

مقایسه عملکردی سیستم‌های کنترل غیر فعال برای سازه‌های فولادی تحت بارگذاری انفجار خارجی

علی جلالی فر^{۱*}، امین واعظزاده^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران

۲- کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

*a.jalaeefar@iau-tnb.ac.ir، ۱۶۵۱۱۵۳۵۱۱، صندوق پستی تهران

چکیده

ساختمان‌ها همواره در معرض بلایای طبیعی مانند سیل، طوفان و زلزله قرار داشته‌اند؛ اما با پیشرفت دانش نظامی در دهه‌های اخیر علاوه بر موارد فوق، خطرات ناشی از بمب‌گذاری و انفجار نیز ساختمان‌ها را تهدید می‌کند. ساختمان‌های فولادی که بر اساس آیین‌نامه‌ها برای تحمل بارهای متداول طراحی می‌شوند معمولاً سبک هستند و توانایی مقاومت در برابر بار انفجار را ندارند. در دهه‌های اخیر استفاده از سیستم‌های کنترل برای مهار انرژی ناشی از زلزله و کاهش خرابی گسترش پیدا کرده است. سیستم‌های کنترل با جذب انرژی یا ممانعت از ورود آن به سازه، باعث می‌شوند تا میزان آسیب‌دیدگی سازه کاهش پیدا کند. در این پژوهش به بررسی عملکرد سیستم‌های کنترل غیرفعال شامل میراگر ویسکوز، مهاربند کمانش‌تاب و میراگر اصطکاکی در بهبود پاسخ سازه (میزان جابه‌جایی طبقات، شکل‌پذیری و سختی) تحت بارگذاری انفجاری خارجی پرداخته شده است. در این راستا، یک ساختمان فولادی شش طبقه تحت بارگذاری‌های ناشی از انفجار خارجی قرار می‌گیرد و با استفاده از ابزار کنترل غیرفعال شامل میراگر ویسکوز، مهاربند کمانش‌تاب و میراگر اصطکاکی، مقدار دررفت نسبی طبقات در سازه کاهش پیدا می‌کند. برای تعیین بهینه مشخصات ابزار کنترل غیرفعال نیز از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. مطالعات انجام‌شده نشان داد استفاده از میراگرها تغییری در حداکثر جابه‌جایی بام سازه ایجاد نمی‌کند اما موجب توزیع یکنواخت جابه‌جایی بین طبقات می‌شود و از تمرکز جابه‌جایی در طبقات جلوگیری به عمل می‌آید؛ لذا مقدار دررفت ماکزیمم کاهش می‌یابد. از طرف دیگر مشخص شد که میراگر ویسکوز بهترین عملکرد را بین سیستم‌های کنترلی غیرفعال تحت بارگذاری انفجار دارد و باعث می‌شود دررفت ماکزیمم و شکل‌پذیری مورد نیاز سازه کاهش پیدا کند. مهاربندهای کمانش‌تاب و میراگرهای اصطکاکی نیز عملکرد مطلوبی دارند اما باعث سخت شدن سازه می‌گردند.

واژگان کلیدی

بارگذاری انفجار، کنترل غیرفعال، تحلیل غیرخطی، رفتار حساس به نرخ کرنش، الگوریتم ژنتیک، دررفت ماکزیمم

Comparative Performance Evaluation of Passive Control Systems for Steel Structures under External Blast Loading

A. Jalaeefar, A. Vaezzadeh

Abstract

Buildings have always been vulnerable to natural disasters such as floods, storms, and earthquakes. However, with advances in military technology in recent decades, in addition to these traditional threats, buildings are increasingly exposed to risks associated with bombings and explosions. Steel structures, typically designed according to conventional codes to withstand standard loads, are generally lightweight and lack the capacity to resist blast loads. In recent decades, the use of structural control systems to dissipate seismic energy and reduce damage has become increasingly prevalent. These control systems function by either absorbing the energy or preventing it from entering the structure, thereby mitigating the extent of structural damage. This study investigates the effectiveness of passive control systems—including viscous dampers, buckling-restrained braces (BRBs), and friction dampers—in improving the structural response under external blast loading. The results indicate that while the implementation of dampers does not significantly alter the peak roof displacement, it leads to a more uniform distribution of displacement across the stories, preventing excessive inter-story drift concentrations and thereby reducing the maximum drift ratio. Among the systems evaluated, viscous dampers demonstrated the most effective performance under blast loading by significantly reducing both the maximum drift and the ductility demand on the structure. Although BRBs and friction dampers also improved structural performance, they contributed to increased structural stiffness.

Keywords

Blast Loading, Passive Control, Nonlinear Analysis, Strain Rate-Sensitive Behavior, Genetic Algorithm, Maximum Drift

۱- مقدمه

ساختمان‌ها همواره در معرض بلایای طبیعی مانند سیل، طوفان و زلزله قرار داشته‌اند، اما با پیشرفت دانش نظامی در دهه‌های اخیر علاوه بر موارد فوق، خطرات ناشی از بمب‌گذاری و انفجار نیز ساختمان‌ها را تهدید می‌نماید. ساختمان‌های فولادی که بر اساس آیین‌نامه‌ها برای تحمل بارهای لرزه‌ای و متداول طراحی می‌شوند و به‌خصوص آن‌هایی که سبک‌تر هستند، توانایی مقاومت و حفظ یکپارچگی در برابر بار انفجار را ندارند و وارد ناحیه غیرخطی می‌شوند [۱]. برای اطمینان از امنیت این سازه‌ها باید آن‌ها را در سطح بالایی از مقاومت که برای تهدیدهای پیش‌بینی شده کافی باشند، ساخت که نیل به این هدف نیازمند طراحی مناسب و دستیابی به تکنیک لازم برای تأمین مقاومت لازم در برابر انفجار است. اطلاعات و جزئیات مربوط به آزمایش‌های اعضای فولادی تحت اثر انفجار بسیار محدود و کمیاب است که علت آن در درجه اول حفاظت اطلاعات و مسائل امنیتی است و در درجه دوم انجام آزمایش‌ها و ثبت نتایج به‌وسیله حسگرها با توجه به ماهیت تخریب‌کننده پدیده انفجار، بسیار مشکل است [۲].

