در زمینه‌ی تاثیر موج و بارگذاری انفجار بر سازه‌های مختلف انجام شده است. دینگ<sup>۳</sup> [۱۳] به صورت احتمالاتی تاثیر بار انفجار را بر سازه‌های فولادی بررسی کردند. آن‌ها ابتدا گسیختگی یک سیستم یک درجه آزاد تحت بار انفجار را بررسی کرده و در ادامه گسیختگی المان‌های یک سازه ده طبقه را به صورت احتمالاتی بررسی کردند. ژانگ<sup>۴</sup> و همکاران [۱۴] به صورت آزمایشگاهی و عددی تاثیر بار انفجار را بر سازه‌های بتن آرمه بررسی کردند. آن‌ها در ابتدا یک ستون را به طور آزمایشگاهی تحت بار انفجار قرار داده و در نهایت مدل عددی آن را ارائه کردند. هاشمی<sup>۵</sup> و همکاران [۱۵] پاسخ دینامیکی پل‌های کابلی را تحت بار انفجار بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داده است انفجار در نقاط خاصی از یک پل کابلی می‌تواند پاسخ‌های بسیار زیادی را در عرشه به دنبال داشته باشد. لی<sup>۶</sup> و همکاران [۱۶] به صورت عددی تاثیر بار انفجار را بر ستون‌های مختلف سازه‌های بررسی کردند. نتیجه کار آن‌ها منجر به محاسبه مقاومت این ستون‌ها تحت بار انفجار شده است.

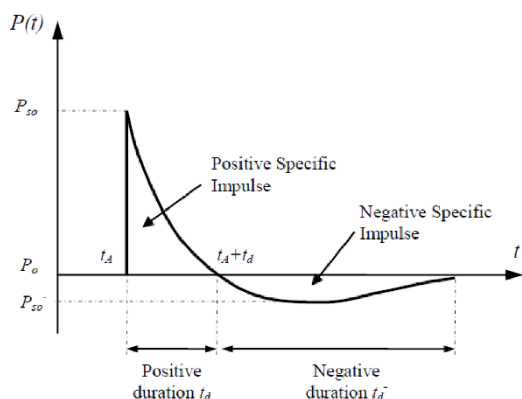
با توجه به افزایش حملات تروریستی و احتمال حوادثی نظیر انفجار که جزو حوادثی با احتمال وقوع کم و تلفات و خسارات زیاد محسوب می‌شود، بررسی رفتار سازه‌ها تحت بارگذاری انفجار بخصوص در سازه‌های دارای جاذب‌های انرژی می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در جهت کاهش خسارات کمک شایانی نماید. از این رو در این تحقیق سعی شده است با تکیه بر بالانس انرژی ناشی از بارگذاری انفجاری در سازه، رفتار سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی و سازه‌های فولادی با سیستم قاب خمشی در بارگذاری‌های مختلف انفجار بررسی و مقایسه گردد تا تاثیر وجود میراگر اصطکاکی پال مشخص شود. در ادامه مدل‌های سازه‌ای و بارگذاری‌های در نظر گرفته شده معرفی شده است. از آنجایی که عموماً سازه‌ها برای بار انفجار طراحی نمی‌شوند، سعی شده است تا رفتار سازه‌های طراحی شده برای بار زلزله‌ی طرح در برابر بارهای مختلف انفجار ارزیابی گردد، به همین دلیل در طراحی سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی پال و سازه‌ی قاب خمشی مبنای طراحی بار زلزله‌ی طرح بوده است.

عدم حساسیت به تغییر دما و تأثیر اصطکاک در کاهش انرژی ناشی از نیروهای ورودی به سازه‌ی یکی از راه‌های بهبود رفتار لرزه‌های سازه‌ها محسوب می‌شوند [۷]. این میراگر در حقیقت یک اتصال ساده با پیچ اصطکاکی است که سوراخ‌های آن لوبیایی شکل با طول بلند است. بدیهی است اصطکاک موجود مابین سطوح تماس، مانع از حرکت اتصال می‌شود [۸]. اما هنگامی که اتصال لغزش کند، درصدی از انرژی ورودی صرف مقابله با نیروی اصطکاک شده و تولید انرژی گرمایی و حرارت می‌کند. درواقع میراگر اصطکاکی با اتلاف انرژی می‌تواند خسارت و صدمات ناشی از بار جانبی را در سازه کاهش دهد [۹].

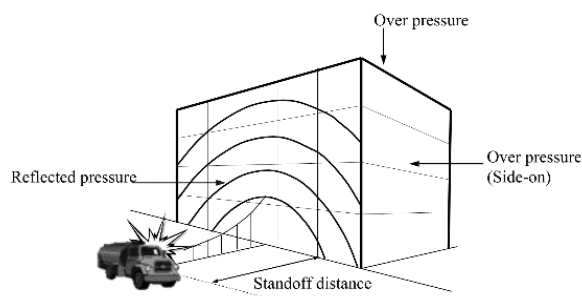
طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم در برابر انفجار مقرون به صرفه نمی‌باشد. ولی با تمهیداتی می‌توان از شدت و دامنه خسارات وارده کاست و عملکرد سازه را ارتقا بخشید و میزان خرابی در آن را کاهش داد. در طی یک انفجار، مقدار زیادی انرژی به سازه تحمیل می‌گردد. این انرژی ورودی به دو صورت جنبشی و پتانسیل (کرنشی) در سازه پدیدار می‌گردد که باید به طریقی جذب و یا مستهلک شود [۱۰]. 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<sup>۱</sup> [۱۱] 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. لو<sup>۲</sup> [۱۲] جریان انرژی در حرکات ارتعاشی بدون بکارگیری مفاهیم تنش و کرنش بطور تحلیلی شرح می‌دهد. او با استفاده از مفاهیم انرژی جنبشی و پتانسیل توانست نحوه خرابی برج

3 Ding  
4 Zhang  
5 Hashemi  
6 Li

1 Guruprasad & Mukherjee  
2 Lo



شکل ۲. تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار [۱۷]  
Fig. 2. Blast pressure time history curve



شکل ۱. تاثیرات بار انفجاری بر روی ساختمان [۱۷]  
Fig. 1. Effect of blast wave on structure

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- بارگذاری انفجار

است که در رابطه‌ی ۱ تعریف شده است [۱۷]. 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 مثلی ایده آل سازی کرد [۱۷]. رابطه‌ی معرف این بارگذاری ایده آل شده است. تحقیقات قبلی بر روی المان‌های سازه‌ای نشان می‌دهد استفاده از بارگذاری مثلی 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 مثلی می‌باشند.  $T^+$  و  $td$  مدت تداوم بارگذاری در الگوی بارهای نمایی و مثلی 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 که نمونه‌ای از آن در روابط ۴ و

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 ماده 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 [۱۲]. «شکل ۱» کامیون معمول بمب‌گذاری شده با تاثیر فشار انفجار بر ساختمان را نشان می‌دهد. پارامترهای اصلی موثر 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 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

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

مجموع کرنش را می‌توان 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:

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

همچنین انرژی جنبشی با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

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

در صورتی که انرژی ورودی و انرژی داخلی در سازه به تعادل برسند سازه پایدار می‌ماند و در غیر این صورت سازه دچار ناپایداری و خرابی کلی می‌شود.

### ۳- مدل سازه‌ای

برای بررسی اهداف مورد نظر در این تحقیق از سازه‌ی ۱۰ طبقه استفاده شده است. سازه به صورت ۴ دهانه‌ی ۴ متری با پلان متقارن («شکل ۳») با ارتفاع طبقات ۳ متر در نظر گرفته شده است. بار مرده‌ی کف برابر  $600 \text{ kg/m}^2$  و بار زنده برابر  $240 \text{ kg/m}^2$  در نظر گرفته شده است. ابتدا سازه‌ها با سیستم قاب خمشی ویژه برای ۷۵ درصد بار جانبی بر اساس آیین‌نامه‌ی ۱۰-ASCEY طراحی شده است. بر این اساس فرض شده است سازه در منطقه‌ای با شتاب‌های  $S1=0.512g$  و  $Ss=1.712g$  قرار دارد. سازه‌ی اولیه پس از طراحی برای مجهز شدن به میراگر اصطکاکی در معرض تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی قرار گرفته است.

برای درک بهتر عملکرد سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی در بار انفجار، سازه‌های بدون میراگر نیز برای ۱۰٪ بار جانبی طراحی شده است. برای طراحی سازه‌ها تنش تسلیم فولاد برابر  $2400 \text{ kgf/cm}^2$  و مدول الاستیسیته برابر  $2e+6 \text{ Kgf/cm}^2$  در نظر گرفته شده است. برای مقاطع تیر از مقطع استاندارد W و برای ستون‌ها از مقطع استاندارد Tube استفاده شده است. مشخصات مقاطع مورد استفاده در سازه‌های مورد بررسی در جداول ۱ نشان داده شده است.

۵ نشان داده شده است. اغلب روابط تخمین شدت انفجار از فاصله‌ی مقیاس شده استفاده می‌کنند. مشهورترین این روابط، روابط براد (رابطه ۴) است که در سال ۵۵ میلادی ارائه شده است [۱۷]. رابطه‌ی میلز (رابطه ۵) که در سال ۸۷ میلادی ارائه شده است، حداکثر اضافه فشار ناشی از انفجار را بر حسب کیلو پاسکال بدست می‌دهد [۱۷]. 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 [۱۷].

