

Investigation of the Effect of Tuned Mass Damper and Viscous Damper on Seismic Fragility of Performance-Optimized Steel Moment-Resisting Frames under Seismic Sequences

Ali Baghernia

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
Seyed Arash Mousavi Ghasemi *

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
Yousef Zandi

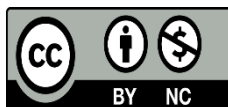
Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
amousavi2000@iau.ac.ir

Keywords

Performance-based optimization, center of mass algorithm, tuned mass damper, collapse capacity, seismic sequences, special steel moment-resisting frame,

Abstract

The main objective of this research is to investigate the effect of tuned mass dampers (TMD) and viscous dampers on the seismic fragility of steel moment-resisting frames optimized based on performance with special ductility under seismic sequences. Therefore, the study includes two main phases. In the first phase, optimization within the framework of performance-based design of special steel moment-resisting frames has been conducted using a center of mass metaheuristic algorithm, with and without considering dampers, based on the ASCE41-13 code. In the final phase, the fragility of the optimized frames has been evaluated according to the criteria provided in FEMA P695, utilizing Incremental Dynamic Analysis (IDA). A 5-story frame is used as the numerical example in this study. OpenSees software was employed to obtain structural responses, and MATLAB was used to implement the performance-based design methodology. Based on the results, it was observed that increased weight does not necessarily lead to higher seismic safety or lower seismic fragility. Moreover, frames optimized with viscous dampers exhibited 10% and 13% less fragility compared to frames optimized with tuned mass dampers and frames without dampers, respectively, under seismic sequences in the 5-story frames studied.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

بررسی اثر میراگر جرمی و ویسکوز بر شکنندگی لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی بهینه‌سازی شده بر اساس عملکرد تحت توالی لرزه‌ای

علی باقرنیا

گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

سید آرش موسوی قاسمی*

گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

یوسف زندی

گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

amousavi2000@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۶ تیر ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۴

چکیده

هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر میراگر جرمی و ویسکوز بر شکنندگی لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی بهینه‌سازی شده بر اساس عملکرد با شکل‌پذیری ویژه تحت توالی لرزه‌ای است؛ لذا مطالعه ارائه شده شامل دوفاز اصلی است. در فاز نخست بهینه‌سازی در چهارچوب نگرش طراحی مبتنی بر عملکرد قاب‌های خمشی ویژه فولادی با استفاده از الگوریتم فراکاوشی مرکز جرم بر اساس آیین‌نامه ASCE41-13، با و بدون در نظر گرفتن میراگر پرداخته شده است و در فاز نهایی شکنندگی در قاب‌های بهینه‌سازی شده، با توجه به ضوابط ارائه شده در FEMA P695، و با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)، مورد بررسی قرار گرفته است. قاب ۵ طبقه مثال عددی مورد بررسی در این تحقیق است. در این مطالعه از نرم‌افزار OpenSees جهت به دست آوردن پاسخ‌های سازه و از نرم‌افزار متلب جهت پیاده‌سازی نگرش طراحی مبتنی بر عملکرد استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده گردید که وزن بیشتر سبب ایمنی لرزه‌ای بیشتر و شکنندگی لرزه‌ای کمتر نمی‌شود. همچنین سازه‌های بهینه‌سازی شده با میراگر ویسکوز به ترتیب ۱۰٪ و ۱۳٪ شکنندگی کمتری نسبت به قاب‌های بهینه‌سازی شده با میراگر جرمی و قاب‌های بهینه بدون میراگر را در قاب‌های ۵ طبقه تحت توالی لرزه‌ای را داشتند.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی بر اساس عملکرد، الگوریتم مرکز جرم، میراگر جرمی تنظیم شونده، میراگر ویسکوز، ظرفیت

فروریزش، توالی لرزه‌ای، قاب خمشی ویژه فولادی

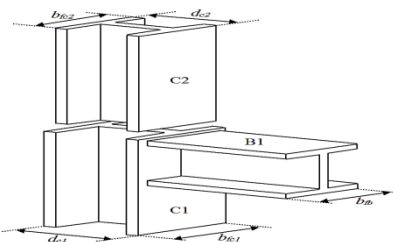
* نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

با توجه به خرابی‌های گسترده سازه‌ها با قاب خمشی فولادی ناشی از زلزله‌های ویرانگر گذشته، ارزیابی لرزه‌ای این سازه‌ها در برابر زلزله‌های متوالی، امری مهم و ضروری است؛ لذا در نظر گرفتن خاصیت تجمعی خرابی ناشی از پدیده خستگی در اثر بارهای لرزه‌ای و همچنین باتوجه به خاصیت تکراری زلزله‌های واقعی که در بعضی مواقع بزرگی پس‌لرزه‌ها نزدیک به زلزله اصلی است، انتظار می‌رود خسارت ایجاد شده در سازه‌های مذکور تحت توالی لرزه‌ای و تک زلزله متفاوت باشد [۱]. اخیراً مطالعات گسترده‌ای بر روی رفتار غیرخطی سازه‌های مهندسی با چندین درجه آزادی تحت زلزله‌های متوالی متمرکز شده است و پاسخ‌های سازه‌ای تحت زلزله اصلی و پس‌لرزه مورد مقایسه قرار گرفته است [۱۶]. نتایج تحقیقات فوق که بیشتر بر روی جابه‌جایی‌ها، ماکزیمم جابه‌جایی‌های پسماند، ماکزیمم دررفت نسبی طبقات، شاخص خسارت و تقاضاهای شکل‌پذیری متمرکز شده بود حاکی از افزایش چندین برابر نسبت به تک زلزله (زلزله اصلی) بوده است. بسیاری از اعضای سازه‌ای در اثر یک رخداد زلزله رفتار خطی داشته در حالی که در اثر رخدادهای چندین زلزله وارد ناحیه غیرخطی شده‌اند می‌توان از تحقیقات انجام شده نتیجه گرفت عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها تحت اثر توالی لرزه‌ای امری ضروری است با آنکه در روش‌های جدید طراحی سازه‌ها مانند طراحی مبتنی بر عملکرد این مسئله نادیده گرفته شده است [۱۷]. هنگام بروز زلزله سازه تحت اثر شتاب زمین قرار می‌گیرد که هرچه شتاب ناشی از نیروهای زلزله مقدار بزرگ‌تری را اختیار کند تغییر مکان و دوران ایجاد شده در سازه نیز افزایش می‌یابد؛ لذا به همین دلیل ضرورت استفاده از میراگر در سازه‌ها آشکار شده است. طراحی بهینه سازه‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای یکی از زمینه‌های فعال تحقیقاتی در حوزه مهندسی سازه است [۱۷]. در واقع با فرض کردن پاسخ استاتیکی و صرف‌نظر کردن از ویژگی‌های دینامیکی رفتار لرزه‌ای سازه در طی یک فرایند بهینه‌سازی، ممکن است سازه در برابر نیروهای ناشی از زلزله بسیار آسیب‌پذیر باشد. باتوجه به نیاز روزافزون جوامع مهندسی به طرح سازه‌های ایمن و در عین حال اقتصادی، در این تحقیق به بهینه‌سازی قاب خمشی فولادی با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته بهینه‌سازی پرداخته شده است [۲۲]. در سال‌های اخیر طراحی بر اساس عملکرد به‌عنوان روشی که مبتنی بر پذیرش تغییر مکان و شکل‌پذیری مورد انتظار باشد، مورد توجه قرار گرفته است [۱۳]. ارزیابی ایمنی لرزه‌ای یک سازه از مهم‌ترین موضوعات در آنالیز لرزه‌ای سازه‌ها است که در سال‌های اخیر تأثیر پارامترهای مختلفی چون ابعاد تیرها و ستون‌ها، شکل اعضای ساختمان و دیگر پارامترهای سازه روی ایمنی لرزه‌ای سازه‌ها بررسی شده‌اند در همین راستا تأثیر میراگرهای متفاوت بر شکندگی قاب‌ها یکی از موضوعات مهمی است که تاکنون به‌صورت جدی مورد مطالعه قرار نگرفته است. بدین‌منظور آنالیز دینامیکی افزایشی و نمودارهای شکست به عنوان ابزاری برای آنالیز و تحلیل داده‌های به دست آمده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴]. در ادامه این