منیر در سال ۲۰۱۳، به بررسی و طراحی یک میراگر مرکزگرا برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های فولادی نرم در برابر انفجار پرداخت [۳]. این میراگر علاوه بر دارا بودن توانایی جذب انرژی، طوری طراحی شده بود که در زمان جابه‌جایی قاب از مکان اولیه خود، میراگر در برابر این جابه‌جایی مقاومت می‌کند ولی اگر جابه‌جایی قاب در جهت نزدیک‌شدن به محل اولیه خود باشد، میراگر از خود مقاومتی نشان نمی‌دهد و این‌گونه به بازگشت سازه به مکان اولیه و کاهش رانش‌های پسماند کمک می‌نماید.

محبی و دادخواه در سال ۲۰۱۷، عملکرد یک سیستم کنترل ترکیبی شامل جداساز پایه با میرایی کم و میراگر نیمه‌فعال تحت انفجار خارجی را بررسی کردند [۴]. برای تعیین ولتاژ میراگر از دو الگوریتم استفاده شده و نتایج نشان می‌دهد که این سیستم در کاهش پاسخ‌های حداکثری و دریفت پایه، بسیار مؤثر است. همچنین، سیستم ترکیبی نیمه‌فعال نسبت به سیستم‌های جداساز با میرایی بالا عملکرد بهتری در کاهش دریفت پایه دارد.

کانگدا^۱ و بکره^۲ در سال ۲۰۲۰، به بررسی کارایی روش‌های کنترل غیرفعال مانند سیستم جداسازی پایه و میراگرهای ویسکوز در برابر ارتعاشات ناشی از زلزله و انفجار پرداختند [۵]. در این راستا، دو ساختمان فولادی با قاب خمشی تحت تحلیل قرار

گرفته‌اند و تأثیر بی‌نظمی عمودی بر عملکرد این تکنیک‌ها نیز بررسی شده است. پاسخ‌های سازه‌ای و میزان انرژی مستهلک‌شده توسط این تکنیک‌ها ارزیابی شده و مقایسه‌ای میان آن‌ها تحت تحریکات زلزله و انفجار صورت گرفته است. آن‌ها همچنین در سال ۲۰۲۱، طی مطالعه‌ای کنترل غیرفعال لرزش در ساختمان‌های مجاور با فاصله کم و پایه ثابت، تحت بارهای زلزله و انفجار را بررسی نمودند [۶]. دو ساختمان با ویژگی‌های دینامیکی متفاوت با استفاده از میراگرهای ویسکوز خطی و غیرخطی به هم متصل شده‌اند و عملکرد آن‌ها در کاهش پاسخ‌های سازه‌ای مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از میراگر ویسکوز به‌ویژه در بالاترین طبقه، می‌تواند به‌طور مؤثری پاسخ‌های سازه‌ای را کاهش دهد.

رمضانی و لبافزاده در سال ۲۰۲۲، از یک سیستم فازی نوع ۲ برای کنترل ولتاژ میراگر مغناطیسی در سازه جداسازی شده تحت بار انفجاری استفاده نمودند تا عملکرد مناسبی در برابر عدم قطعیت‌ها داشته باشد [۷]. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که ترکیب میراگر با جداساز لرزه‌ای می‌تواند تغییر مکان و آسیب‌ها را به‌طور مؤثری کاهش دهد. این روش به‌طور میانگین باعث کاهش ۳۶٪ جابه‌جایی در بار انفجاری، ۶۸٪ در زلزله‌های دور و ۴۶٪ در زلزله‌های نزدیک می‌شود.

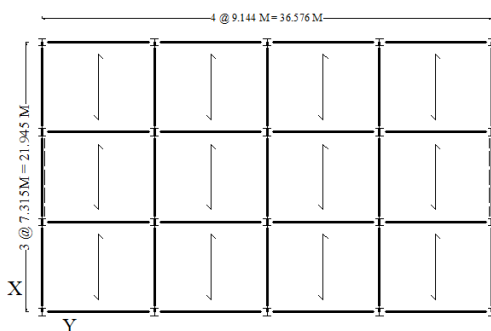
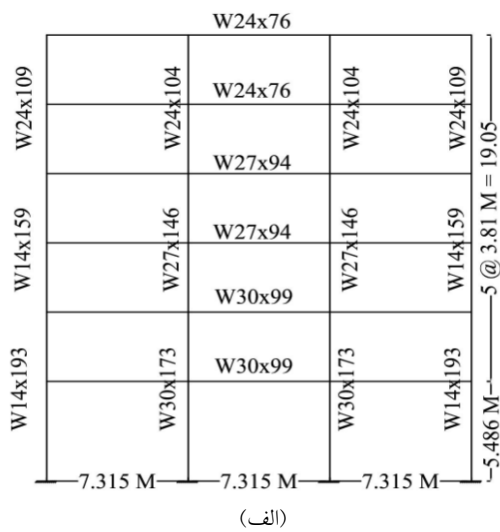
کانگدا و همکاران در سال ۲۰۲۳، عملکرد ساختمان‌های بتن مسلح با بی‌نظمی در پلان تحت اثر انفجارهای زیرزمینی را بررسی نمودند [۸]. ساختمان‌هایی با شکل‌های مختلف پلان و سیستم‌های کنترلی میراگر ویسکوز در برابر بار انفجار مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ساختمان‌های نامنظم نسبت به ساختمان‌های منظم عملکرد بهتری دارند و استفاده از میراگرها، به‌ویژه در الگوهای مختلف نصب، موجب بهبود قابل‌توجه در پاسخ سازه‌ای می‌شود.