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

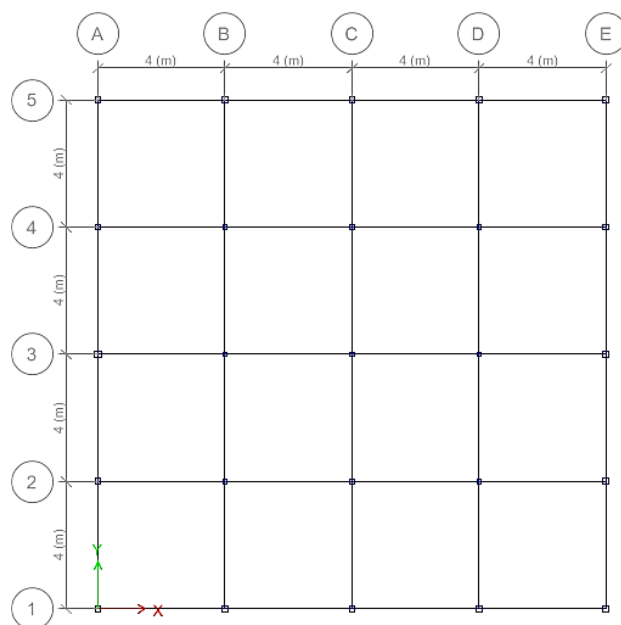
$$p_{so} = \frac{6.7}{z^3} + 1 \text{ bar}, p_{so} > 10 \text{ bar} \quad (4)$$

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

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

### 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 [۱۰]. انرژی داخلی (کار تغییر شکل) با استفاده از رابطه محاسبه می‌شود:



شکل ۳. پلان سازه

Fig. 3. Plan of Structure

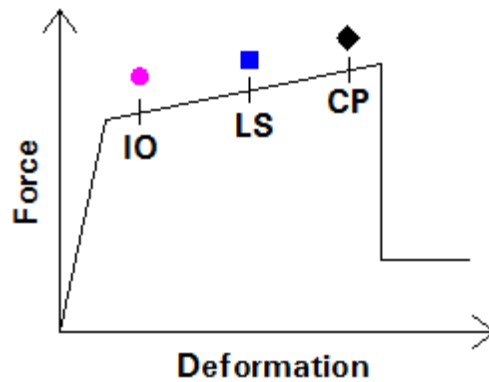
جدول ۱. مشخصات مقاطع سازه‌ای

Table 1. Structural Sections

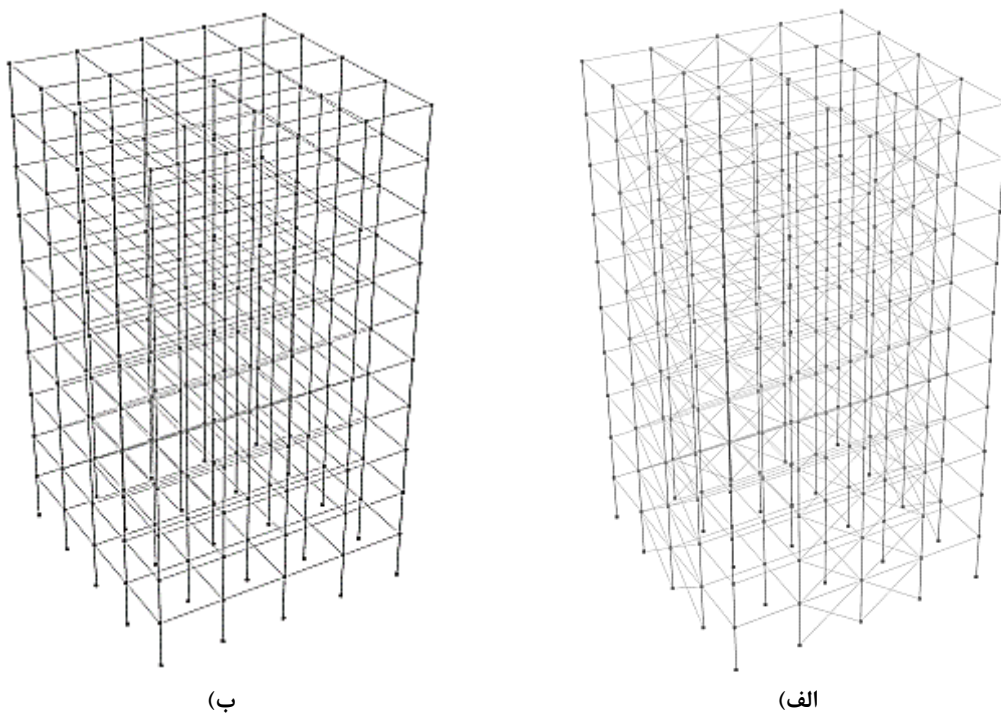
ستون	تیر	طبقه	نوع سازه
Tube ۳۰۰*۳۰۰*۱۶	W۱۲*۳۵	۴ تا ۱	۱۰ طبقه دارای میراگر
Tube ۲۰۰*۲۰۰*۱۶	W۱۲*۳۰	۸ تا ۵	
Tube ۱۸۰*۱۸۰*۱۰	W۱۲*۱۹	۱۰ و ۹	
Tube ۳۴۰*۳۴۰*۱۷,۵	W۱۲*۴۰	۱ تا ۱	۱۰ طبقه قاب خمشی ویژه
Tube ۲۴۰*۲۴۰*۱۶	W۱۲*۳۵	۸ تا ۵	
Tube ۱۸۰*۱۸۰*۱۰	W۱۲*۲۲	۱۰ و ۹	

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 ثقلی و شرایط دارای انحناء در تیر ارائه می‌دهند. این در حالی است که آئین‌نامه FEMA ۳۵۶ معیار پذیرش را برای بار جانبی و بار ثقلی ارائه می‌دهد. همچنین معیار پذیرش در این آئین‌نامه برای سه سطح IO، LS و CP ارائه شده است. همچنین استفاده از الزامات آئین‌نامه FEMA ۳۵۶ برای بار انفجار در جهت اطمینان بیشتر است. بنابراین از این آئین‌نامه برای مدل‌سازی غیرخطی و معیارهای پذیرش استفاده شده است.

سازه‌ها در ابتدا به صورت خطی در نرم افزار Etabs طراحی شده‌اند، پس از طراحی اولیه به صورت غیرخطی در نرم افزار Perform-۳D مدل‌سازی شده است. نرم افزار Perform-۳D یک نرم افزار قوی در جهت انجام تحلیل‌های غیر خطی در زمینه ارزیابی عملکرد سازه‌ها و مقاوم‌سازی سازه‌ها است. این نرم افزار یک نرم افزار اجزای محدود است که می‌تواند انواع بارهای دینامیکی را شبیه‌سازی و تحلیل کند. یکی دیگر از مزایای این نرم افزار مدل‌سازی المان‌های خاص بخصوص جاذب‌های انرژی است. با توجه به قابلیت‌های فراوان این نرم افزار، در این تحقیق برای مدل‌سازی غیر خطی سازه‌ها و اعمال بار دینامیکی ناشی از بارگذاری انفجار از این نرم افزار استفاده شده است.



شکل ۴. مدل مفصل پلاستیک  
Fig. 4. Plastic hinges Model



شکل ۵. مدل‌های سازه‌ای الف) سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی ب) سازه با سیستم قاب خمشی  
Fig. 5. Structural model a) with Pall damper b) MRF

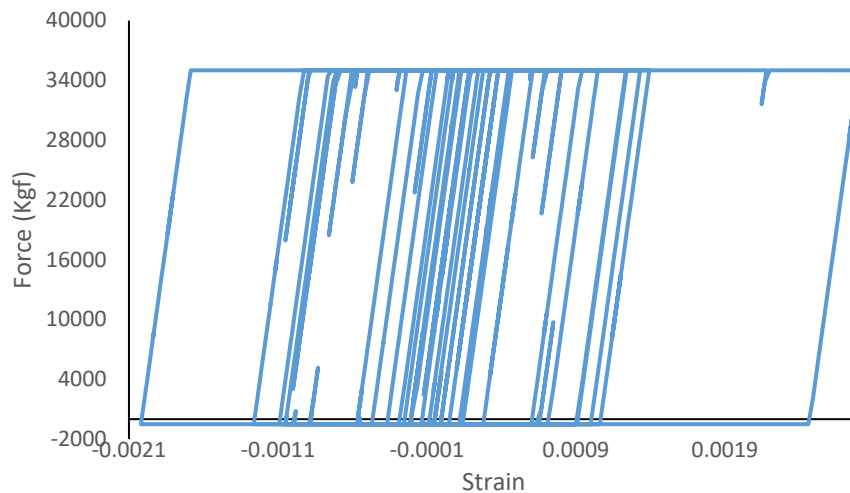
### ۳-۱ طراحی میراگر اصطکاکی پال

برای طراحی میراگر اصطکاکی پال سازه‌ی غیرخطی مدل‌سازی شده در نرم افزار Perform-۳D به میراگرهای اصطکاکی بار لغزش مختلف مجهز شده و تحت تحلیل تاریخچه زمانی قرار گرفته است. برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی از ۳ زلزله‌ی لوما پریتا، نرثریج و چی چی قرار گرفته است. مشخصات شتاب‌نگاشت‌ها در جدول ۲ و ۳ نشان داده شده است. شتاب‌نگاشت‌ها پس از مقیاس به طیف طرح

برای مدل‌سازی مفصل پلاستیک بر اساس استاندارد Fema۳۵۶ 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 مفصل پلاستیک مورد نظر در «شکل ۴» نشان داده شده است. مدل غیرخطی دارای میراگر اصطکاکی پال مدل‌سازی شده در نرم افزار Perform-۳D در «شکل ۵» نشان داده شده است. نماید.

