

Earthquake Effect on Steel Frame with Cable Bracing and Magnetorheological (MR) Damper

Mahdi Abbasi¹, Majid Barghian^{2*} 

1. M.Sc. Student, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2. Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract

Designing earthquake-resistant structures and mitigating the resulting damages has always been a critical concern. One effective approach to reduce seismic vibrations in steel frames is the use of cable bracing systems. However, a limitation of cable braces is that not both brace members engage fully under lateral loads. Another method to enhance structural performance under seismic forces is the use of dampers. In this study, magnetorheological (MR) dampers and cable braces are simultaneously employed. MR dampers, widely used in vibration and impact control systems, are semi-active devices. When the MR fluid is subjected to a magnetic field generated by an electromagnetic coil, iron particles in the fluid align and form linear chains parallel to the magnetic flux. Without an applied magnetic field, the MR fluid behaves like a conventional fluid. This research implements cable braces combined with MR dampers in steel frames. Initially, previous studies on cable braces in structures are reviewed, followed by investigations on MR dampers in various structural systems, and then studies combining cables with MR dampers are examined. Prior research has mainly focused on semi-active cable braces with MR dampers in cable-stayed bridges, modeled in Ansys and OpenSees software with favorable results. This study extends the application to steel frames modeled in SAP2000. The MR damper model used is RD-1005-3, manufactured by Lord Corporation. Validation of the damper in the software is performed using the Torabi model, while the Abhari model is utilized for cable braces. The aim of this study is to evaluate the behavior of steel frames equipped with cable braces and MR dampers under nonlinear static analysis and nonlinear dynamic time-history analysis considering P-Delta effects and large displacements. To assess the proposed system's efficiency, four types of steel frames—with no cables or dampers, with cable braces, with MR dampers, and with both cable braces and MR dampers—featuring one-span and two-span configurations, are selected. Their behavior under nonlinear static lateral loads and seismic excitations is analyzed in SAP2000. Nonlinear static analysis results for the one-span frame indicate the highest lateral displacement occurs in the frame without cables or dampers. Adding cable braces reduces lateral displacement significantly, while adding MR dampers alone causes negligible change. The combined system yields the lowest lateral displacement; for example, displacement at node 4 decreases by approximately 81.34%. Dynamic time-history analyses of the one-span frames under the Trinidad, Landers, and Tabas earthquakes show that adding cable braces significantly reduces lateral displacement and internal forces in beams and columns in all cases. Adding MR dampers alone most effectively reduces these responses under the Trinidad earthquake. The combined system further improves reductions under all earthquakes. Overall, the one-span steel frame with both cable braces and MR dampers exhibits the best seismic performance. Similar trends are observed for two-span frames, where cable braces reduce lateral displacement and internal forces in all earthquakes. MR dampers alone show the most significant reductions under the Trinidad earthquake. The combined system consistently achieves the greatest reductions. For instance, under the Landers earthquake, lateral displacement at node 4 in the two-span frame reduces by 86.23% with cable braces alone, and by 92.34% with the combined system. In summary, the proposed cable brace and MR damper system effectively improves seismic performance by substantially reducing lateral displacements and internal forces under lateral loads.

Review History

Received: Aug 25, 2024

Revised: Oct 22, 2024

Accepted: Nov 20, 2024

Keywords

Magnetorheological (MR)
Damper
Cable Bracing
Steel Frame
Seismic Load

* Corresponding Author Email: Barghian@tabrizu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-8765-7958



اثر زلزله روی قاب فولادی با مهاربند کابلی و میراگر رئولوژی مغناطیسی

مهدی عباسی^۱، مجید برقیان^{۲*} 

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله و کاهش خسارت‌های ناشی از آن، همواره مورد توجه بوده است. یکی از روش‌های کاهش ارتعاشات زلزله در قاب‌های فولادی، استفاده از مهاربند کابلی است. همچنین، از روش‌های بهبود رفتار سازه در برابر بارهای لرزه‌ای، استفاده از میراگرها است. در این پژوهش، میراگر رئولوژی مغناطیسی و مهاربند کابلی به صورت همزمان به کار برده شده است. برای بررسی کارایی سیستم پیشنهادی، چهار قاب فولادی بدون کابل و میراگر، فولادی با مهاربند کابلی، فولادی با میراگر رئولوژی مغناطیسی و فولادی با مهاربند کابلی به همراه میراگر رئولوژی مغناطیسی که دارای یک دهانه و دو دهانه است، انتخاب شده و رفتار این قاب‌ها با فرض شرایط مختلف، تحت بار جانبی استاتیکی غیرخطی و بارهای لرزه‌ای در نرم‌افزار SAP2000 بررسی شده است. با بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی حالت یک دهانه، نتیجه می‌شود که قاب فولادی با مهاربند کابلی و میراگر رئولوژی مغناطیسی، تغییر مکان جانبی قاب و اغلب تلاش‌های داخلی تیر و ستون را بیشتر از سایر قاب‌ها کاهش می‌دهد. با بررسی نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی حالت یک دهانه و دو دهانه، نتیجه می‌شود که سیستم پیشنهادی در اکثر زلزله‌های بررسی شده، تغییر مکان جانبی قاب و تلاش‌های داخلی تیر و ستون را بیشتر از سایر قاب‌ها کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، استفاده از مهاربند پیشنهادی، سبب بهبود عملکرد سازه در برابر بارهای جانبی می‌شود.