با پیشرفت دانش مهندسی سازه و زلزله، در چند دهه اخیر استفاده از ابزار آلات کنترلی فعال و غیرفعال در ساختمان‌ها برای کاهش خرابی ناشی از زلزله گسترش پیدا کرده است. ابزارآلات کنترلی به‌وسیله جذب انرژی یا ممانعت از ورود آن به سازه، میزان خرابی را در زلزله کاهش می‌دهند و عملکرد خوبی تحت بارهای لرزه‌ای دارند. با توجه به عملکرد مطلوب میراگرها تحت بارهای لرزه‌ای، در این مقاله به بررسی و تحقیق در مورد عملکرد سیستم‌های کنترل غیرفعال تحت بارگذاری انفجار پرداخته شده است. برای این منظور یک ساختمان فولادی شش طبقه تحت

¹ Kangda

² Bakre

روی پلان با نقطه چین مشخص شده است. میرایی ذاتی رایلی مدل در مد اول و دوم ۲/۵٪ فرض شده است.



(ب)

شکل ۱- الف) مقطع ارتفاعی ساختمان، ب) پلان ساختمان به همراه موقعیت انفجار نسبت به سازه

سازه مورد بررسی دارای سیستم باربر قاب خمشی است که مقاومت لازم را در برابر بار انفجار ندارد. برای تقویت سازه از سیستم‌های مختلف کنترل غیرفعال استفاده شده است. لذا از سیستم‌های میراگر ویسکوز، مهاربند کمناش تاب و میراگر اصطکاکی به‌طور مجزا برای تقویت سازه استفاده شد.

۳- معرفی مدل‌های کنترل‌شده

مدل‌های کنترل‌شده شامل سه مدل هستند. این سازه‌ها همگی مشابه سازه اولیه بوده، با این تفاوت که در دو محور باربر

بارگذاری‌های ناشی از انفجار خارجی قرار گرفته است و سعی شده تا با استفاده از ابزار کنترل غیرفعال مقدار دررفت نسبی طبقات در سازه کاهش پیدا کند. هدف از انجام این پژوهش بررسی و مقایسه عملکرد ابزار کنترل غیرفعال در بهبود پاسخ سازه (جابه‌جایی نسبی طبقات سازه) تحت انفجار می باشد. ابزار کنترلی استفاده شده عبارتند از: میراگر ویسکوز، مهاربند کمناش تاب و میراگر اصطکاکی. در این مقاله نشان داده شده است که استفاده از میراگرها اگرچه نمی‌تواند تغییری در جابه‌جایی مطلق بام به وجود آورد، اما به‌واسطه کاهش جابه‌جایی‌های نسبی و جلوگیری از تمرکز جابه‌جایی در یک طبقه یا به عبارتی توزیع یکنواخت‌تر جابه‌جایی بین طبقات، باعث می‌شود که خرابی در سازه کاهش پیدا کند. در نهایت با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که میراگرهای ویسکوز عملکرد بهتری را در برابر بارگذاری انفجار خارجی نسبت به سایر میراگرهای غیرفعال دارند و موجب می‌شوند مقدار دررفت نسبی طبقات کاهش پیدا کند و همچنین توزیع جابه‌جایی بین طبقات یکنواخت شود.

۲- مدل‌سازی

در این پژوهش برای بررسی و مقایسه عملکرد سیستم‌های مختلف کنترل غیرفعال و تأثیر آن‌ها بر بهبود عملکرد سازه تحت بار انفجار، از یک ساختمان شش طبقه با سیستم باربر جانبی قاب خمشی مطابق شکل (۱) استفاده شده است. این سازه اولین بار در سال ۱۹۸۸ توسط پوپوف^۱ و تسای^۲ مورد مطالعه قرار گرفت [۹]. سازه بر اساس آیین‌نامه UBC برای تحمل زلزله سطح طرح و بارهای ثقلی و بار باد طراحی شده است [۱۰]. فرض شده است که ساختمان در منطقه چهار لرزه‌خیزی قرار دارد و خاک نوع III است. نوع فولاد استفاده شده برای تمامی اعضا A36 می‌باشد. سازه به‌طور کامل روی سطح زمین واقع شده است و فرض می‌شود دیوارهای پیرامونی سازه صلب (به این معنا که سختی این دیوارها بسیار بیش‌تر از قاب مجاور آن‌ها است) و بدون باز شو هستند، سازه دارای دیافراگم‌های صلب است و به جهت تقارن به‌صورت دوبعدی مدل می‌شود. ساختمان در راستای انفجار در دو محور جانبی دارای سیستم باربر قاب خمشی بوده و در سایر موارد اتصالات تیر به ستون مفصلی است که در شکل (۱) مقطع ارتفاعی و پلان و محل انفجار به همراه مشخصات مقاطع تیر و ستون نشان داده شده است. محل قرارگیری میراگرها در مدل‌های کنترل‌شده

¹ Popof

² Tsai



ساختمان، سیستم های کنترل غیرفعال استفاده شده است که شامل میراگر ویسکوز، اصطکاکی یا مهاربند کمانش تاب است.