جدول ۲. مشخصات شتاب‌نگاشت‌ها  
Table 2. Records Characteristics

نام	ایستگاه	مکانیسم	بزرگا	سال	PGA
loma	LGPC	Reverse Oblique	۶.۹۳	۱۹۸۹	۰.۵۶۹۹
northridge	Arleta - Nordhoff Fire Sta	Reverse	۶.۶۹	۱۹۹۴	۰.۳۴۵
Chi-Chi, Taiwan	CHY۰۲۴	Reverse Oblique	۷.۶۲	۱۹۹۹	۰.۲۸۱



شکل ۶. منحنی هیستریزس میراگر اصطکاکی پال  
Fig. 6. Hysteresis curve of pall damper

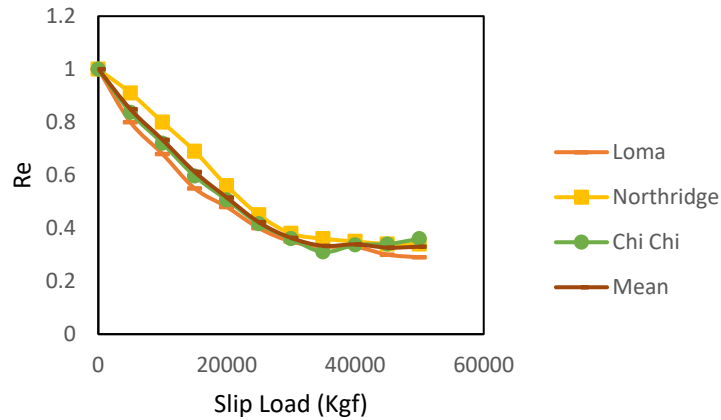
صورت کامل مدل‌سازی شده و سپس تحت زلزله‌ی Northridge قرار گرفته است. منحنی هیستریزس فاز کششی میراگر اصطکاکی است استخراج شده و با تیپ نمونه‌های آزمایشگاهی آن مقایسه شده است. در «شکل ۶» منحنی هیستریزس فاز کششی میراگر اصطکاکی طبقه‌ی اول برای سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشخص می‌شود سازه‌ی مدل‌سازی شده دارای شباهت زیادی با تیپ منحنی‌های هیستریزس موجود می‌باشد. برای انجام صحت‌سنجی از مدل وو (۲۰۰۵) استفاده شده است [۸]. آنها یک مدل آزمایشگاهی از یک قاب یک طبقه یک دهانه دو بعدی را تحت بارهای سیکلیک مورد تحقیق قرار داده و منحنی هیستریزس میراگر اصطکاکی پال را بررسی کردند. برای صحت‌سنجی از نحوه‌ی مدل‌سازی این میراگر، مدل آزمایشگاهی وو در نرم‌افزار پرفورم مدل‌سازی شده و نتایج آن با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. در شکل ۸ شماتیک مدل آزمایشگاهی وو و نتایج حاصل از مدل عددی تحقیق حاضر به همراه منحنی هیستریزس

آیین‌نامه‌ی ASCE به سازه اعمال شده است. برای در نظر گرفتن شاخص عملکرد میراگر از شاخص اتلاف انرژی استفاده شده است. بر این اساس سازه با بار لغزش مختلف تحت سه شتاب‌نگاشت عنوان شده تحلیل شده و پس از آن مقادیر انرژی کرنشی پلاستیک در المان میراگر و سایر المان‌ها استخراج و بر اساس رابطه‌ی ۱۱ مقادیر فاکتور عملکرد میراگرها محاسبه شده است. در این رابطه  $E_I$  انرژی ورودی به سازه،  $E_H$  انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده توسط میراگر اصطکاکی پال و  $R_e$  فاکتور انرژی می‌باشد [۸].

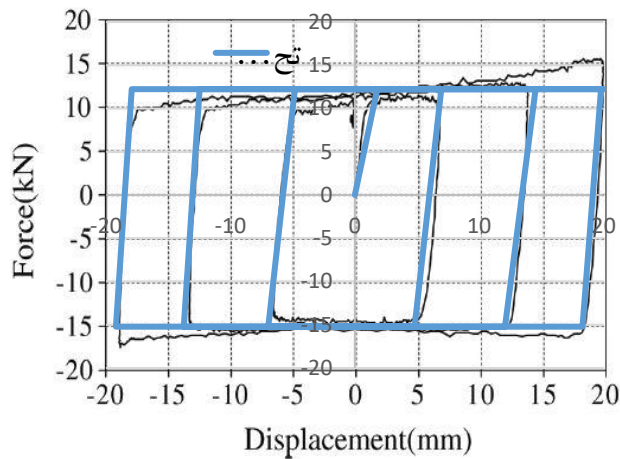
$$R_e = \frac{E_I - E_H}{E_I} \quad (11)$$

بار لغزش متناظر با کمترین شاخص به عنوان بار بهینه‌ی لغزش در این تحقیق در نظر گرفته شده است. در «شکل ۷» بار بهینه و فاکتور اتلاف انرژی میراگرها در سه زلزله‌ی عنوان شده نشان داده شده است. برای مطمئن شدن از صحت مدل‌سازی، پس از تعیین بار بهینه‌ی لغزش در میراگرها، سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی به

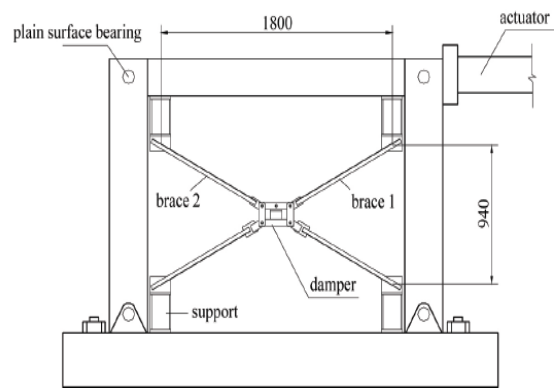




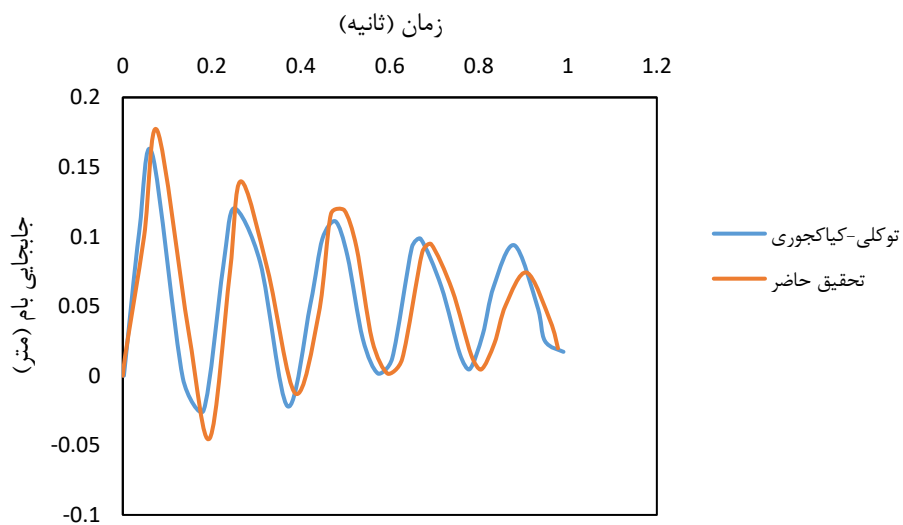
شکل ۷. منحنی بار لغزش و شاخص عملکرد میراگر اصطکاکی پال  
 Fig. 7. Slip load and performance index of pall damper



(ب)



(ف)



(ج)

شکل ۸. صحت سنجی تحقیق حاضر الف و ب) مقایسه با مدل وو ج) مقایسه با مدل توکلی-کیاکجوری

Fig. 8. Verification a) Present study b) wu model c) Tavakoli-Kiakojoori Model



جدول ۳. مشخصات بار انفجاری

Table 3. Blast load characteristics

نام	فاصله (متر)	جرم TNT (کیلوگرم)	فاصله مقیاس شده نزدیک ترین نقطه سازه به انفجار	زمان دوام نزدیک ترین نقطه سازه به انفجار (mS)
۱۰۰-۱	۱	۱۰۰	۰.۶۸۱۲۹۲	۰.۷۹۸۴۶۲
۱۰۰-۵	۵	۱۰۰	۱.۲۵۶۲۴۱	۳.۳۶۳۱۲۹
۱۰۰-۱۰	۱۰	۱۰۰	۲.۲۴۹۲۹۶	۶.۰۵۳۴۳۵
۵۰۰-۱	۱	۵۰۰	۰.۳۹۸۴۲۲	۱.۰۰۴۶۰۲۱
۵۰۰-۵	۵	۵۰۰	۰.۷۳۴۶۵۴	۱.۸۱۱۴۲۱
۵۰۰-۱۰	۱۰	۵۰۰	۱.۳۱۵۳۹۶	۶.۰۷۰۶۴۳
۵۰۰-۲۰	۲۰	۵۰۰	۲.۵۴۸۰۳۳	۱۱.۵۷۷۳۸
۱۰۰۰-۱	۱	۱۰۰۰	۰.۳۱۶۲۲۸	۲.۴۷۲۶۸۵
۱۰۰۰-۵	۵	۱۰۰۰	۰.۵۸۳۰۹۵	۱.۰۰۳۱۰۱
۱۰۰۰-۱۰	۱۰	۱۰۰۰	۱.۰۴۴۰۳۱	۵.۶۰۱۶۰۴
۱۰۰۰-۲۰	۲۰	۱۰۰۰	۲.۰۲۲۳۷۵	۱۱.۸۲۲۰۷
۱۰۰۰-۳۰	۳۰	۱۰۰۰	۳.۰۱۴۹۶۳	۱۶.۸۶۶۰۴

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 محاسبه و به آن اعمال شده است. در جدول ۳ مشخصات هر سناریوی انفجار و فاصله‌ی مقیاس شده برای نزدیک ترین نقطه به سازه و همچنین زمان دوام اضافه فشار ناشی از انفجار برای این نقطه نشان داده شده است. در این تحقیق فرض شده است مواد منفجره در یک کامیون جاسازی شده و در فواصل مختلف از سازه انفجار رخ داده است. در محاسبات بار انفجار فرض شده است انفجار در فاصله یک متر و نیم از سطح زمین رخ داده است. اندرکنش خاک و سازه و اثرات موج انفجار بر خاک و ارتعاضات ناشی از خاک صرف نظر شده است.

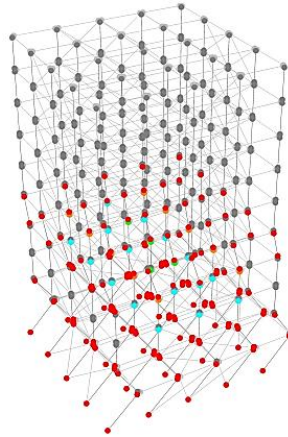
برای محاسبه بار گره ای و رسیدن به تابع زمان-نیرو برای هر گره با توجه به فاصله و وزن ماده منفجره ابتدا فشار ناشی از موج انفجار برای هر مقدار فاصله و وزن ماده به همراه زمان اثر موج بر سازه محاسبه شده است. در ادامه با توجه ببه سطح بارگیری هر

ارائه شده توسط وو نشان داده شده است. بار بهینه لغزش در تحقیق وو برای حالت کششی برابر با ۱۲٫۳ کیلو نیوتن و برای حالت فشاری برابر با ۱۵ کیلونیوتن در نظر گرفته شده بود. تحلیل قاب تحت بار سیکلیک در نرم افزار نتایج حاصل از مدل عددی در تحقیق حاضر و مدل آزمایشگاهی وو نشان می دهد نحوه ی مدل سازی میراگر پال از دقت کافی برخوردار است.