بخش به تعدادی از کارهای انجام شده در زمینه بهینه‌سازی بر اساس عملکرد با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی می‌پردازیم. در کار تحقیقی، روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد را به‌گونه‌ای اصلاح کردند که در ساختمان‌های بلند با قاب‌های مقاوم در برابر خمش با چندین درجه آزادی، بتوان اثر مدهای بالا و سختی پس از تسلیم را در نظر گرفت [۲۳]. در تحقیقی بهینه‌سازی وزن قاب‌های مهاربندی شده واگرا را با روش طراحی بر اساس عملکرد و با اعمال قیدهای بیشتر انجام داده‌اند [۶]. در مطالعه‌ای، شکندگی لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی با رویکرد بهینه‌سازی بررسی کرده‌اند [۷]. در کار محققانی دیگر، عملکرد مبتنی بر بهینه‌سازی توپولوژی قاب‌های فولادی را توسط الگوریتم فراکاوشی جدید

کرده‌اند [۱۱]. همچنین در کار پژوهشگرانی، به مطالعه عملکرد قاب‌های فولادی بهینه بر اساس عملکرد پرداخته‌اند. الگوریتم بکار گرفته شده در این تحقیق برای بهینه‌سازی قاب الگوریتم اجتماع ذرات کواتوم است [۱۲]. در تحقیق پژوهشگرانی، هزینه قاب‌های خمشی بتنی مسلح چند طبقه را به روش طراحی مبتنی بر عملکرد، بهینه‌سازی کرده‌اند [۲۴]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی اثر میراگرهای جرمی و ویسکوز بر بهبود رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی بهینه‌سازی شده پرداخته‌اند. پژوهشگران در تحقیقی نشان دادند که میراگر جرمی می‌تواند با کاهش نسبت انحراف طبقات، عملکرد لرزه‌ای سازه را بهبود بخشد [۲۵]. محققین در تحقیقی با ارائه روش بهینه‌سازی چند سطحی مبتنی بر عملکرد، توزیع بهینه میراگرهای ویسکوز را برای دستیابی به اهداف لرزه‌ای مختلف تعیین کردند [۲۶]. در پژوهشی تأثیر پارامترهای میراگر ویسکوز را بر کارایی میرایی سازه‌های دیوار برشی قاب بررسی کرده و به ترکیب بهینه‌ای از ضریب و نمایه میرایی دست یافتند که منجر به کاهش جابه‌جایی و برش پایه شد [۲۷]. محققان با استفاده از الگوریتم ژنتیک غیرمسلط، طراحی بهینه میراگرهای ویسکوز را به‌گونه‌ای انجام دادند که ریسک لرزه‌ای سازه در طول عمر طراحی به حداقل برسد [۲۸]. رویکردی مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم در برابر خرابی برای میراگرهای ویسکوز معرفی کرد که ضمن حفظ عملکرد، پایداری سازه را افزایش می‌دهد [۲۹]. همچنین، با استفاده از روش تحلیل زمان ماندگار و الگوریتم ژنتیک، توزیع بهینه میراگرهای ویسکوز را برای دستیابی به عملکرد لرزه‌ای بهتر در سطوح شدت مختلف شناسایی کردند. این مطالعات در مجموع اهمیت طراحی و بهینه‌سازی دقیق سیستم‌های میرایی فعال و نیمه‌فعال را برای کاهش شکندگی لرزه‌ای قاب‌های فولادی به خوبی نشان می‌دهند. برای تحلیل لرزه‌ای یک سازه نیاز و ظرفیت آن نقش مهمی را ایفا می‌کنند. روش‌های بسیار زیادی وجود دارند که نیاز و ظرفیت سازه را برای تحریکات لرزه‌ای ارزیابی می‌کنند. یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی ظرفیت سازه تحلیل دینامیکی فزاینده است. امروزه، تحلیل دینامیکی فزاینده یک ابزار دقیق برای تخمین ظرفیت سازه معرفی می‌شود. در این تحلیل مدل سازه‌ای تحت اثر تعدادی رکورد زمین‌لرزه که از شدت کم به‌شدت زیاد مقیاس شده‌اند، قرار می‌گیرد [۳۰]. حدوداً از



$$g_{G,j}(X) = \left\{ g_{G4,j}(X) = \frac{t_{w,j}^u}{t_{w,j}^l} \right. \quad (3)$$

که $t_{w,j}^u t_{w,j}^l$ به ترتیب ضخامت جان ستون بالایی و ستون پایینی می‌باشند. قیود دوم مربوط به بررسی اعضای سازه‌ای در برابر بارهای ثقلی است. در این حالت ترکیب‌های بار طبق رابطه ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته شده است [۳]:

$$Q_G = 1.2Q_D + 1.6Q_L \quad (4)$$

و در آن Q_D بار مرده و Q_L بار زنده است. مطابق معیار LRFD-AISC هر المان قاب خمشی باید قیود ۵ و ۶ را ارضا کند [۳]:

$$\text{for } \frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2 : \quad \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) - 1 \leq 0 \quad (5)$$

$$\text{for } \frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2 : \quad \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) - 1 \leq 0 \quad (6)$$

که در آن P_n مقاومت محوری اسمی مورد نیاز، P_u مقاومت محوری موجود یا در دسترس، ϕ_c ضریب مقاومت برای فشار، M_n مقاومت خمشی اسمی مورد نیاز، M_{ux} و M_{uy} مقاومت خمشی در دسترس یا موجود عضو در جهات X و Y و ϕ_b ضریب کاهش مقاومت خمشی است ($\phi_c = \phi_b = 0.9$). قیدهای طراحی برای محاسبه سطوح اعتماد در هر هدف عملکردی بر اساس FEMA 350 در نظر گرفته می‌شود [۸]. اهداف عملکرد پیشگیری از فروریزش برای سطح خطر ۲ درصد در ۵۰ سال و قابلیت استفاده بی وقفه برای سطح عملکرد ۵۰ درصد در ۵۰ سال می‌باشد. تقاضای سازه‌ای لازم برای زمین لرزه جهت محاسبه سطوح اعتماد مقادیر دریافت طبقات و نیروی محوری اعضا در هر سطح خطر می‌باشد. پارامتر سطوح اعتماد بر پایه نسبت تقاضا به ظرفیت طبق رابطه ۷ محاسبه می‌شود [۸].