۳-۱- بارگذاری انفجار

فرض شده است که وزن ۲۰۰۰۰ پوند TNT (W) در راستای عمود بر طول ساختمان (محور Y) مطابق شکل (۱-ب) منفجر می شود. این انفجارها مطابق جدول (۱) در فواصل مختلف از ۱۲۰ تا ۲۵۰ فوت (RG) و با شدت های انفجار متفاوت (ZG) رخ داده است که محاسبات مربوط به بارگذاری آن بر اساس آیین نامه UFC انجام شده است. فرض شده که انفجار در سطح زمین صورت گرفته است و از اثرات شوک زمین ناشی از انفجار صرف نظر شده است. شایان ذکر است پارامتر فاصله مقیاس شده در بار انفجار، که با نماد (Z) نشان داده می شود، یک مقدار عددی است که برای تحلیل اثرات انفجار بر سازه ها به کار می رود. این پارامتر از رابطه زیر محاسبه می شود:

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

که در آن (R) فاصله مواد منفجره از نقطه مورد نظر و (W) مقدار ماده منفجره می باشد. این پارامتر کمک می کند تا شدت موج انفجار را در نقاط مختلف ارزیابی کنند و تأثیر آن را بر سازه ها بررسی نمایند. هرچه مقدار (Z) بیش تر باشد، اثر انفجار در آن نقطه کم تر خواهد بود، زیرا فاصله از منبع انفجار بیش تر است. انفجار در سطح زمین باعث وارد شدن بار به دیوار جلویی، پشتی و دیوارهای کناری و همچنین سقف سازه می شود. با توجه به این که مدل دارای تقارن است و محل وقوع انفجار نیز نسبت به سازه دارای تقارن می باشد، نیروهای وارد شده به دو دیوار کناری دقیقاً برابر یکدیگر و در جهت عکس خواهند بود. لذا با توجه به صلب بودن پوشش ساختمان و دیافراگم طبقات، می توان از اثر نیروی وارد بر دیوارهای کناری سازه صرف نظر نمود. از تأثیر نیروی حاصل از انفجار بر روی سقف نیز به علت تأثیر کم آن چشم پوشی شده است. در نهایت تنها نیروهایی که نقش تعیین کننده دارند نیروی حاصل از انفجار بر روی دیوار جلویی و پشتی می باشد.

جدول ۱- مشخصات انفجار

(ft) R _G	W (lb)	Z _G ($\frac{ft}{lb^{1/3}}$)
۲۵۰	۲۰۰۰۰	۸.۶۷
۲۲۰	۲۰۰۰۰	۷.۶۳
۱۸۰	۲۰۰۰۰	۶.۲۴
۱۵۰	۲۰۰۰۰	۵.۲۰
۱۲۰	۲۰۰۰۰	۴.۱۶

۳-۲- تأثیر نرخ کرنش بر رفتار اعضای فولادی تحت

بارگذاری انفجار

یکی از نکات مهم و کلیدی در مورد بارگذاری انفجار، نرخ کرنش های بالایی است که در سازه به وجود می آید. نرخ کرنش بالا در اعضای فولادی به خصوص فولاد A36، باعث می شود تا مقدار تنش تسلیم افزایش پیدا کند، اما تأثیری بر روی مدول الاستیسیته و در نتیجه سختی سازه ندارد. در این پژوهش برای لحاظ نمودن این پدیده، از ضریب افزایش دینامیکی طبق آیین نامه UFC استفاده شده است [۵] که اساس آن ضریب افزایش دینامیکی تحت رابطه سایمونندز-کوپر می باشد [۶]:

$$f_{ds} = f_{dy} = c \times a \times f_y \quad 10\mu \leq \quad (2)$$

$$4f_{ds} + (f_{du} - f_{dy}) \quad 10\mu >$$

که در آن (μ) نسبت شکل پذیری، (a) ضریب افزایش مقاومت که برای فولاد A36 برابر واحد است، (C) ضریب افزایش دینامیکی، (f_{du}) مقاومت نهایی دینامیکی است که از ضرب تنش گسیختگی در c به دست می آید. (f_y) تنش تسلیم و (f_{ds}) تنش دینامیکی طراحی می باشد [۱۱].

۴- سیستم های کنترل لرزه ای

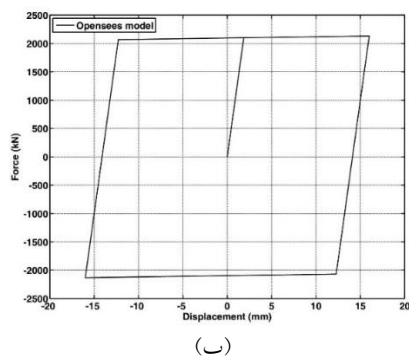
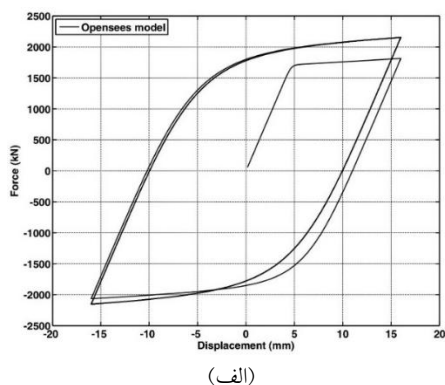
در این پژوهش سیستم های کنترل غیرفعال مورد مطالعه قرار گرفته اند که شامل میراگر ویسکوز، اصطکاکی و مهاربند کمانش تاب می شوند (شکل (۲)).