همچنین برای اعتبار سنجی روش محاسبه بار انفجار و اطمینان از صحت پاسخ سازه مورد نظر از مدل عددی توکلی-کیاکجوری [۲] (۲۰۱۳) استفاده شده است. آنها یک مدل عددی از یک قاب ۵ طبقه را در نرم افزار آباکوس مدل کرده و سپس در معرض بار انفجار قرار داده اند. در این تحقیق مدل دو بعدی آن ها در نرم افزار Pefrom-۳d مدل سازی شده و سپس در معرض یک بار انفجار معادل ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۱۵ متری قرار گرفته است. جابجایی افقی بام به عنوان پاسخ سازه تحت بار انفجار استخراج شده و سپس مقایسه شده است. نتایج حاصل از مدل عددی تحقیق حاضر و مدل عددی توکلی-کیاکجوری در شکل ۸-ج نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد پاسخ دو سازه همگرایی خوبی با یکدیگر دارند.

۳-۲ بار گذاری انفجار

در این تحقیق ۱۲ سناریوی انفجار برای سازه‌های عنوان شده



شکل ۹. سطح عملکرد مفاصل پلاستیک در سازه‌ی ۱۰ طبقه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال در سناریوی انفجار ۱۰۰۰-۱  
**Fig. 9. Performance level of plastic hinges in 10 stories with Pall damper under 1000-1 blast scenario**

سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی پال خرابی کلی رخ می‌دهد. همچنین در سازه‌ی قاب خمشی ویژه سازه تحت سناریوهای ۵۰۰-۱، ۵۰۰-۵، ۱۰۰۰-۱ و ۱۰۰۰-۵ دچار خرابی کلی می‌شود، در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت عملکرد سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال تحت بار انفجار بهتر از سازه‌ی دارای قاب خمشی می‌باشد. همچنین بر اساس جدول ۴ افزایش وزن TNT باعث می‌شود دوران مفاصل پلاستیک در سازه‌ها در یک فاصله‌ی یکسان افزایش یابد. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود کاهش فاصله‌ی محل انفجار تاثیر بیشتری بر سازه‌ی قاب خمشی نسبت به سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد سازه‌ی قاب خمشی با تعداد مفاصل پلاستیک بیشتری نسبت به سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال دچار خرابی کلی می‌شود. در سناریوهای ۱۰۰-۵، ۱۰-۱۰۰، ۵۰۰-۱۰، ۱۰-۵۰۰، ۲۰-۵۰۰، ۱۰۰۰-۲۰ و ۱۰۰۰-۳۰ هیچ مفصل پلاستیکی در سطح عملکردی LS و CP تشکیل نشده است اما ممکن است در این سناریوها دوران مفاصل پلاستیک در سطح عملکردی IO باشد. تاثیر میراگر اصطکاکی پال در سازه‌ی که برای ۷۵٪ بار جانبی طراحی شده است بر رفتار سازه تحت سناریوی ۱۰۰-۱ به گونه‌ای بوده است که از ایجاد مفصل پلاستیک در سطح عملکردی CP جلوگیری کرده است چراکه سازه‌ی قاب خمشی ویژه که برای ۱۰٪ بار جانبی طراحی شده است تحت این سناریو دارای ۳ مفصل پلاستیک در سطح عملکردی CP می‌باشد. شایان ذکر است در سناریوهایی که سازه بر اثر آن دچار دوران‌هایی در سطح عملکردی LS و CP شده است برخی از مفاصل در لحظه‌ی اعمال بار انفجار و برخی در مرحله‌ی

گره فشار وارده بر سازه به نیروی متمرکز تبدیل شده است. سپس با توجه به فاصله‌ی هر گره از محل انفجار و زاویه‌ی 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.

#### ۴- بررسی نتایج تحلیل

##### ۴-۱ عملکرد سازه‌ها تحت بار انفجار

پس از مدل‌سازی و تعیین بارهای وارد بر سازه، تحلیل دینامیکی غیرخطی 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 دریفیت طبقات تحت بارهای انفجاری مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. نتایج تحلیل نشان داده است که ستون‌های سازه‌ی ۱۰ طبقه دارای میراگر پال هنگامی که در معرض سناریوهای ۵۰۰-۱، ۱۰۰۰-۱ و ۱۰۰۰-۵ قرار می‌گیرد از سطح عملکردی CP عبور کرده و دچار خرابی کلی می‌شود. «شکل ۹» دوران مفاصل پلاستیک ستون را در سطوح عملکردی CP در سناریوی ۱۰۰۰-۱ را در لحظه‌ی خرابی نشان می‌دهد. بر اساس این شکل بسیاری از ستون‌های سازه به سطح عملکردی Cp (نقاط قرمز رنگ) رسیده یا از آن رد شده اند که این امر نشان‌دهنده‌ی خرابی کلی در سازه می‌باشد.

بررسی نتایج نشان می‌دهد با افزایش فاصله‌ی انفجار به سازه مقادیر دوران مفاصل پلاستیک در سازه افزایش می‌یابد. این افزایش به گونه‌ایست که در سناریوهای ۱-۵۰۰، ۱-۱۰۰ و ۱۰۰۰-۵ در

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

Table 4. Number of plastic hinges in structure columns

سازه دارای سیستم قاب خمشی ویژه		سازه دارای اصطکاکی پال		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	۴۸	۱۰۰-۱
۰	۰	۰	۰	۱۰۰-۵
۰	۰	۰	۰	۱۰۰-۱۰
۱۲۵	۱۱۸	۱۰۱	۲۵	۵۰۰-۱
۵۰	۳۲	۲۵	۷	۵۰۰-۵
۰	۰	۰	۰	۵۰۰-۱۰
۰	۰	۰	۰	۵۰۰-۲۰
۱۸۲	۲۰۱	۱۲۵	۳۳	۱۰۰۰-۱
۱۱۵	۴۱	۷۵	۲۵	۱۰۰۰-۵
۰	۵	۰	۱	۱۰۰۰-۱۰
۰	۰	۰	۰	۱۰۰۰-۲۰
۰	۰	۰	۰	۱۰۰۰-۳۰

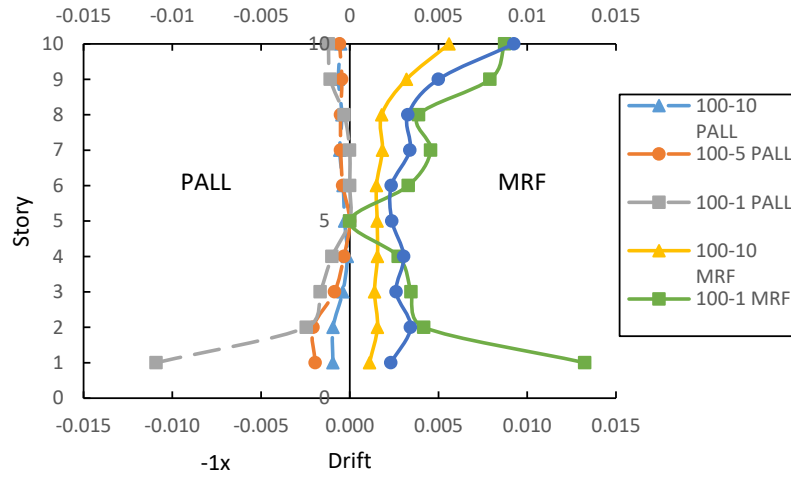
ارتعاش آزاد سازه تشکیل شده است.

سازه دچار خسارت کلی شده است در لحظه‌ی پایان تحلیل مقادیر دررفت طبقات در سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال کمتر از سازه‌ی قاب خمشی ثبت شده 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 می‌باشد. در واقع در فاصله‌ی مقیاس شده‌ی بیشتر از یک مقادیر دررفت هیچ یک از سازه‌ها طبقه بیشتر از مقدار دررفت سازه در سطح عملکرد IO نمی‌باشد با این وجود به صورت محدودی دوران مفاصل پلاستیک در سازه به سطح عملکرد LS می‌رسد.

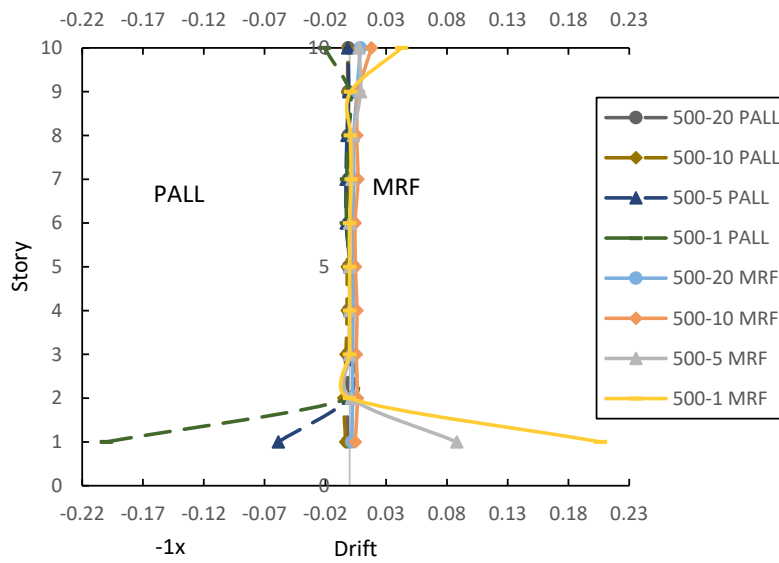
#### ۴-۲ بالانس انرژی در سناریوی بارگذاری انفجار