سال ۲۰۰۵ تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه توسط محققین شروع شده است که نتایج بخشی از این تحقیقات را می‌توان مشاهده نمود [۸]. به منظور ارزیابی لرزه‌ای فروریزش سازه‌ها، ضریبی تحت عنوان ضریب حاشیه فروریزش تعدیل شده (ACMR)، مطابق با رویکرد آیین‌نامه FEMA-P695 ارائه شده است [۸]. در همه مطالعات پیشین در خصوص اثر زلزله بر سازه به بررسی پاسخ‌ها و پارامترهای سازه‌ای از جمله دریافت نسبی طبقات، دریافت پسماند، جابه‌جایی ماندگار و غیره توجه شده است و تا کنون تحقیقی برای ارزیابی شکنندگی لرزه‌ای صورت نگرفته است و باتوجه به مطالب گفته شده تأثیر زلزله بر روی شکنندگی لرزه‌ای قاب‌های بهینه‌سازی شده بر اساس عملکرد با در نظر گرفتن میراگر در روند طراحی، مهم و غیرقابل انکار هست؛ لذا انجام یک تحقیق جامع در رابطه با بررسی اثر انواع میراگر بر شکنندگی قاب‌های خمشی فولادی بهینه‌سازی شده بر اساس عملکرد ضروری است.

۲- روش تحقیق

در این مطالعه برای مدل‌سازی اجزای محدود سازه‌ها از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است [۲۰] و برای پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی و همچنین سایر محاسبات لازم از نرم‌افزار Matlab استفاده می‌شود [۱۹]. نرم‌افزار OpenSees با بهره‌گیری از زبان برنامه‌نویسی TCL/TK قادر به تحلیل انواع سازه‌ها است. برای مدل‌سازی غیرخطی المان‌های تیر و ستون از المان Column Beam nonlinear برای معرفی المان‌ها استفاده می‌شود. همچنین مقاطع به صورت فایبر با دستور Fibersection ایجاد می‌شوند. از الگوریتم فراکاوشی مرکز جرم برای بهینه‌سازی وزن قاب‌های خمشی فولادی، استفاده شده است. این الگوریتم فراکاوشی مبتنی بر مفهوم مرکز جرم است. به طوری که هر جرم مأمور جستجو بزرگ‌تر باشد، فاصله آن تا مرکز جرم کوچک‌تر خواهد بود و برعکس. هدف اصلی بهینه‌سازی، کاهش وزن سازه است مسئله به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\text{Minimize : } w = \rho \sum_{i=1}^M A_i L_i \quad (1)$$

$$\text{subject to the constraints: } g_1 \leq 0, \quad g_2 \leq 0, \dots, \quad g_n \leq 0 \quad (2)$$

g_1, g_2, g_n که در آن ρ ، A_i و L به ترتیب وزن واحد حجم فولاد، سطح مقطع عضو و طول عضو می‌باشند $\dots, \dots$ ، توابع قید هستند که با توجه به نوع المان و نوع مسئله محاسبه می‌شوند. در این مطالعه قیدهایی مانند دریافت طبقات، تغییر مکان ماکزیمم برای طراحی سازه‌ها اعمال می‌شود. در فرایند طراحی بهینه قاب‌های فولادی خمشی بر مبنای عملکرد، چهار نوع قید در نظر گرفته شد است. نوع اول قیدهایی هندسی است. در این قید همانند شکل (۱) باید ابعاد مقطع ستون بالایی از ستون پایینی کوچکتر یا مساوی باشند. همچنین در اتصال تیر به ستون، عرض بال تیر از عرض بال ستون کوچکتر یا مساوی باشد.

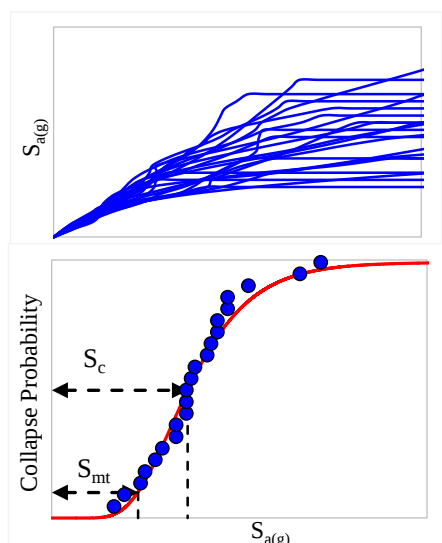
منحنی‌های شکنندگی طبق رابطه‌ی (۱۰) پارامتر نسبت حاشیه فروریزش سازه محاسبه می‌شود [۸]:

$$CMR = \frac{IM_{50\%}}{IM_{MCE}} \quad (10)$$

در این رابطه $IM_{50\%}$ به شتابی گفته می‌شود که در آن نصف رکوردها باعث فروریزش سازه می‌شود. همچنین شتاب طیف MCE، IM_{MCE} برابر با شتاب بدست آمده از طیف حداکثر زلزله در نظر گرفته شده در دوره تناوب اصلی سازه می‌باشد که به طیف طرح آئین نامه مورد نظر بستگی دارد. همان طور که در FEMA-P695 بحث شده است، ظرفیت فروریزش سازه‌ها و محاسبه CMR می‌تواند به شدت تحت اثر محتوای فرکانسی شکل طیفی رکوردهای زلزله قرار بگیرد، بنابراین برای در نظر گرفتن اثرات شکل طیفی در محاسبات مربوط به CMR محاسبه شده بر اساس رابطه (۱۰) را به صورت زیر برای هر سازه اصلاح نموده و در نهایت حاشیه ایمنی فروریزش اصلاح شده را طبق رابطه (۱۱) ملاک ارزیابی عملکرد یک سازه قرار می‌دهد:

$$ACMR = SSF * CMR \quad (11)$$

در این رابطه، SSF ضریب مربوط به اثرات طیفی است که به زمان تناوب و شکل‌پذیری سازه وابسته بوده و مقادیر آن در FEMA-P695 برای سازه‌های مختلف و بر اساس شدت زلزله، شکل‌پذیری و زمان تناوب طبیعی سازه آورده شده است.



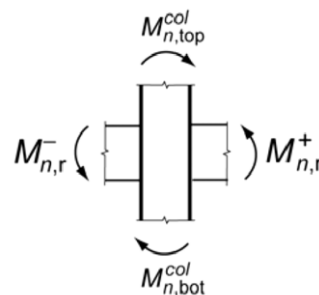
شکل ۳- نمودار IDA و منحنی شکنندگی [۱۲]

$$\lambda_{CL} = \frac{\gamma \gamma_a D}{\phi C} \quad (7)$$

$$CL = \phi(K_X) \quad (8)$$

که در این رابطه γ فاکتور تغییرات تقاضا، γ_a فاکتور عدم قطعیت‌های آنالیز، D تقاضای محاسبه شده سازه، C میانگین تخمینی ظرفیت سازه-ای و ϕ مربوط به عدم قطعیت‌های موجود در تخمین ظرفیت سازه‌ای می‌باشد. مقادیر این پارامترها در FEMA350 آمده و سطوح اعتماد با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می‌شود. که در این رابطه $\phi(K_X)$ تابع توزیع تجمعی استاندارد K_X می‌باشد. به این ترتیب، با محاسبه مقدار تابع توزیع نرمال تجمعی استاندارد K_X می‌توان سطح اطمینان را بدست آورد [۸].