۴-۲- مهاربند کمانش تاب (میراگر فلزی)

مهاربند کمانش تاب نوعی میراگر فلزی است و با جابه‌جایی فعال می‌شود. هسته فولادی مهاربند کمانش تاب نمی‌تواند کمانش کند، لذا در فشار همانند کشش تسلیم می‌شود و شرایط تغییر شکل زیاد در محدوده غیرالاستیک را فراهم می‌نماید و در نهایت باعث اتلاف انرژی طی چرخه‌های هیسترسیز می‌شود. برای مهاربندهای کمانش تاب از فولاد A36 استفاده شده است و تنها متغیر موجود جهت طراحی سطح مقطع مهاربند می‌باشد. نحوه قرارگیری مهاربند در شکل (۲-ب) نمایش داده شده است. رفتار مهاربند با توجه به نتایج تست‌های آزمایشگاهی مدل‌سازی شده است و نمونه آن در شکل (۳-الف) می‌باشد [۱۳].

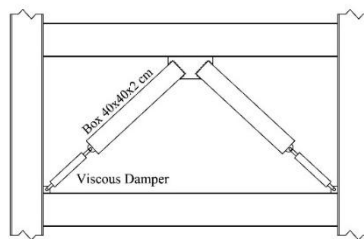
۴-۳- میراگر اصطکاکی

میراگرهای اصطکاکی معمولاً از دو قست فولادی تشکیل شده‌اند؛ (۱) دستک مهاربند و (۲) سطح لغزنده اصطکاکی. این نوع میراگر به وسیله اصطکاک ایجاد شده روی سطوح لغزنده، انرژی را تلف می‌کند. وجود مهاربند انعطاف‌پذیر در کنار سطح لغزنده اصطکاکی مدل رفتاری مشابه شکل (۳-ب) را ایجاد می‌نماید. سختی مهاربند و نیروی آستانه لغزش، دو متغیر برای تعیین مشخصات میراگر اصطکاکی هستند.

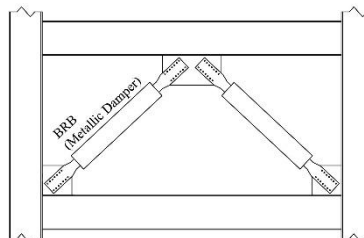


شکل ۳- مدل کلی رفتاری میراگرها (الف) مهاربند کمانش تاب (میراگر

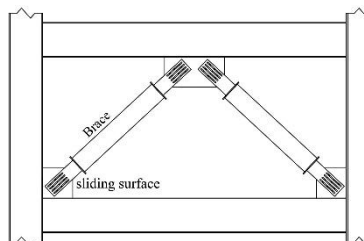
فلزی)، (ب) میراگر اصطکاکی [۱۳]



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲- نحوه قرارگیری میراگرها، (الف) میراگر ویسکوز، (ب) مهاربند کمانش تاب (میراگر فلزی)، (ج) میراگر اصطکاکی

۴-۱- میراگر ویسکوز

میراگرهای ویسکوز معمولاً از یک سیلندر که با مایع ویسکوز (مانند روغن سیلیکون) پر شده است و یک پیستون که دارای یک یا چند سوراخ است تشکیل شده‌اند. حرکت سیال از بین سوراخ‌های پیستون باعث مستهلک شدن انرژی و تولید گرما می‌شود [۱۲]. سرعت، عامل ایجاد نیرو در میراگر ویسکوز می‌باشد و رابطه کلی رفتار این میراگر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{vd} = C_{vd} |\dot{x}|^\alpha \text{sgn}(\dot{x}) \quad (3)$$

که در آن (C_{vd}) ضریب میرایی، (x) تغییر مکان و (α) توان سرعت می‌باشد. توان سرعت بسته به جنس و ساختار میراگر ویسکوز دارد و می‌تواند بیش‌تر، مساوی یا کم‌تر از ۱ باشد. در این پژوهش از میراگرهای ویسکوز خطی استفاده شده است و لذا توان سرعت واحد در نظر گرفته شده است. نحوه قرارگیری میراگر ویسکوز به همراه دستک مهاربند و مشخصات آن در شکل (۲-الف) نشان داده شده است.

۵- چارچوب تحلیل

۵-۱- مدل عددی

نرم‌افزار Opensees به‌عنوان نرم‌افزار اصلی تحلیل استفاده شده است. المان‌های تیر-ستون غیرخطی با مقاطع رشته‌ای برای مدل‌سازی تیرها، ستون‌ها، دستک‌ها و مهاربند کمانش‌تاب استفاده شده است [۱۴].

۵-۲- مفروضات تحلیل

در تحلیل‌ها فرض شده است که: (۱) سازه کاملاً بر روی سطح زمین قرار دارد، (۲) دیوارهای پیرامونی صلب است و اجازه ورود موج انفجار به داخل را نمی‌دهند، (۳) دیافراگم‌ها صلب هستند و رفتار سازه به‌صورت برشی می‌باشد، (۴) رفتار سازه متقارن است و لذا به‌صورت دوبعدی مدل شده است، (۵) کلیه تحلیل‌ها مبتنی بر تاریخچه زمانی همراه با رفتار غیرخطی و تأثیرات نرخ کرنش است.

۵-۳- چرخه تحلیل و بهینه‌سازی

در این پژوهش جهت تعیین بهینه مشخصات میراگرها از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک روشی مناسب برای حل طیف وسیعی از مسائل بهینه‌سازی است [۱۶]. این الگوریتم قادر به حل مسائل بهینه‌سازی دارای توابع پیچیده و قیدهای متعدد است. اندیس عملکردی با هدف کمینه‌شدن دریافت نسبی طبقات به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$PI = \frac{\|D\|_{Controlled}}{\|D\|_{Uncontrolled}} \quad (4)$$

که در این رابطه، (D) بردار حداکثر دریافت نسبی طبقات است. برای یکسان‌سازی و ایجاد امکان مقایسه بین میراگرها، حد بالای نیروی قابل تحمل برای هر میراگر ۱۷۰۸۵۵ پوند (۷۶۰ کیلونیوتن) قرار داده شده است. به‌عبارتی مشخصات میراگرها در بازه‌ای می‌تواند انتخاب شود که حداکثر نیروی قابل تحمل از این میزان تجاوز نکند. روش تکرری که در ادامه آمده است جهت تحلیل و بهینه‌سازی مشخصات میراگرها استفاده می‌شود:

۱- تعیین متغیرها و محدودیت‌ها مربوط به میراگر در الگوریتم ژنتیک.