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

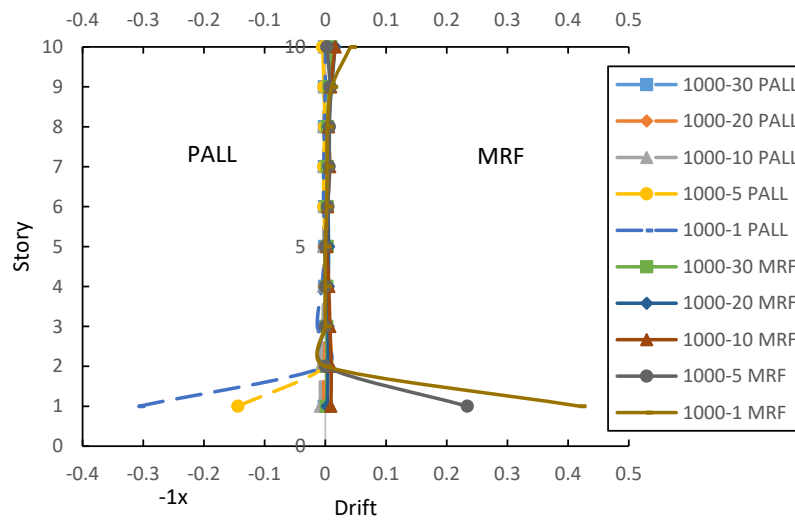
در «شکل ۱۰۹» دررفت سازه‌های مورد نظر در سناریوهای بارگذاری انفجار عنوان شده نشان داده شده است. برای ارزیابی و مقایسه‌ی راحت تر منحنی دررفت دو سازه‌ی مورد بحث در این تحقیق در یک شکل قرار گرفته است بنابراین مقادیر محور افقی در سمت چپ هر شکل باید در مقدار ۱- ضرب شوند همچنین برای معرفی سازه‌ی قاب خمشی فولادی از عبارت MRF و سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال از عبارت Pall استفاده شده است. بر اساس «شکل ۱۰» با افزایش فاصله‌ی محل انفجار از سازه مقادیر دررفت سازه همانند دوران مفاصل پلاستیک دچار کاهش می‌شود. همچنین افزایش وزن مواد منفجره باعث افزایش دررفت در طبقات مختلف سازه می‌شود. در «شکل ۱۰-الف» منحنی دررفت برای مقادیر ۱۰۰ کیلوگرم TNT نشان می‌دهد که سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال دارای مقادیر کمتری دررفت نسبت به سازه‌ی قاب خمشی ویژه می‌باشد. در واقع میراگر اصطکاکی پال با کنترل رفتار سازه توانسته است مقادیر دررفت را در سناریوهایی که در آن سازه دچار خسارت کلی نشده است کاهش دهد. این کاهش به طور محسوس در «شکل ۱۰-الف» نشان داده شده است. همچنین در سناریوهایی که در آن



(الف)



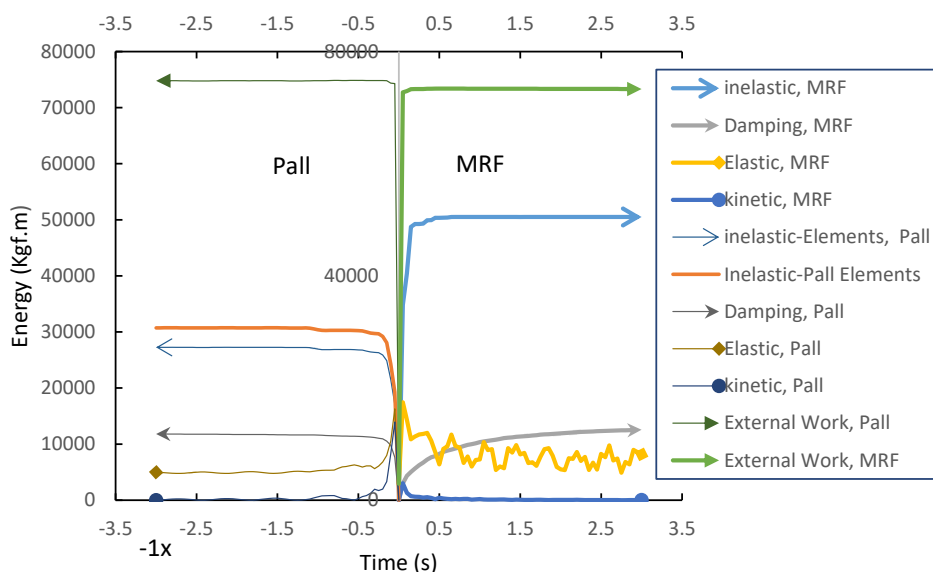
(ب)



(ج)

شکل ۱۰. منحني بیشینه دريفت طبقات تحت بار انفجار با وزن TNT الف ۱۰۰ (ب) ۵۰۰ (ج) ۱۰۰۰ كيلو

Fig. 10. Maximum drift curves of structures under blast loading with TNT weight of a) 100 kg b) 500 kg c) 1000 kg

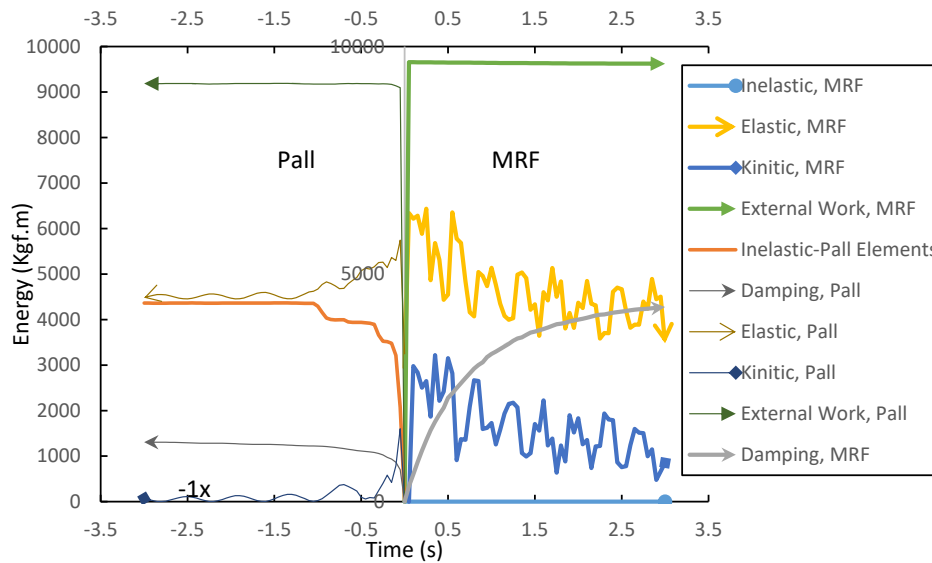


شکل ۱۱. منحنی انرژی در سازه‌ها در سناریوی ۱۰۰-۱

Fig. 11. Time histories of energy in structure under 100-1 blast loading

میرایی ذاتی سیستم مستهلک شده است. در واقع برای بالانس انرژی کار نیروی خارجی با انرژی‌های ذکر شده برابری می‌کند. در سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال انرژی کرنشی پلاستیک در سازه جزئی از انرژی‌های تلف شده در سیستم می‌باشد به دو دسته تقسیم می‌شود: انرژی کرنشی پلاستیک المان‌های سازه‌ی (تیر و ستون) و انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده توسط میراگرهای اصطکاکی پال. در سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال انرژی‌های تلف شده در سازه شامل انرژی کرنشی پلاستیک در المان‌ها و میراگر اصطکاکی پال و انرژی ناشی از میرایی ذاتی در سیستم می‌باشد. بر اساس «شکل ۱۱» کار خارجی انجام شده در دو سیستم تحت سناریوی ۱۰۰-۱ تقریباً یکسان می‌باشد. انرژی الاستیک در مبدا 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 ذخیره شده در سازه باقی می‌ماند. در سناریوی ۱۰۰-۱ در سازه‌ی قاب خمشی بخش زیادی از کار خارجی انجام شده به انرژی کرنشی پلاستیک در اعضا تبدیل شده است این در حالی است که در سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال انرژی تلف شده در میراگرها باعث شده است تا سایر اعضا انرژی کرنشی پلاستیک کمتری را تلف نمایند و خسارت کمتری را شامل شوند.

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 می‌باشد. 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 انرژی‌های مختلف و کار خارجی انجام شده در سازه تحت سناریوی ۱۰۰-۱ نشان داده شده است. بر اساس این منحنی در سازه‌ی قاب خمشی انرژی ورودی در سازه با استفاده از انرژی‌های کرنشی پلاستیک، انرژی کرنشی الاستیک، انرژی جنبشی و انرژی تلف شده توسط



شکل ۱۲. منحنی انرژی در سازه‌ها در سناریوی ۱۰۰-۵

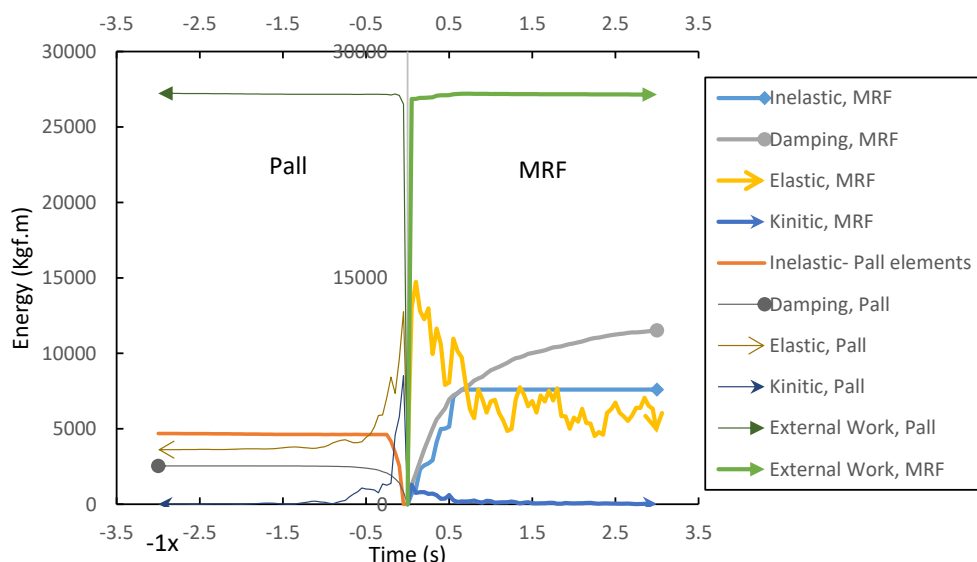
Fig. 12. Time histories of energy in structure under 100-5 blast loading

چنانکه در زمانی که انرژی الاستیک (پتانسیل) افزایش می‌یابد، انرژی جنبشی با کاهش روبه رو می‌شود. وجود میرایی ذاتی باعث می‌شود به مرور زمان انرژی جنبشی کاهش یابد تا سازه به سکون برسد. در «شکل ۱۳» منحنی انرژی مربوط به سناریوی ۵۰۰-۱۰ نشان داده شده است. در این سناریوی کار خارجی در سازه‌ی قاب خمشی توسط میرایی ذاتی و انرژی کرنشی پلاستیک مستهلک شده و توسط انرژی کرنشی الاستیک جذب شده است. در سازه‌ی دارای میراگر پال کل انرژی کرنشی پلاستیک توسط میراگر اصطکاکی پال مستهلک شده است اما انرژی کرنشی تلف شده توسط میراگر اصطکاکی کمتر از انرژی کرنشی تلف شده در سازه‌ی قاب خمشی است و همین موضوع باعث شده است انرژی‌های جنبشی در لحظات ابتدایی تحلیل سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی بیشتر از سازه‌ی قاب خمشی بشود.