به منظور برآورده کردن الزامات آیین‌نامه FEMA 350، مجموع مقاومت‌های خمشی اسمی ستون‌های واقع در یک اتصال بایستی حداقل از 1.0 برابر مجموع مقاومت‌های خمشی اسمی تیرهای واقع در همان اتصال بزرگتر باشند (شکل ۲). در ادامه فرمول‌بندی روند کنترل این ضابطه ارائه شده است [۸]:



شکل ۲- شماتیک نیرویی اتصال برای کنترل تیر ضعیف و ستون قوی (۹)

$$M_{n,top}^{col} + M_{n,bot}^{col} > 1.0(M_n^+ + M_n^-)$$

۲-۱- ظرفیت فروریزش لرزه‌ای

در FEMA-P695 روشی برای تعیین میزان ظرفیت فروریزش لرزه‌ای سازه وجود دارد که طبق آن از طریق به‌دست‌آوردن منحنی‌های شکنندگی می‌توان میزان ظرفیت فروریزش سازه را به‌صورت عددی و تحت عنوان ضریب حاشیه ایمنی فروریزش CMR مشخص کرد. مطابق شکل (۳) با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی افزایشی و ترسیم منحنی‌های IDA می‌توان به منحنی‌های شکنندگی دست یافت [۸]. جهت ترسیم منحنی‌های شکنندگی باید شتاب متناظر با فروریزش سازه‌ها را بر روی منحنی‌های IDA مشخص کرد و با بدست آوردن تابع توزیع لوگ نرمال آن‌ها منحنی‌های شکنندگی را ترسیم نمود. با استفاده از

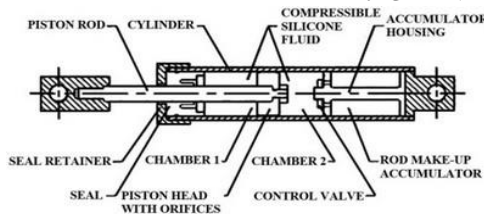
که در آن T_s ، زمان تناوب اصلی مد اول سازه است نسبت فرکانس میراگر به فرکانس مود تنظیم شونده بین $0/9$ الی 1 متغیر است که در پروژه حاضر این مقدار برای تمامی مددها $0/98$ در نظر گرفته شده است ضریب میرایی کل سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده از رابطه ۱۴ بدست می آید [۱۵]

$$C_d = 4\pi^2 \xi \frac{m_s}{T_s} \quad (14)$$

نسبت میرایی TMD می باشد اغلب نتایج حاصل از صحت سنجی حاکی از این هستند که مناسبترین نسبت میرایی میراگر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد می باشد [۱۵].

۳-۲- میراگر ویسکوز

عملکرد این میراگرها، وابسته به سرعت ایجاد شده درون آنها است. در این میراگرها با استفاده از حرکت مایع لزج، درون یک محفظه سیلندر مانند، انرژی مستهلک می شود [۴].



شکل ۶- ساختار مکانیکی میراگر ویسکو [۴]

با توجه به شکل ۶، پیستون قادر به حرکت درون سیلندر بوده و بر اثر این حرکت، مایع از سوراخ اوریفیس واقع در سر پیستون جابجا می شود. مراحل کلی طراحی میراگر ویسکوز به شرح زیر می باشد [۴].

در مرحله اول، نسبت میرایی سازه با میراگر طبق رابطه (۱۵) در زیر محاسبه می شود.

$$\xi_d = \frac{T \sum C_j \varphi_{rj}^2 \cos^2 \theta_j}{4\pi \sum m_i \varphi_i^2} \quad (15)$$

در رابطه بالا، T پریود مود اصلی سازه، C_j ضریب میرایی طبقه j و φ_{rj} جابه جایی افقی نسبی دو انتهای میراگر در اثر تغییر شکل سازه در مود اول تغییر شکل، θ_j زاویه میراگر با افق در طبقه j و m_j جرم لرزه ای طبقه i و φ_i تغییر مکان طبقه i در اثر تغییر شکل در مود اول سازه است. رابطه مذکور مختص میراگرهای خطی (رابطه نیرو و تغییر شکل میراگر خطی) هست [۴].

در این مرحله باید جرم لرزه ای اجزا و طبقات بر اساس سطح بارگیر طبقات و ترکیب بار لرزه ای محاسبه شود.

در این مرحله، شکل مودی و پریود مود اول محاسبه می شود.

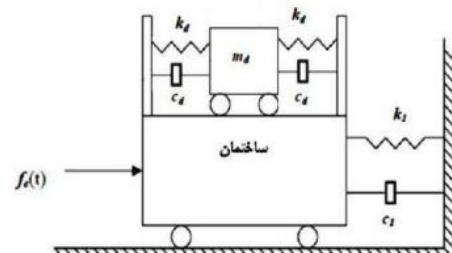
در این مرحله زاویه میراگر با افق تعیین می گردد که در صورتی که میراگر به صورت قطری در سازه نصب شود به سادگی با قانون مثلثات محاسبه می شود.

آرایش میراگرها و تعداد آنها در هر جهت تعیین می گردد.

در این مرحله، ضریب میرایی میراگرها محاسبه می شوند.

۲-۲- میراگر جرمی تنظیم شونده

یک سیستم میراگر جرمی فعال (TMD)، وسیله ای متشکل از یک جرم، فنر و یک میراگر است که به منظور کاهش پاسخ دینامیکی سازه، به آن متصل می گردد فرکانس میراگر با میزان فرکانس سازه تنظیم می گردد تا هنگامی که این فرکانس تحریک گردد، میراگر در فاز مقابل حرکت سازه مرتعش شود انرژی توسط نیروی اینرسی میراگر که بر روی سازه اعمال می گردد، تلف می شود. در این نوع از میراگرها جرم بر روی تکیه گاه های غلتکی قرار می گیرد و می تواند نسبت به طبقه جابه جایی انجام دهد، فنرها و میراگرها بین جرم و تکیه گاه های ثابت عمودی قرار می گیرد، نیروی فاز مخالف میراگر را به تراز طبقه (همانند شکل ۴)، و در نتیجه به قاب سازه ای منتقل میکند [۱۸].



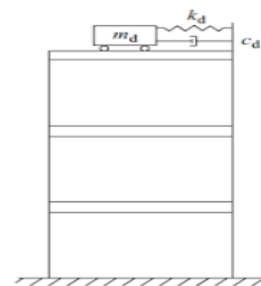
شکل ۴- نمایش ساده شماتیک از نحوه عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده [۲۱]

برای طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شونده در مدل سازه ای یکی از اصلی ترین پارامترها جرم میراگر است معمولاً جرم میراگر را به صورت درصدی از جرم کل سازه به صورت رابطه ۱۲، بیان می کنند [۲۱]:

$$m_d = m_s \mu \quad (12)$$

که در آن، μ نسبت جرم، m_s جرم کل سازه میباشد که بین ۱ الی ۲۰ درصد متغیر است، و مقدار سختی کل K_d نسبت جرمی سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده از رابطه ۱۳، بدست می آید [۱۵].

$$k_d = 4\pi^2 \mu f^2 \frac{m_s}{T_s^2} \quad (13)$$



شکل ۵- استفاده از میراگرهای جرمی در طبقات بالایی سازه

در مرحله هفتم، نیروی جانبی و نیروی برشی در هر طبقه بر اساس محاسبات مراحل قبل محاسبه می‌شوند.

۲-۴- توالی لرزه‌ای

به منظور ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های قاب‌های مورد مطالعه تحت توالی لرزه‌ای که شامل یک زلزله اصلی و حداقل یک پس‌لرزه باشد، تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی بکار گرفته شده است. در مطالعه حاضر از ۱۰ رخداد لرزه‌ای متوالی واقعی که از سایت peer برداشته شده است، در جدول (۱) ارائه شده است این دیتا بیس‌های زمین لرزه‌ای شامل زلزله‌های متوالی که از ایستگاه، فاصله از گسل و جهت یکسان انتخاب شده اند.