۲- تولید مقادیر جدید برای متغیرها توسط الگوریتم ژنتیک.

۳- تولید مدل سازه در Opensees با توجه به متغیرهای جدید.

در صورتی که اولین بار است این مرحله اجرا می‌شود مقدار تنش تسلیم المان‌ها برابر f_y و در غیر این صورت مقدار تنش

تسلیم برای هر المان برابر با f_{ds} به‌دست‌آمده از مرحله ۵ اتخاذ گردد.

۴- تحلیل سازه تحت قوی‌ترین بارگذاری انفجار مورد مطالعه.

۵- استخراج نتایج تحلیل و بررسی نرخ کرنش در المان‌ها و تولید f_{ds} جدید مطابق رابطه شماره (۱).

۶- شرط همگرایی به‌صورت زیر تعریف می‌شود. که در آن (i) شماره چرخه، (j) شماره المان و (n) تعداد کل المان‌ها و (ε) تolerانس همگرایی است. چنانچه شرط زیر برقرار باشد، چرخه به مرحله بعدی رفته و در غیر این صورت به مرحله ۳ بازمی‌گردد.

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{f_{ds,j,i+1}}{f_{ds,j,i}} \right| < \varepsilon \quad (5)$$

۷- محاسبه اندیس عملکردی و ارسال آن به الگوریتم ژنتیک.

۸- الگوریتم ژنتیک با توجه به تاریخچه متغیرها و اندیس‌های عملکردی متناظر، بررسی می‌کند که حالت بهینه رخ داده است یا خیر. در صورتی که حالت بهینه حاصل شده باشد، چرخه به مرحله بعدی رفته و در غیر این صورت به مرحله ۲ بازمی‌گردد.

۹- مشخصات بهینه توسط الگوریتم ژنتیک تعیین شده است.

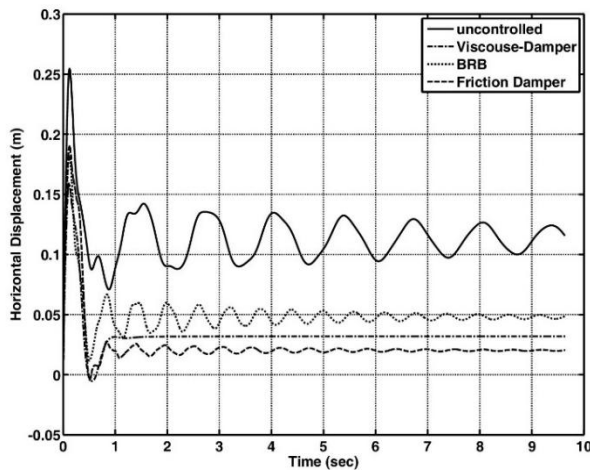
سازه مطابق گام ۳ الی ۶، تحت کلیه بارگذاری‌های انفجار تحلیل می‌شود و نتایج نهایی حاصل خواهد شد.

۶- نتایج تحلیل

در این بخش نتایج مربوط به تحلیل ارائه شده است. در جدول (۲)، اندیس عملکردی سازه‌های کنترل‌شده تحت شدت انفجارهای مختلف آورده شده است. در سطوح انفجاری مورد بررسی میراگر ویسکوز نسبت به دو میراگر دیگر اندیس عملکردی بهتری دارد. میراگر اصطکاکی و مهاربند کمانش‌تاب از لحاظ عملکردی به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. با کاهش شدت انفجار اندیس عملکردی بهبود می‌یابد. این پدیده را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که با کاهش شدت انفجار، طول مدت بارگذاری افزایش می‌یابد و میراگرها فرصت بیش‌تری برای اتلاف انرژی دارند، لذا اندیس عملکردی بیش از پیش بهبود پیدا می‌کند.

جدول ۲- اندیس عملکردی سازه‌های کنترل‌شده تحت شدت انفجارهای متفاوت

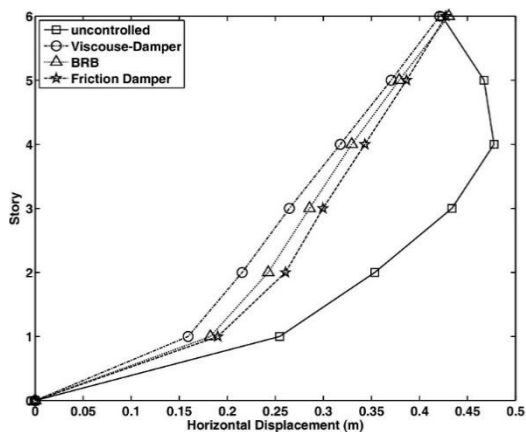
سیستم کنترل لرزه‌ای	فاصله مقیاس شده				
	$\left(\frac{ft}{lb^{1/3}}\right)$				
	Z=4.16	Z=5.2	Z=6.24	Z=7.63	Z=8.67
میراگر ویسکوز	۰/۶۲	۰/۵۷	۰/۵۴	۰/۵۰	۰/۴۹
میراگر اصطکاکی	۰/۶۷	۰/۶۱	۰/۵۹	۰/۵۵	۰/۵۳
مهاربند کمانش‌تاب	۰/۶۸	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۵۹	۰/۵۸



(ب)

ادامه شکل ۴- تاریخچه زمانی جابه‌جایی برای سازه‌های کنترل‌شده و نشده تحت انفجار با فاصله مقیاس شده ۴/۱۶، (ب) طبقه اول