در «شکل ۱۴» منحنی‌های انرژی برای دو سازه در سناریوی ۵۰۰-۲۰ نشان داده شده است. در این سناریوی در سازه‌ی قاب خمشی هیچ انرژی کرنشی پلاستیکی تقریباً تلف نشده است در حالی که در سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال بخشی از انرژی توسط میراگرهای اصطکاکی پال تلف شده است. انرژی تلف شده توسط میراگر اصطکاکی باعث شده است تا انرژی جنبشی در سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال کمتر از سازه‌ی قاب خمشی باشد. همچنین نقش میرایی ذاتی در سیستم دارای میراگر اصطکاکی پال در استهلاک انرژی کمتر از سازه‌ی دارای قاب خمشی باشد. در «شکل

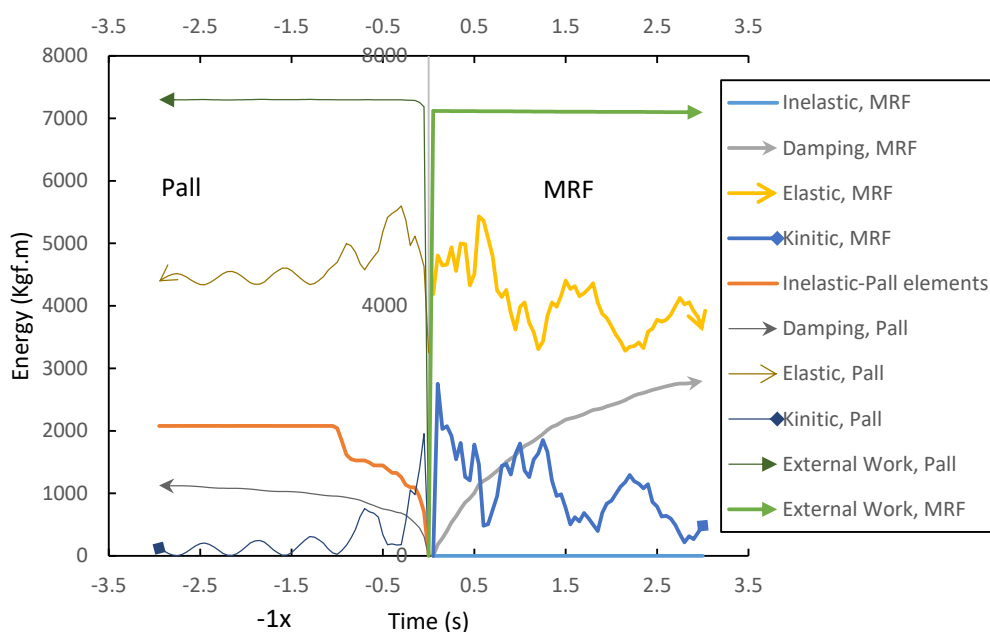
در «شکل ۱۲» منحنی انرژی‌های داخلی و کار خارجی انجام شده در سناریوی ۱۰۰-۵ نشان داده شده است. با مقایسه‌ی سناریوهای ۱۰۰-۱ و ۱۰۰-۵ مشاهده می‌شود کار انجام شده در سناریوی ۱۰۰-۱ بیشتر از سناریوی ۱۰۰-۵ می‌باشد. به علت کار خارجی انجام شده در سیستم‌های مورد نظر انرژی کرنشی پلاستیک در سناریوی ۱۰۰-۵ به مراتب کمتر از سناریوی ۱۰۰-۱ می‌باشد تا جایی که در سیستم قاب خمشی می‌توان در نظر گرفت که انرژی کرنشی تلف شده در سیستم بسیار ناچیز می‌باشد و بیشتر کار خارجی به انرژی جنبشی و کرنشی الاستیک تبدیل و بخشی هم توسط میرایی ذاتی سیستم تلف می‌شود. اما در سیستم دارای میراگر اصطکاکی پال بخشی از انرژی ورودی در سناریوی ۱۰۰-۵ توسط میراگر اصطکاکی تلف می‌شود. اتلاف بخشی از انرژی توسط میراگر اصطکاکی پال باعث می‌شود انرژی جنبشی در سازه‌ی دارای میراگر پال کمتر از سازه‌ی قاب خمشی باشد. همچنین وجود میراگر اصطکاکی پال و کاهش انرژی جنبشی باعث شده است میرایی ذاتی در سیستم نیز نقش کمتری را نسبت به میرایی ذاتی قاب خمشی بازی کند. در سناریوی ۱۰۰-۵ مقادیر کار خارجی انجام شده به علت کمتر بودن تغییر مکان‌ها مقداری کمتر از سازه‌ی دارای قاب خمشی می‌باشد.

پس از اعمال بار انفجار در این سناریو ایجاد بالانس در سازه‌ی بدون میراگر وابسته به انرژی جنبشی و انرژی کرنش الاستیک می‌باشد و در واقع مقادیر این دو در طی زمان با فازهای مخالف هم تغییر می‌نماید



شکل ۱۳. منحنی انرژی در سازه‌ها در سناریوی ۱۰-۵۰۰

Fig. 13. Time histories of energy in structure under 500-10 blast loading



شکل ۱۴. منحنی انرژی در سازه‌ها در سناریوی ۲۰-۵۰۰

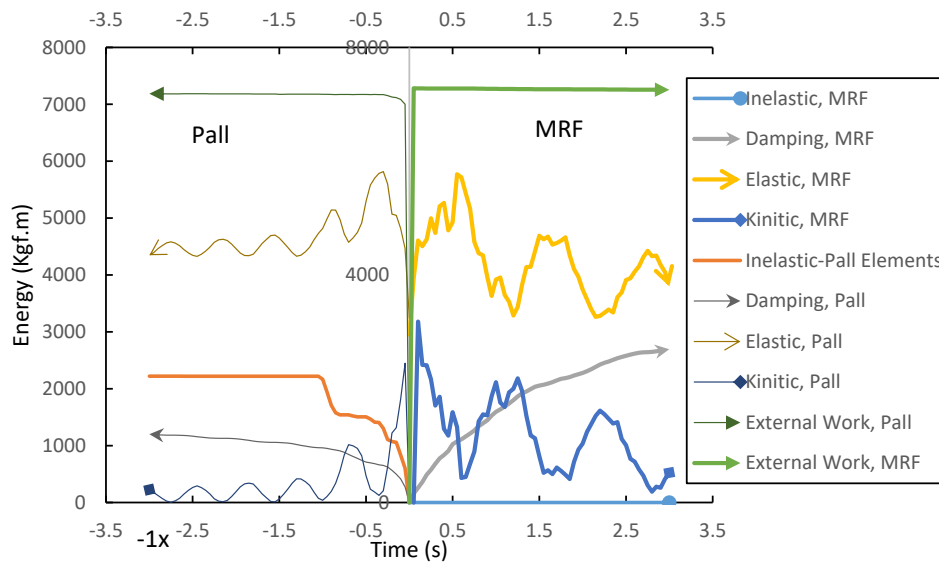
Fig. 14. Time histories of energy in structure under 500-20 blast loading

بالانس انرژی را نداشته است. در واقع مجموع ظرفیت سازه در انرژی کرنشی پلاستیک و الاستیک و میرایی ذاتی در سیستم آن قدری 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 می‌باشد و انرژی کرنش الاستیک

۱۵» کار خارجی و انرژی‌های سیستم برای دو سازه‌ی مورد نظر در سناریوی ۱۰۰۰-۳۰ نشان داده شده است.