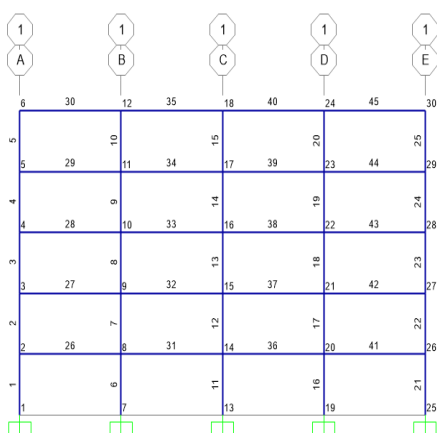
جدول ۱- زلزله‌های متوالی واقعی انتخاب شده از سایت peer

No.	Seismic sequence	Date	Magnitude
1	Northridge	17/01/94	6/69
		17/01/94	5/93
2	Chi-Chi	20/09/99	7/62
		20/09/99	6/2
3	Mammoth Lakes	25/05/80	6/06
		25/05/80	5/69
4	Mammoth Lakes	31/05/80	4/8
		11/06/80	4/85
5	Irpinia	23/11/80	6/9
		23/11/80	6/2
6	Irpinia	23/11/80	6/9
		23/11/80	6/2
7	Whittier	10/01/87	6/0
		10/04/87	5/3
8	Whittier	10/01/87	6/0
		10/04/87	5/3
9	Whittier	10/01/87	6/0
		10/04/87	5/3
10	Whittier	10/01/87	6/0
		10/04/87	5/3

۳- نتایج عددی

با توجه به گستردگی محاسبات در فرایند بهینه‌سازی و تحلیل شکنندگی لرزه‌ای، در این پژوهش تمرکز بر قاب ۵ طبقه بوده و بررسی قاب‌هایی با تعداد طبقات بیشتر به عنوان ادامه این پژوهش در مطالعات آتی مدنظر قرار گرفته است. سازه‌های مورد بررسی در این مطالعه قاب‌های ۴ دهانه ۵ طبقه نشان داده شده در شکل (۷)، هستند، که در همه آن‌ها اتصال تیر به ستون‌ها به صورت گیردار است، طول دهانه‌ها ثابت و برابر ۶ متر، و ارتفاع طبقات برابر سه متر می‌باشد. در طراحی تیرها و ستون‌ها از مقاطع W استفاده شده است. تنش تسلیم مقاطع مختلف ۳۴۴/۷۴ مگاپاسکال می‌باشد. برای تعریف مشخصات مقاطع W، پس از تسلیم، ۳٪ درصد سخت‌شوندگی در نظر گرفته می‌شود. مدول الاستیسیته و وزن واحد حجم به ترتیب، برای همه اعضا فولادی برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. همچنین مقادیر بار مرده و زنده به ترتیب ۳۰۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوگرم بر متر می‌باشد. عرض بارگیر تیرها در جهت عمود بر صفحه برابر ۶ متر فرض می‌شود. از تحلیل غیرخطی استاتیکی (پوش اور) برای برآورد بارهای لرزه‌ای وارد بر سازه استفاده می‌شود. در جدول ۲، مقاطع مورد استفاده در فرایند بهینه‌سازی مورد استفاده در این مطالعه نشان داده

شده است. در قابهای فولادی ۵ طبقه، سازه‌های بهینه با میراگر جرمی را با 5DT، سازه‌های بهینه با میراگر ویسکوز را با 5DV و سازه‌های بهینه بدون میراگر را با 5DN نام‌گذاری شده‌اند. طراحی این قاب‌ها توسط نرم‌افزار OpenSees و کنترل محدودیت‌ها و فرایند بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار Matlab انجام می‌شود. تحلیل فشاری در فرایند بهینه سازی برای کنترل سطوح عملکرد استفاده می‌شود. همچنین برای به دست آوردن ظرفیت فروریختگی قاب‌های طراحی شده از تحلیل IDA استفاده شده است. جداول (۳)، (۴) و (۵) بهترین راه‌حل‌های بدست آمده توسط الگوریتم مرکز جرم را برای قاب ۵ طبقه با دمپر ویسکوز نشان می‌دهد. میراگر جرمی تنظیم شده و بدون دمپر به ترتیب نشان داده شده است. این راه‌کارها از نظر محدودیت‌های اجرا، طراحی بر اساس نیرو و طراحی بر اساس عملکرد قابل قبول هستند. منحنی دررفت بهینه در شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. در این پژوهش، میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده (TMD) در بالاترین طبقه قاب نصب شده‌اند. نسبت جرم میراگر به جرم کل سازه (μ) برابر با ۵٪ در نظر گرفته شده و نسبت فرکانس میراگر به مد اول سازه برابر ۰/۹۸ تنظیم شده است. همچنین نسبت میرایی میراگر برابر با ۲/۵ در نظر گرفته شده که مطابق مطالعات پیشین، در بازه بهینه عملکرد (۲۰ تا ۳۰٪) قرار دارد. مقادیر سختی و میرایی سیستم TMD به ترتیب بر اساس روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه شده‌اند. برای میراگرهای ویسکوز، از آرایش قطری در دهانه‌های کناری طبقات دوم تا پنجم استفاده شده است. زاویه قرارگیری آن‌ها با افق برابر با ۴۵ درجه بوده و ضریب میرایی هر میراگر بر مبنای رابطه (۱۵)، با در نظر گرفتن شکل مودی اول، جرم‌های مؤثر طبقات و جابجایی نسبی دو انتهای میراگر تعیین شده است. هدف از این طراحی، ایجاد میرایی مؤثر معادل بین ۱۰ تا ۱۵ درصد برای کل قاب بوده است.



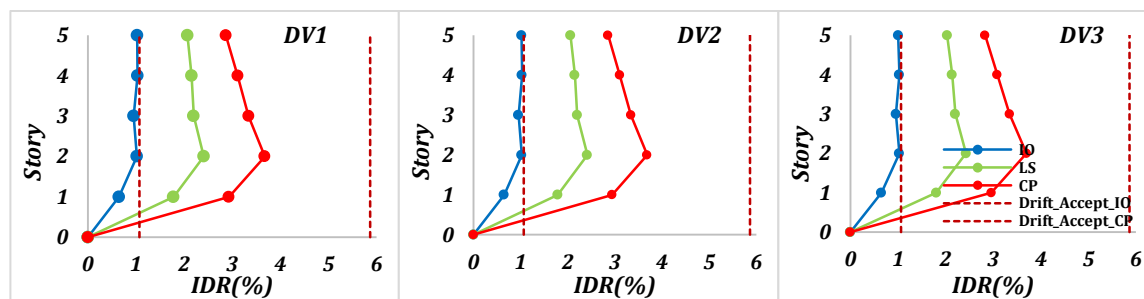
شکل ۷- سازه مورد بررسی در این مطالعه

جدول ۲- فهرست مقاطع مورد استفاده در بهینه‌سازی قاب ۵ طبقه

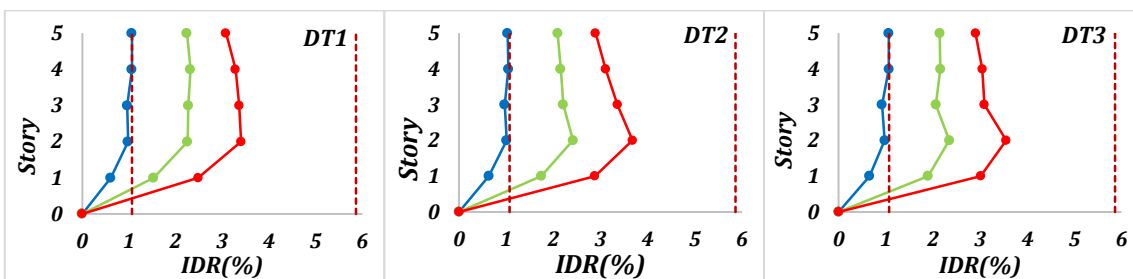
Columns				Beams			
1	W14×48	13	W14×257	1	W12×19	13	W21×50
2	W14×53	14	W14×283	2	W12×22	14	W21×57
3	W14×68	15	W14×311	3	W12×35	15	W24×55
4	W14×74	16	W14×342	4	W12×50	16	W21×68
5	W14×82	17	W14×370	5	W18×35	17	W24×62
6	W14×132	18	W14×398	6	W16×45	18	W24×76
7	W14×145	19	W14×426	7	W18×40	19	W24×84
8	W14×159	20	W14×455	8	W16×50	20	W27×94
9	W14×176	21	W14×500	9	W18×46	21	W27×102
10	W14×193	22	W14×550	10	W16×57	22	W27×114
11	W14×211	23	W14×605	11	W18×50	23	W30×108
12	W14×233	24	W14×665	12	W21×44	24	W30×116