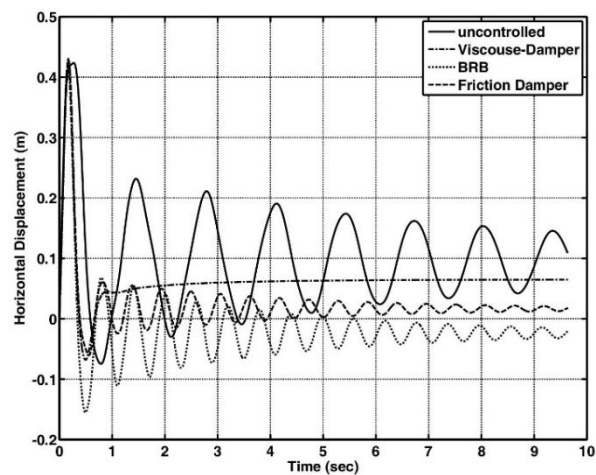
در شکل (۵) جابه‌جایی طبقات سازه تحت انفجار با فاصله مقیاس شده ۴/۱۶ ارائه شده است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که استفاده از میراگرها اگرچه تأثیری در میزان حداکثر جابه‌جایی بام سازه ندارند اما باعث می‌شوند جابه‌جایی به طور یکنواخت‌تری بین طبقات توزیع شود و از تمرکز جابه‌جایی در یک طبقه که می‌تواند عامل فروریزش باشد جلوگیری شود. در سازه کنترل‌نشده، جابه‌جایی در طبقه اول متمرکز می‌باشد اما در سازه‌های کنترل‌شده میزان این تمرکز کاهش یافته است. در حقیقت مهم‌ترین ویژگی عملکردی میراگرها توزیع یکنواخت‌تر جابه‌جایی بین طبقات می‌باشد. هر چه این توزیع یکنواخت‌تر باشد، میزان دررفت‌های نسبی طبقات به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و در نتیجه ایمنی سازه بیش‌تر تأمین می‌شود.



شکل ۵- جابه‌جایی طبقات سازه تحت انفجار با فاصله مقیاس شده ۴/۱۶

شکل (۶) مقدار دررفت حداکثر طبقات سازه تحت انفجار با فاصله مقیاس شده ۴/۱۶ را نشان می‌دهد. استفاده از میراگرها

شکل (۴)، تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام و طبقه اول در سازه‌های کنترل‌شده و نشده را نشان می‌دهد. شکل (۴-الف) نشان می‌دهد که استفاده از میراگرها تأثیری در جابه‌جایی حداکثر بام ندارد و مقدار این جابه‌جایی فارغ از میزان سختی یا میرایی می‌باشد. اما شکل (۴-ب) نشان می‌دهد که استفاده از میراگرها باعث کاهش جابه‌جایی طبقه اول در سازه می‌شوند، میراگر ویسکوز ۳۷/۴٪، مهاربند کمانش‌تاب ۲۸/۴٪ و میراگر اصطکاکی ۲۵/۳٪ این میزان را کاهش می‌دهند. در مورد سرعت کاهش دامنه نوسانات نیز میراگر ویسکوز عملکرد بهتری دارد. میراگر اصطکاکی و مهاربند کمانش‌تاب به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند.



(الف)

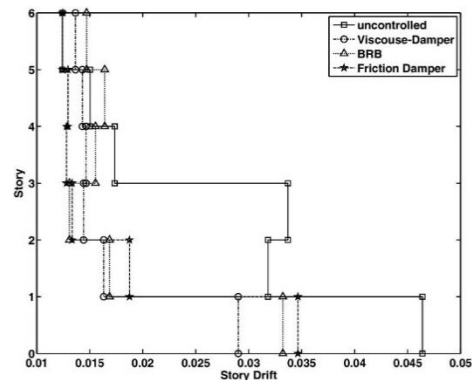
شکل ۴- تاریخچه زمانی جابه‌جایی برای سازه‌های کنترل‌شده و نشده تحت انفجار با فاصله مقیاس شده ۴/۱۶، (الف) بام سازه

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش جهت بررسی تأثیر سیستم‌های کنترل غیرفعال بر بهبود عملکرد سازه تحت انفجار، سیستم‌های کنترل غیرفعال برای چند مدل تحت بار انفجار، بهینه شده و مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی‌های صورت گرفته در مدل‌سازی‌های این پژوهش نشان دادند که:

- استفاده از میراگرها باعث توزیع یکنواخت‌تر جابه‌جایی در طبقات شده است و از تمرکز جابه‌جایی در یک طبقه جلوگیری کرده است. این مهم‌ترین تأثیر سیستم‌های کنترل غیرفعال بر عملکرد سازه می‌باشد.
- استفاده از میراگرهای مورد بررسی، تأثیری در حداکثر میزان جابه‌جایی بام سازه نداشته است. به عبارتی دیگر، میزان جابه‌جایی بام در سازه مورد بررسی فارغ از مقدار سختی و میرایی می‌باشد.
- میراگر ویسکوز در بین سیستم‌های کنترل غیرفعال بررسی شده، بهترین عملکرد را در کنترل میزان جابه‌جایی طبقات و شکل‌پذیری مورد نیاز ستون‌ها تحت انفجار داشته است. استفاده از این میراگر باعث شده سختی سازه تغییر نکند و لذا تحت بارگذاری زلزله شتاب سازه افزایش نیافته است.
- میراگر ویسکوز سریع‌تر از سایر سیستم‌ها، سازه را به حالت سکون رسانده است و در کلیه موارد بررسی شده این میراگر تنها اجازه یک نوسان را به سازه داده است.
- میراگر اصطکاکی و مهاربند کماتش‌تاب عملکردی نزدیک به یکدیگر داشته‌اند و می‌توان از آن‌ها به‌عنوان گزینه‌ای اقتصادی جهت مقابله با بار انفجار استفاده کرد. البته این میراگرها مقدار سختی سازه را به شدت افزایش می‌دهند و تحت بارگذاری زلزله شتاب را افزایش خواهند داد.
- با افزایش فاصله مقیاس شده انفجار، میزان بهبود پاسخ‌های سازه افزایش یافته است و سیستم‌های کنترلی عملکرد بهتر و موثرتری داشته‌اند.