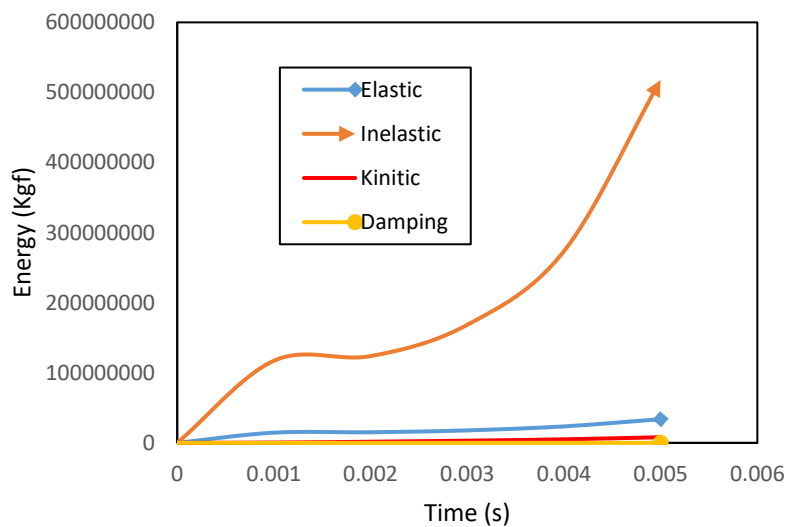
در «شکل ۱۶» منحنی تاریخچه زمانی انرژی برای سازه‌ی قاب خمشی در سناریوی ۱۰۰۰-۱ نشان داده شده است. در این سناریو انرژی ورودی در سازه به قدری زیاد بوده است که سازه ظرفیت ایجاد





شکل ۱۵. منحنی انرژی در سازه‌ها در سناریوی ۱۰۰۰-۳۰

Fig. 15. Time histories of energy in structure under 1000-30 blast loading



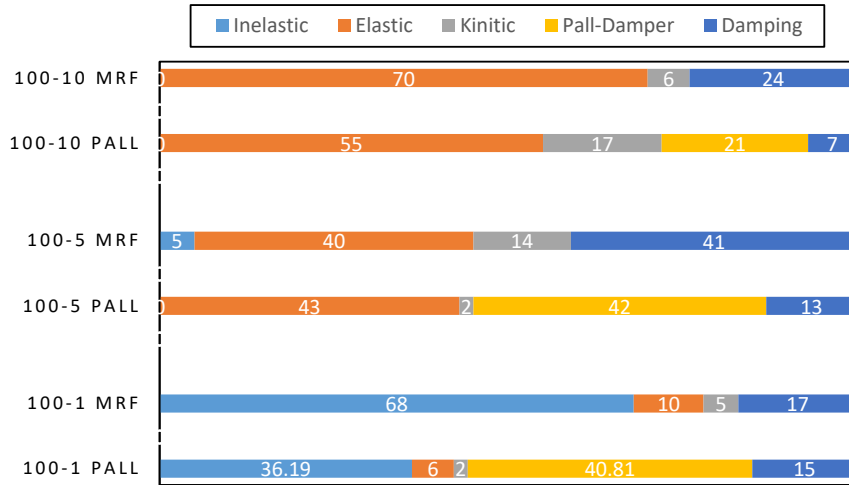
شکل ۱۶. منحنی انرژی در سازه‌ی قاب خمشی در سناریوی ۱۰۰۰-۱

Fig. 16. Time histories of energy in structure under 1000-1 blast loading

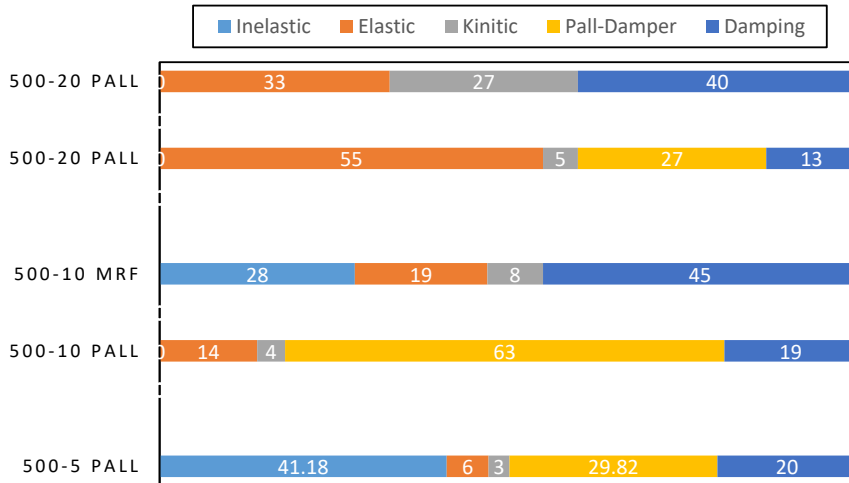
شده بهتر است سهم انرژی‌های مختلف تلف شده و ذخیره شده در سازه‌ها تعیین شود. در «شکل ۱۷» درصد انرژی‌های مختلف ذخیره شده و تلف شده در سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی پال و سازه‌ی قاب خمشی نشان داده شده است.

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 میراگر اصطکاکی پال مقدار انرژی کرنشی تلف شده توسط المان‌های تیر و ستون کمتر از سازه‌ی قاب خمشی

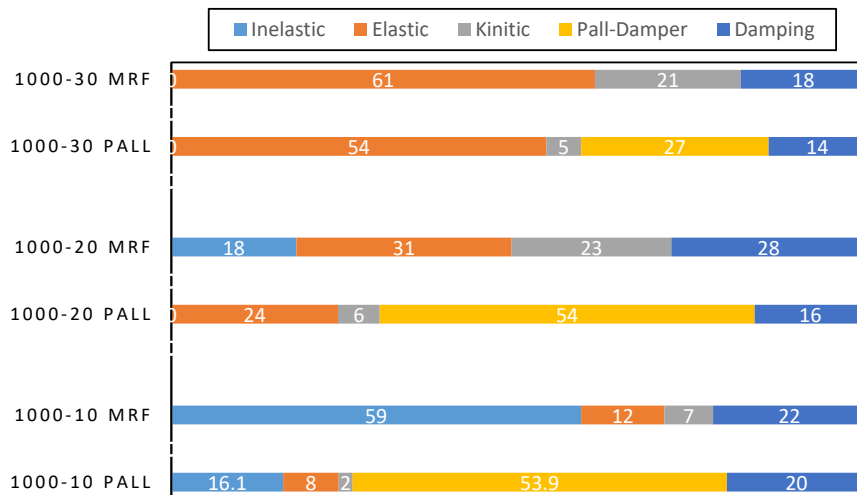
سهم بسیار کمی در جذب و ایجاد بالانس انرژی دارد. در این سناریوی در لحظه‌ای که انرژی کرنشی پلاستیک به حداکثر مقدار خود می‌رسد و در مدت کوتاهی این مقدار به شدت افزایش می‌یابد خرابی کلی در سیستم حاصل می‌شود. بنابراین در سناریوهای ۱۰۰۰-۱، ۱۰۰۰-۵، ۵۰۰-۱ که سازه دچار خرابی کلی می‌شود در واقع ظرفیت سازه برای ایجاد بالانس انرژی بین کار خارجی و کار داخلی وجود ندارد و با رسیدن به ظرفیت انرژی نهایی، سازه دچار خرابی کلی می‌شود. برای درک بهتر از ایجاد بالانس انرژی در سناریوهای انفجار عنوان



(الف)

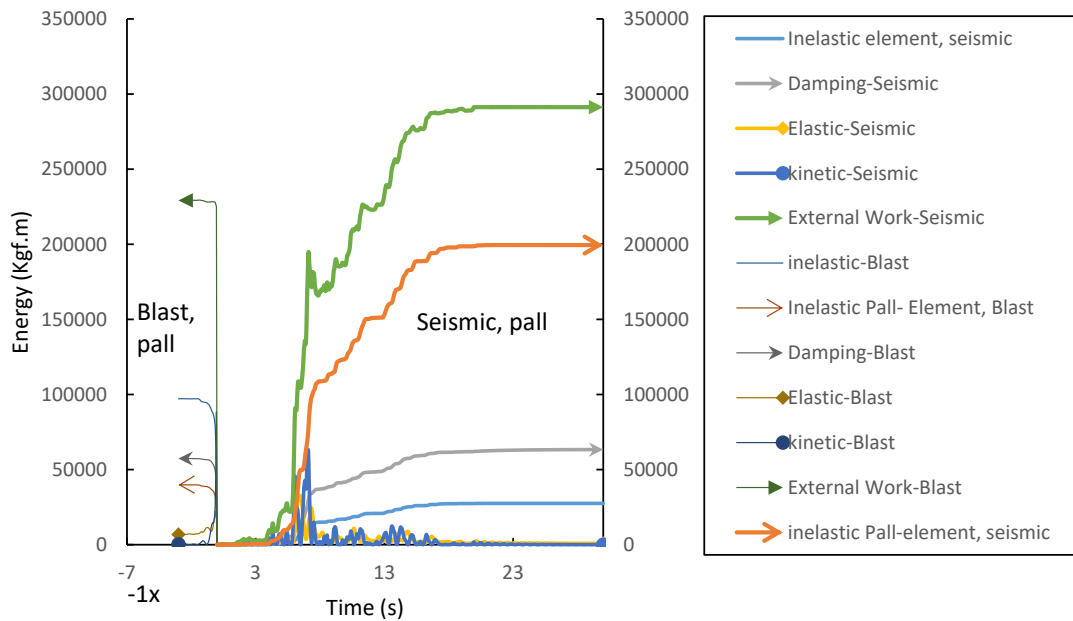


(ب)



(ج)

شکل ۱۷. درصد انرژی‌های جذب شده و تلف شده در سازه تحت انفجار الف) ۱۰۰ kg TNT (ب) ۵۰۰ (ج) ۱۰۰۰  
 Fig. 17. Percent of absorb and dissipated energy on structures under TNT weight of a) 100kg b) 500 kg c) 1000kg



شکل ۱۸. منحنی انرژی در دو سناریوی زلزله و انفجار ۵۰۰-۵

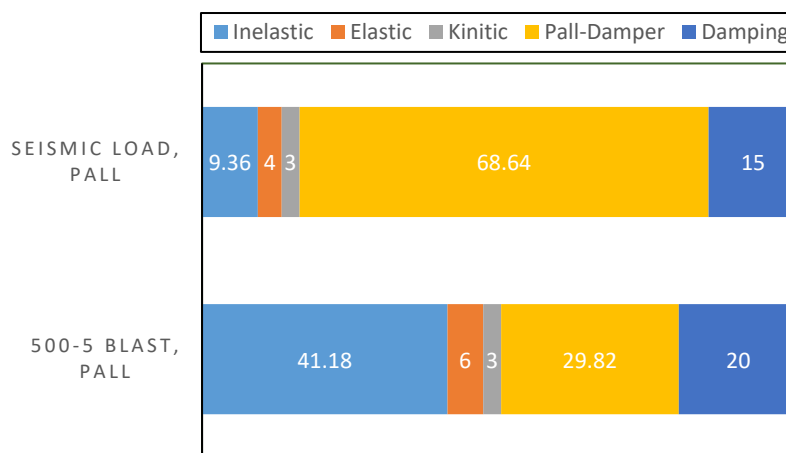
Fig. 18. Time history curve of energies in structures under earthquake and blast loading (blast load for scenario of 500-5)

انرژی کرنشی الاستیک در بالانس انرژی در سازه‌های داری میراگر اصطکاکی پال و قاب خمشی به ترتیب برابر ۵۴ و ۶۱٪ می‌باشد.