جدول ۳- بهترین حل‌های بدست آمده توسط CMO برای قاب ۵ طبقه با دمپر ویسکوز

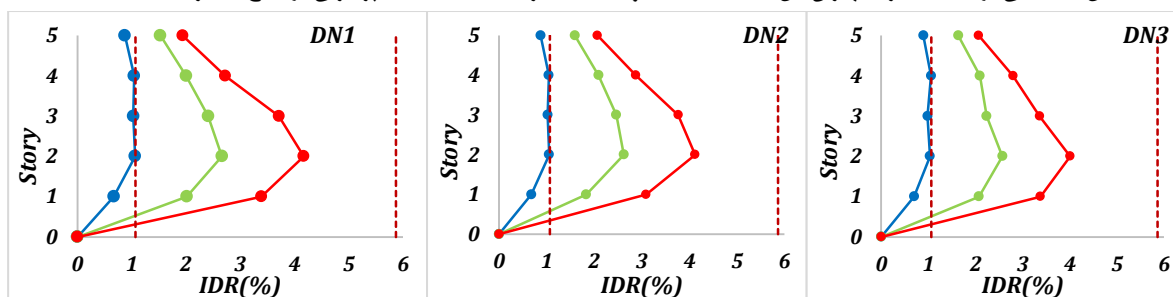
	5DV1	5DV2	5DV3
C_1	W14x48	W14x48	W14x48
C_2	W14x48	W14x48	W14x48
C_3	W14x48	W14x48	W14x48
C_4	W14x68	W14x68	W14x68
C_5	W14x68	W14x68	W14x68
C_6	W14x48	W14x53	W14x68
C_7	W14x68	W14x68	W14x68
C_8	W14x68	W14x68	W14x68
C_9	W14x48	W14x53	W14x68
b_1	W18x35	W18x35	W18x35
b_2	W18x35	W18x35	W18x35
b_3	W18x40	W18x40	W18x40
b_4	W12x22	W12x22	W12x22
b_5	W12x22	W12x22	W12x22
Weight	9470.2240	9518.8433	9661.4596



شکل ۸- منحنی دریفت طبقه برای بهترین حل‌های بدست آمده توسط CMO برای قاب ۵ طبقه با دمپر ویسکوز در سطح عملکرد IO، LS و CP



شکل ۹- منحنی دریفت طبقه برای بهترین حل های بدست آمده توسط CMO برای قاب ۵ طبقه با دمپر جرمی در سطح عملکرد IO، LS و CP



شکل ۱۰- منحنی دریفت طبقه برای بهترین حل های بدست آمده توسط CMO برای قاب ۵ طبقه بدون دمپر در سطح عملکرد IO، LS و CP

جدول ۴- بهترین حل های به دست آمده توسط الگوریتم CMO برای قاب ۵ طبقه با میراثگر TMD

	5DT1	5DT2	5DT3
C_1	W14x48	W14x53	W14x48
C_2	W14x48	W14x48	W14x48
C_3	W14x48	W14x48	W14x48
C_4	W14x68	W14x68	W14x68
C_5	W14x68	W14x68	W14x68
C_6	W14x48	W14x53	W14x53
C_7	W14x68	W14x68	W14x68
C_8	W14x68	W14x68	W14x68
C_9	W14x48	W14x53	W14x53
b_1	W18x40	W18x35	W18x35
b_2	W18x35	W18x35	W18x35
b_3	W18x40	W16x45	W16x45
b_4	W12x22	W12x22	W12x22
b_5	W12x22	W12x22	W12x22
Weight	9470.2240	9518.8433	9661.4596

جدول ۵- بهترین حل‌های به دست آمده توسط الگوریتم CMO برای قاب ۵ طبقه بدون میراگر

	5DN1	5DN2	5DN3
C_1	W14x48	W14x48	W14x68
C_2	W14x48	W14x48	W14x48
C_3	W14x48	W14x48	W14x48
C_4	W14x53	W14x68	W14x68
C_5	W14x68	W14x68	W14x68
C_6	W14x48	W14x48	W14x48
C_7	W14x53	W14x68	W14x68
C_8	W14x68	W14x68	W14x68
C_9	W14x48	W14x48	W14x48
b_1	W18x35	W16x50	W16x45
b_2	W18x35	W18x35	W16x45
b_3	W18x40	W18x40	W18x40
b_4	W12x22	W12x22	W12x22
b_5	W12x35	W12x35	W12x35
Weight	9533.2267	9649.1024	9892.1993

در جداول (۶) تا (۸) نتیجه IDA بهترین حل‌های بدست آمده توسط الگوریتم CMO را برای قاب ۵ طبقه با دمپر ویسکوز، دمپرهای TMD و بدون دمپر به ترتیب نشان داده شده‌اند. همچنین تحلیل دینامیکی افزایشی و منحنی‌های شکنندگی در شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) آورده شده است.

جدول ۶- نتایج IDA برای بهترین حل‌های به دست آمده توسط CMO برای قاب ۵ طبقه با دمپر ویسکوز

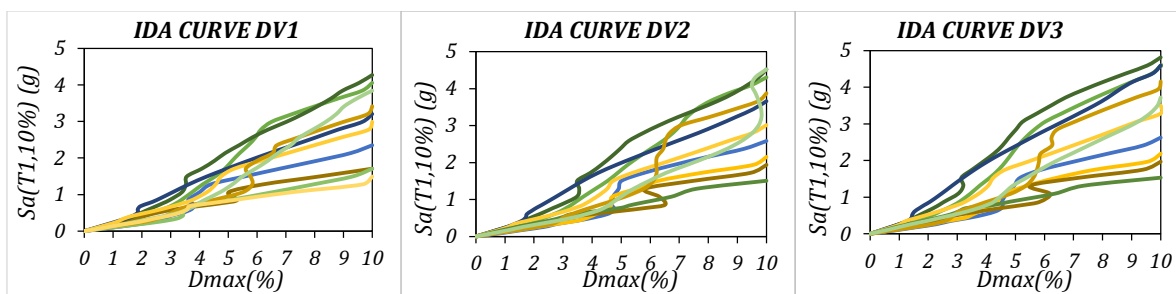
	5DV1	5DV2	5DV3
Ductility	3/8102	3/8103	3/8102
Period(s)	1/0828	1/0819	1/0799
CMR	2/63	2/65	2/64
ACMR	3/42	3/44	3/44

جدول ۷- نتایج IDA برای بهترین حل‌های به دست آمده توسط CMO برای قاب ۵ طبقه با دمپر جرمی