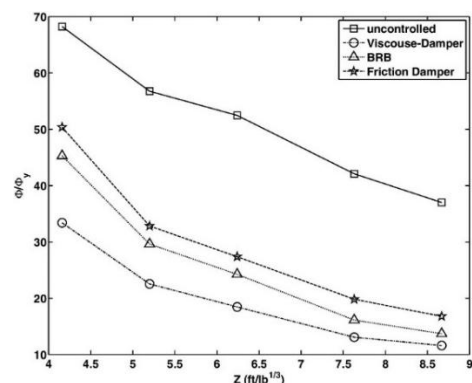
باعث کاهش دررفت نسبی در طبقات اول تا چهارم می‌شود و به‌خصوص میزان دررفت در طبقه اول را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. میراگر ویسکوز ۳۷/۵٪، مهاربند کماتش‌تاب ۲۸/۵٪ و میراگر اصطکاکی ۲۵/۴٪ میزان دررفت طبقه اول را کاهش می‌دهند. در سازه‌های کنترل شده میزان دررفت نسبی در کلیه طبقات به‌جز طبقه اول، کم‌تر از حد ۰/۰۲ است که در بسیاری از آیین‌نامه‌ها حد مجاز برای دررفت حداکثر طبقه تعیین شده است.



شکل ۶- مقدار دررفت حداکثر طبقات سازه تحت انفجار با فاصله

مقیاس شده ۴/۱۶

شکل (۷) مقدار شکل‌پذیری مورد نیاز ستون میانی با شرایط مرزی (تکیه‌گاه) گیردار را نشان می‌دهد. استفاده از میراگرها میزان شکل‌پذیری مورد نیاز را کاهش می‌دهد. میراگر ویسکوز بهتر از دو میراگر دیگر، شکل‌پذیری مورد نیاز را کاهش می‌دهد. میراگر ویسکوز میزان شکل‌پذیری مورد نیاز را بین ۵۵ تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهد. با کاهش شدت انفجار میزان بهبود نیز افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۷- شکل‌پذیری مورد نیاز ستون میانی در انتهای گیردار تحت

سطوح انفجار مختلف

- [15] McKenna, F., and Fenves, G. (2001), "OpenSees manual", PEER Center. <http://OpenSees.berkeley.edu>.
- [16] Reid, D.J. (1996), "Genetic algorithms in constrained optimization", *Mathematical and computer modelling*, 23(5), pp. 87-111.
- [1] Nassr, A.A., Razaqpur, A.G., Tait, M.J., Campidelli, M., and Foo, S. (2012), "Single and multi degree of freedom analysis of steel beams under blast loading", *Nuclear Engineering and Design*, 242, pp. 63-77.
- [2] Jama, H.H., Bambach, M.R., Nurick, G.N., Grzebieta, R.H., and Zhao, X.L. (2009), "Numerical modelling of square tubular steel beams subjected to transverse blast loads", *Thin-Walled Structures*, 47(12), pp. 1523-1534.
- [3] Monir, H.S. (2013), "Flexible blast resistant steel structures by using unidirectional passive dampers", *Journal of Constructional Steel Research*, 90, pp. 98-107.
- [4] Mohebbi, M., and Dadkhah, H.D. (2017), "Performance of semi-active base isolation systems under external explosion", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 17(10), pp. 1750112.
- [5] Kangda, M.Z., and Bakre, S. (2020), "Performance Evaluation of Moment-Resisting Steel Frame Buildings Under Seismic and Blast-Induced Vibrations", *Journal. Vibration. Engineering. Technology*, 8, pp. 1-26.
- [6] Kangda, M.Z., and Bakre, S. (2021), "Performance of linear and nonlinear damper connected buildings under blast and seismic excitations", *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2), pp. 130.
- [7] Ramezani, M., and Labafzadeh, M.S. (2022), "Passive and semi-active vibration control of base-isolated structure under blast loading at medium to long distances", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(2), pp. 435-456.
- [8] Kangda, M.Z., Raikar, R., and Farsangi, E.N. (2023), "Blast Mitigation of Irregular Buildings Equipped with Resilient Passive Control Systems", In *Automation in Construction Toward Resilience*, pp. 583-606.
- [9] Tsai, P.a.K.C. (1988), "Steel Beam-Column Joints in Seismic Moment Resisting Frames, University of California, Berkeley, CA", *Earthquake Engineering Research Center*.
- [10] ICBO, uniform building code. (1994), *International Council of Building Officials*.
- [11] "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions", Document No. UFC 3-340-02., 2008.
- [12] Cowper, G.R., and Symonds, P.S. (1957), "Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams", *DTIC Document*.
- [13] Atlayan, O. (2008), "Effect of Viscous Fluid Dampers on Steel Moment Frame Designed for Strength and Hybrid Steel Moment Frame Design", *Virginia Polytechnic Institute and State University*.
- [14] Black, C., Makris, N., and Aiken, I. (2004), "Component Testing, Seismic Evaluation and Characterization of Buckling-Restrained Braces", *Journal of Structural Engineering*, 130(6), pp. 880-894.