#### ۳-۴ مقایسه‌ی جریان انرژی در سناریوی انفجار و زلزله

یکی از تفاوت‌های بار لرزه‌ای و بار انفجار مربوط به انرژی ورودی می‌باشد. 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 ارزیابی تفاوت‌های رفتاری سازه تحت بار انفجار و زلزله، سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال در معرض بار لرزه‌ای قرار گرفته است. برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی برای بار زلزله، سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال در معرض زلزله‌ی لوما که مشخصات آن در جدول ۲ آمده است قرار گرفته است. در «شکل ۱۸» منحنی تاریخچه زمانی انرژی سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی تحت دو بار لرزه‌ای و بار انفجار (سناریوی ۵۰۰-۵) نشان داده شده است. بر اساس این شکل مقادیر کار خارجی انجام شده در سازه در سناریوی زلزله در مدت طولانی تری نسبت به بار انفجار وارد شده است. مقایسه‌ی این دو سناریو نشان می‌دهد مقدار کار خارجی انجام شده در سناریوی زلزله بیشتر از سناریوی انفجار بوده و متناسب با آن مقادیر انرژی تلف

می‌باشد. 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 میراگر اصطکاکی پال باعث کم شدن سهم سایر اعضا در استهلاک انرژی ورودی می‌شود، درواقع اعضای داخلی مجبورند کار کمتری را برای مقابله با کار خارجی مصرف نمایند. به طور مثال در سناریوی ۵۰۰-۱۰ در «شکل ۱۷-ب» درصد انرژی کرنشی پلاستیک در تیر و ستون برابر ۲۸٪ می‌باشد در حالی که در سازه‌ی دارای میراگر اصطکاکی پال این انرژی در تیر و ستون‌ها برابر ۰ و در میراگر اصطکاکی برابر ۶۳٪ می‌باشد. درواقع در این سناریو میراگر اصطکاکی پال بیشترین سهم را در استهلاک انرژی داشته است. این روند در سناریوهای ۱۰۰۰-۱۰ و ۱۰۰۰-۲۰ نیز قابل مشاهده است اما با افزایش فاصله و کم شدن بار انفجار سهم انرژی کرنشی الاستیک در بالانس انرژی بیشتر از سایر انرژی‌ها می‌باشد درواقع ظرفیت انرژی الاستیک در این سناریو به قدری است که برای بالانس انرژی کفایت می‌کند. در سناریوی ۱۰۰۰-۳۰ سهم



شکل ۱۹. درصد انرژی‌های جذب شده و تلف شده در سازه تحت بار انفجار و لرزه‌ای

Fig. 19. Percent of absorb and dissipated energy on structures under blast and earthquake loading

پلاستیک به عنوان معیار عملکرد در نظر گرفته شود مشخص می شود در بار انفجار کم عملکرد دو سازه مورد نظر تحقیق شبیه به هم است. در بار انفجار زیاد وجود میراگر اصطکاکی پال باعث کاهش تعداد دوران مفاصل پلاستیک شده است اما در بار انفجار خیلی زیاد هر دو سازه مورد نظر تحقیق دچار خرابی کلی شده اند. این روند در حالتی که دریافت به عنوان معیار عملکرد در نظر گرفته شود نیز صادق است. سازه ای که دارای میراگر اصطکاکی پال است در بارهای انفجار کم و زیاد دارای مقادیر کمتری از دریافت است. بررسی نتایج بالانس انرژی و سهم انرژی کرنشی پلاستیک در المان های سازه ای نشان می دهد همواره در سازه ای که دارای میراگر اصطکاکی پال است میزان انرژی کرنشی پلاستیک کمتر از سازه ی بدون میراگر اصطکاکی پال است و اتلاف انرژی در این میراگر باعث شده است سهم سایر المان ها از اتلاف انرژی کاهش یابد و بالانس انرژی با اتلاف کمتر انرژی کرنشی پلاستیک توسط المان های تیر و ستون حاصل شود. در بارهای انفجار با شدت خیلی زیاد که منجر به خرابی کلی سازه می شود مجموع انرژی های داخلی سازه نمی تواند با انرژی ورودی برابری کند. در این حالت مقدار انرژی کرنشی پلاستیک در المان های سازه ای بسیار زیاد است. همچنین بررسی انرژی تلف شده در میراگر پال نشان داده است میزان انرژی تلف شده در بار لرزه ای بسیار بیشتر از بار انفجار است و عملکرد این المان در بارهای لرزه ای بهتر از بار انفجار است اگرچه که استفاده از این المان در بار انفجار توانسته است میزان خسارت وارده به سایر اعضا را کاهش دهد.

شده و ذخیره شده در سازه نیز بیشتر می باشد. در «شکل ۱۹» سهم انرژی‌های داخلی در مقابل کار خارجی انجام شده در دو سناریوی بار لرزه‌ای و انفجار (۵-۵۰۰) نشان داده شده است. بر اساس این شکل در این دو سناریو میراگر اصطکاکی پال نقش بیشتری در اتلاف انرژی در زلزله نسبت به سناریوی بارگذاری انفجار (۵-۵۰۰) داشته است همچنین سهم انرژی کنشی پلاستیک در سناریوی ۵-۵۰۰ بیشتر از بارگذاری زلزله بوده است. البته ذکر این نکته ضروری است که مؤلفه‌های ورودی و مشخصات بارگذاری لرزه‌ای مانند فاصله از گسل، بیشترین شتاب، زمان تداوم، پیرو قالب و ... و همچنین وزن بار انفجار، فاصله‌ی انفجار و روابط محاسبه‌ی بار انفجار و ... تاثیرات فراوانی در سهم انرژی‌های مختلف در این زمینه دارند.

## نتایج

در این تحقیق سعی شده است با استفاده از مفاهیم بالانس انرژی رفتار سازه‌های فولادی دارای میراگر اصطکاکی پال تحت سناریوهای مختلف انفجار بررسی شود. برای این منظور دو سازه‌ی فولادی با سیستم قاب خمشی برای ۱۰۰ و ۷۵٪ بار جانبی طرح، طراحی گردید. سازه‌ای که برای ۷۵٪ بار جانبی طراحی شده به میراگر اصطکاکی پال مجهز شد. سازه‌ها پس از طراحی و مدل‌سازی غیرخطی تحت ۱۲ سناریوی مختلف انفجار بارگذاری و تحلیل شدند. در ابتدا عملکرد سازه‌ها با استفاده از دوران مفاصل پلاستیک و مقادیر بیشینه دریافت طبقات با هم مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهد اگر مقادیر دوران

## قدردانی

این تحقیق تحت حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با شماره گرنت BUT/۳۸۸۰۱۱/۹۸ قرار گرفت.

## مراجع

- Engineering Structures, 27(8) (2005) 1258-1267.
- [9] M. Dicleli, A. Mehta, Effect of near-fault ground motion and damper characteristics on the seismic performance of chevron braced steel frames, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 36(7) (2007) 927-948.
- [10] S. Szyniszewski, T. Krauthammer, Energy flow in progressive collapse of steel framed buildings, *Engineering Structures*, 42 (2012) 142-153.
- [11] S. Guruprasad, A. Mukherjee, Layered sacrificial claddings under blast loading Part I—analytical studies, *International Journal of Impact Engineering*, 24(9) (2000) 957-973.
- [12] M. Loizeaux, A.E. Osborn, Progressive Collapse—An Implosion Contractor's Stock in Trade, *Journal of performance of constructed facilities*, 20(4) (2006) 391-402.
- [13] Y. Ding, X. Song, H.-T. Zhu, Probabilistic progressive collapse analysis of steel frame structures against blast loads, *Engineering Structures*, 147 (2017) 679-691.
- [14] F. Zhang, C. Wu, X.-L. Zhao, A. Heidarpour, Z. Li, Experimental and numerical study of blast resistance of square CFST columns with steel-fibre reinforced concrete, *Engineering Structures*, 149 (2017) 50-63.
- [15] S. Hashemi, M. Bradford, H. Valipour, Dynamic response and performance of cable-stayed bridges under blast load: Effects of pylon geometry, *Engineering Structures*, 137 (2017) 50-66.
- [16] J. Li, H. Hao, C. Wu, Numerical study of precast segmental column under blast loads, *Engineering Structures*, 134 (2017) 125-137.
- [17] T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, J. Ramsay, Blast loading and blast effects on structures—an overview, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 7(S1) (2007) 76-91.
- [1] H. Tavakoli, M.M. Afrapoli, Robustness analysis of steel structures with various lateral load resisting systems under the seismic progressive collapse, *Engineering Failure Analysis*, 83 (2018) 88-101.
- [2] H. Tavakoli, F. Kiakojouri, Influence of sudden column loss on dynamic response of steel moment frames under blast loading, (2013).
- [3] H. Tavakoli, F. Kiakojouri, Progressive collapse of framed structures:: Suggestions for robustness assessment, *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, 21(2) (2014) 329.
- [4] H. Tavakoli, A.R. Alashti, Evaluation of progressive collapse potential of multi-story moment resisting steel frame buildings under lateral loading, *Scientia Iranica*, 20(1) (2013) 77-86.
- [5] H.R. Tavakoli, F. Naghavi, A.R. Goltabar, Effect of base isolation systems on increasing the resistance of structures subjected to progressive collapse, *Earthq. Struct*, 9(3) (2015) 639-656.
- [6] N. Fallah, S. Honarparast, NSGA-II based multi-objective optimization in design of Pall friction dampers, *Journal of Constructional Steel Research*, 89 (2013) 75-85.
- [7] F. Taiyari, F.M. Mazzolani, S. Bagheri, Damage-based optimal design of friction dampers in multistory chevron braced steel frames, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119 (2019) 11-20.
- [8] B. Wu, J. Zhang, M. Williams, J. Ou, Hysteretic behavior of improved Pall-typed frictional dampers,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Moradi, H.R. Tavakoli, *Energy Balance on Steel Structure with Pall Damper under Blast Loading*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(10) (2021) 2415-2434.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16340.6192](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16340.6192)