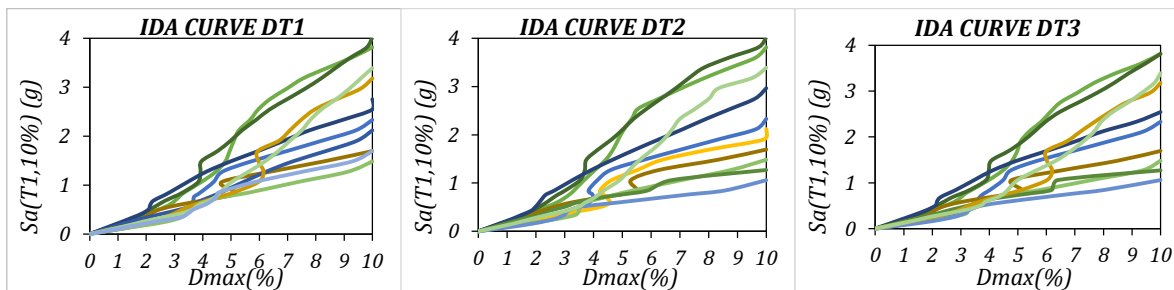
	5DT1	5DT2	5DT3
Ductility	3/7601	3/8103	3/7601
Period(s)	1/0671	1/0806	1/0678
CMR	2.56	2/59	2/60
ACMR	3/18	3/21	3/22

جدول ۸- نتایج IDA برای بهترین حل‌های به دست آمده توسط CMO برای قاب ۵ طبقه بدون دمپر

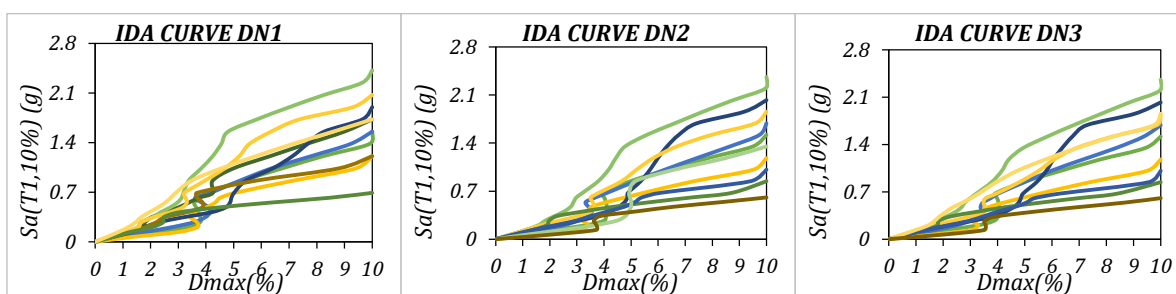
	5DN1	5DN2	5DN3
Ductility	3/8062	3/8063	3.4668
Period(s)	1/0900	1/0900	1/0800
CMR	2/51	2/52	2/54
ACMR	3/13	3/15	3/18



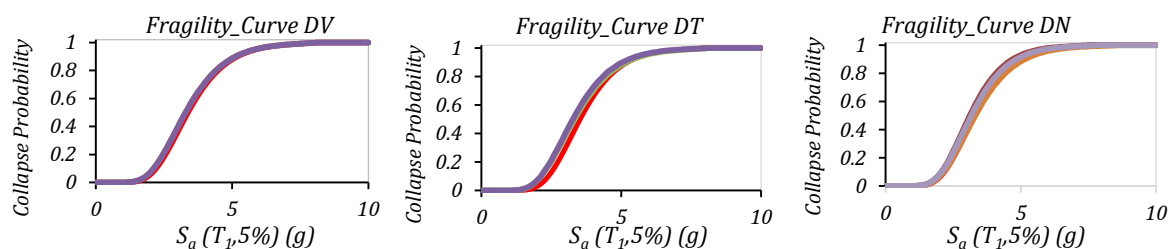
شکل ۱۱- منحنی IDA برای بهترین حل‌های بدست آمده توسط CMO برای قاب ۵ طبقه با دمپر ویسکوز



شکل ۱۲- منحنی IDA برای بهترین حل‌های بدست آمده توسط CMO برای قاب ۵ طبقه با دمپر جرمی



شکل ۱۳- منحنی IDA برای بهترین حل‌های بدست آمده توسط CMO برای قاب ۵ طبقه بدون دمپر



شکل ۱۴- منحنی شکنندگی برای بهترین راه حل‌های بدست آمده توسط الگوریتم CMO برای قاب ۵ طبقه با دمپر ویسکوز، دمپر TMD و بدون دمپر

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی جامع تأثیر جرم تنظیم شده و میراگرهای ویسکوز بر عملکرد فروریزش لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی بهینه‌سازی شده با شکل‌پذیری ویژه، تحت توالی‌های بارگذاری لرزه‌ای پرداخته شد. به منظور دستیابی به طراحی بهینه مبتنی بر عملکرد، یک قاب پنج طبقه انتخاب و الگوریتم فراابتکاری CMO برای بهینه‌سازی پارامترهای سازه‌ای به کار گرفته شد. در این فرایند، محدودیت‌های عملکردی شامل سطوح عملکرد IO (قابلیت استفاده بی‌وقفه) و CP (آستانه فروریزش) مطابق با کد FEMA-350 به‌دقت لحاظ گردید تا سازه به‌گونه‌ای طراحی شود که پاسخ بهینه و مطمئنی در مقابل بارهای لرزه‌ای داشته باشد.

برای تعیین سطوح خطر و تحلیل توالی‌های لرزه‌ای، طیف طراحی آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران به عنوان مرجع استفاده شد و تحلیل‌های غیرخطی پوش (IDA) برای استخراج منحنی‌های شکنندگی فروریزش لرزه‌ای اجرا گردید. این رویکرد امکان ارزیابی دقیق ظرفیت فروریزش و شکنندگی سازه‌ها را در شرایط واقعی بارگذاری لرزه‌ای فراهم کرد و اعتبار نتایج را تضمین نمود.

نتایج تحلیل‌های غیرخطی و بهینه‌سازی نشان داد که افزایش وزن سازه به طور خودکار منجر به بهبود عملکرد لرزه‌ای و کاهش شکنندگی نمی‌شود. این یافته نشان‌دهنده اهمیت بهینه‌سازی دقیق توزیع جرم در سازه‌های فولادی است و بر این نکته تأکید می‌کند که صرف افزایش جرم نمی‌تواند جایگزین طراحی کارآمد و کنترل دقیق انرژی در سازه باشد.

علاوه بر این، بررسی عملکرد قاب‌های مجهز به میراگر ویسکوز نشان داد که این نوع میراگرها می‌توانند به طور قابل توجهی پاسخ لرزه‌ای سازه را بهبود بخشیده و میزان شکنندگی فروریزش لرزه‌ای را کاهش دهند. به طور مشخص، قاب‌های بهینه‌سازی شده با میراگر ویسکوز به ترتیب حدود ۱۰٪ و ۱۳٪ کاهش شکنندگی در مقایسه با قاب‌های بهینه‌سازی شده با میراگر جرمی و قاب‌های فاقد میراگر داشتند. این نتایج مؤید کارایی بالاتر میراگرهای ویسکوز در جذب انرژی و کاهش پاسخ لرزه‌ای نامطلوب قاب‌ها می‌باشد.

در این مطالعه، نرم‌افزار OpenSees به عنوان ابزار تحلیل‌های غیرخطی پاسخ سازه به کار رفت و محیط MATLAB نیز برای پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر عملکرد استفاده گردید. ترکیب این دو نرم‌افزار، امکان بررسی جامع رفتار دینامیکی و بهینه‌سازی چندهدفه سازه را فراهم کرد و نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند راهنمای مناسبی برای طراحی‌های آینده و ارتقای ایمنی لرزه‌ای قاب‌های فولادی باشد.

در نهایت، این تحقیق نشان داد که بهینه‌سازی مبتنی بر عملکرد همراه با استفاده از میراگرهای ویسکوز، رویکردی مؤثر برای افزایش مقاومت لرزه‌ای و کاهش خطر فروریزش قاب‌های خمشی فولادی است. این

یافته‌ها می‌تواند در توسعه آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای و ارتقای روش‌های مهندسی سازه‌های فولادی نقش بسزایی ایفا کند.

منابع

[1] Alexander NA, Schilder F. Exploring the performance of a nonlinear tuned mass damper. J Sound Vib. 2009; 319 (1-2): 445 -462. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.11.027>

[2] Asgarian B, Sadrinezhad A, Alanjari P. Seismic performance evaluation of steel moment resisting frame through incremental dynamic analysis. J Constr Steel Res. 2010; 66 (2): 178 -190. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.09.008>

[3] American Institute of Steel Construction. *Manual of steel construction: Load & resistance factor design*. 2nd ed. Chicago (IL): American Institute of Steel Construction; 2001. Available from: <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/manual/15th-ed-ref-list/load-and-resistance-factor-design-specification-for-structural-steel-buildings.pdf>

[4] Bayat A, Beiranvand P, Ashrafi HR. Vibration control of structures by multiple mass dampers. Jordan J Civ Eng. 2018; 12 (3): 461 -471. Available from: <https://jjce.just.edu.jo/issues/paper.php?p=5281>

[5] American Institute of Steel Construction. *Manual of steel construction: Load & resistance factor design*. 2nd ed. Chicago (IL): American Institute of Steel Construction; 2001. Available from: <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/manual/15th-ed-ref-list/load-and-resistance-factor-design-specification-for-structural-steel-buildings.pdf>

[6] Fathali M, Vaez S. Optimum performance-based design of eccentrically braced frames. Eng Struct. 2020; 202: 109857. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109857>

[7] Fattahi F, Gholizadeh S. Seismic fragility assessment of optimally designed steel moment frames. Eng Struct. 2019; 179: 37 -51. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.061>

[8] Federal Emergency Management Agency. *Recommended methodology for quantification of building system performance and response*

[17] Kaveh A, Sabzi O. Optimal design of reinforced concrete frames using big bang-big crunch algorithm. *Int J Civ Eng*. 2012; 10 (3): 189 -200. Available from:

https://www.iust.ac.ir/ijce/browse.php?a_id=572&sid=1&slc_lang=en

<https://ijce.iust.ac.ir/article-1-572-en.pdf>

[18] Kim SY, Latin CH. Optimum design of linear multiple tuned mass dampers subjected to white noise base acceleration considering practical configurations. *Eng Struct*. 2018; 171: 516 -28. Available from:

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.120>

[19] MathWorks. MATLAB: The language of technical computing [computer software]. Version 2018. Natick, MA: MathWorks Inc.; 2018. Available from:

<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

[20] McKenna F. OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation [Internet]. *Computing in Science & Engineering*. 2011 Jul; 13 (4): 58 -66. Available from:

<https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.66>

[21] Salvi J, Rizzi E. Optimum earthquake-tuned TMDs: Seismic performance and new design concept of balance of split effective modal masses. *Soil Dyn Earthquake Eng*. 2017; 101: 67 -80. Available from:

<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.07.008>

[22] Xu J, Spencer BF, Lu X. Performance-based optimization of nonlinear structures subject to stochastic dynamic loading. *Eng Struct*. 2017; 134: 334 -45. Available from:

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.043>

[23] Zhai Z. An improved performance-based plastic design method for seismic resilient fused high-rise buildings. *Eng Struct*. 2019;199:109650. Available from:

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109650>

[24] Zhang C, Tian Y. Simplified performance-based optimal seismic design of reinforced concrete frame buildings. *Eng Struct*. 2019;185:15-25. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.121>

[25] Dadkhah A, Zareian F, Ahmadi M. Improvement of performance level of steel moment-resisting frames using tuned mass damper system. *Eng Struct*. 2020; 215: 110692. Available from:

parameters (FEMA P695A). Washington (DC): Applied Technology Council; 2009. Available from: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-07/fema_p695.pdf

[10] Federal Emergency Management Agency. *Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings* (FEMA-350). Washington (DC): Federal Emergency Management Agency; 2000. Available from:

<https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-07/fema-350.pdf>

[11] Gholizadeh S, Ebadijalal M. Performance-based discrete topology optimization of steel braced frames by a new metaheuristic. *Adv Eng Softw*. 2018; 123: 77 -99. Available from:

<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.06.008>

[12] Gholizadeh S, Kamyab R. Performance-based design optimization of steel frames by an improved quantum particle swarm optimization. *Adv Eng Softw*. 2014; 71: 143 -162. Available from:

<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.02.003>

[13] Hugo A, Pezeshk S, Foley M. Performance-based optimization considering both structural and nonstructural components. *Earthq Spectra*. 2007; 23 (3): 685 -709.

Available from: <https://doi.org/10.1193/1.2753994>

[14] Hardyniec A, Charney F. A new efficient method for determining the collapse margin ratio using parallel computing. *Comput Struct*. 2015; 148: 15 -25. Available from:

<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.11.004>

[15] Hwang S, Lignos D. Earthquake-induced loss assessment of steel frame buildings with special moment frames designed in highly seismic regions. *Earthq Eng Struct Dyn*. 2017; 46 (13): 2141-2162. Available from: <https://doi.org/10.1002/eqe.2918>

[15] Hussan M, Rahman MS, Sharmin F, Kim D, Do J. Multiple tuned mass damper for multi-mode vibration reduction of offshore wind turbine under seismic excitation. *Ocean Eng*. 2018;160: 449 -460. Available from:

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.039>

[16] Naudi JA. Active isolation and innovative tuned mass dampers for vibration reduction [dissertation]. Berkeley (CA): University of California, Berkeley; 1993. Available from:

<https://nisee.berkeley.edu/elibrary/list?a=621&start=1>



<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110692>

[26] De Domenico D, Hajirasouliha I. Multi-level performance-based design optimisation of steel frames with nonlinear viscous dampers. *Bull Earthquake Eng.* 2021;19(3):1201–27. Available from:

<https://doi.org/10.1007/s10518-021-01152-7>

[27] Lan S, Zhang Y, Wu J. Study on the influence and optimization design of viscous damper parameters on the damping efficiency of frame shear wall structure. *Buildings.* 2024; 14 (2): 497. Available from:

<https://doi.org/10.3390/buildings14020497>

[28] Mohebbi M, Bakhshinezhad M. Seismic risk-based optimal design of fluid viscous dampers for seismically excited nonlinear structures. *Nat Hazards.* 2021; 105:2121–45. Available from:

<https://doi.org/10.1007/s11069-020-04445-2>

[29] Pollini N. Fail-safe optimization of viscous dampers for seismic retrofitting [preprint]. 2020. Available from: <https://arxiv.org/abs/2004.03442>

[30] Shirkhani R, Shakeri M, Tabatabaiefar H. Performance-based optimal distribution of viscous dampers in structure using hysteretic energy compatible endurance time excitations [preprint]. 2021. Available from:

<https://arxiv.org/abs/2107.12983>

[31] Chen J, Liu W. Effects of tuned mass damper on seismic performance of steel moment-resisting frames. *J Constr Steel Res.* 2019;159:310–22. Available from:

<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.06.015>