کلمات کلیدی

میراگر رئولوژی مغناطیسی

مهاربند کابلی

قاب فولادی

بار لرزه‌ای

۱- مقدمه

سیالات رئولوژی مغناطیسی است که به عنوان سیستم الحاقی به

سازه اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

میراگرهای MR به طور گسترده در سیستم‌های کنترل لرزش و

ضربه به کار گرفته شده و از دستگاه‌های کنترل نیمه فعال^۲ هستند.

سیستم‌های کنترل نیمه فعال که می‌توان آن‌ها را سیستم‌های کنترل

غیرفعال^۳ قابل تنظیم نیز نامید، مجهز به میراگرهایی هستند که در هر

لحظه قابل کنترل بوده ولی قادر به اعمال انرژی به سازه نیستند [1].

سیستم‌های مختلفی در قاب‌های فولادی برای کاهش

ارتعاشات زلزله می‌توان استفاده کرد که به منظور بهبود ویژگی‌های

رفتاری روی سازه انجام می‌شود. استفاده از کابل به عنوان سیستم

مهاربندی الحاقی به سازه اصلی است. کابل را می‌توان به عنوان

یک عنصر کششی محض در سازه استفاده کرد. یکی از روش‌های

دیگر، استفاده از میراگرهای رئولوژی مغناطیسی^۱ (MR) مبتنی بر

² Semi Active Control Devices

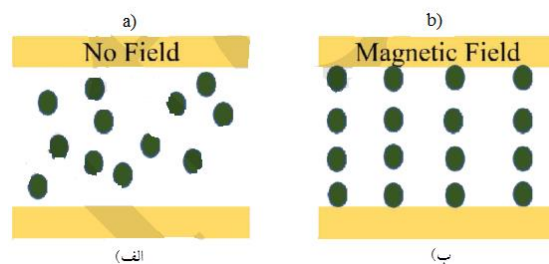
³ Passive Control Devices

¹ Magnetorheological

* رایانامه نویسنده مسئول: ORCID - Barghian@tabrizu.ac.ir 0000-0002-8765-7958

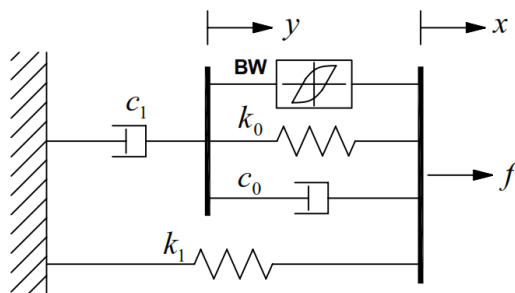
کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، باز نشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.





شکل ۱. ذرات مغناطیسی سیال MR (الف) بدون میدان مغناطیسی (ب) با اعمال میدان مغناطیسی [۳]

Fig. 1. MR fluid magnetic particles a) without magnetic field b) with application of magnetic field [3]



شکل ۲. شماتیک مدل بوک-ون برای میراگرهای MR [۲]

Fig. 2. Schematic Bouc-Wen model for MR dampers [2]

مانند یک سیال معمولی رفتار می‌کند. تشکیل زنجیره‌های خطی موازی در شکل (۱) نشان داده شده است [3&2].

۲-۱- مدل‌سازی میراگرهای رئولوژی مغناطیسی

میراگرهای MR با مدل‌های زیادی مشخص شده است. مدل‌های میراگرهای MR، از نظر دقت، سادگی و استحکام متفاوت هستند. چند مدل برای میراگرهای MR در این قسمت اشاره شده است. مدل بینگهام^۱: این مدل شامل یک میراگر و یک عنصر اصطکاکی^۲ به صورت موازی است. این مدل پیش‌بینی خوبی از رابطه نیرو-جابجایی برای میراگرهای MR ارائه نمی‌دهد و به طور کامل نمی‌تواند رفتار وابسته به فرکانس یک میراگر MR را توصیف کند [4 & 1].

مدل بوک-ون^۳: از آنجایی که مدل بوک-ون می‌تواند رفتار میراگرهای MR را به خوبی پیش‌بینی کند، بسیاری از پژوهشگران از این مدل برای شبیه‌سازی عددی سازه‌ها با میراگرهای MR استفاده کردند. شماتیک این مدل در شکل (۲) نشان داده شده است [4 & 1].

در سالیان گذشته بلایای طبیعی از جمله زلزله باعث خسارت‌های مالی و جانی بسیاری شده‌اند. بنابراین طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله و کاهش خسارت‌های ناشی از آن همواره مورد توجه بوده است. سیستم‌های مختلفی در قاب‌های فولادی برای کاهش ارتعاشات زلزله می‌توان استفاده کرد. کابل را می‌توان به عنوان یک عنصر کششی محض در سازه استفاده کرد. اما کابل در برابر فشار مقاومت قابل توجهی ندارد، به همین دلیل در این پژوهش از میراگر رئولوژی مغناطیسی با مهاربند کابلی به عنوان سیستم الحاقی به سازه اصلی مورد استفاده قرار گرفته است. تا رفتار قاب فولادی با مهاربند کابلی و میراگر MR تحت تحلیل‌های مختلف بررسی شود.

۱-۱- معرفی میراگرهای رئولوژی مغناطیسی

به طور کلی میراگرهای MR شامل میله پیستون، سر پیستون، سیم‌پیچ، پیستون‌های داخلی و خارجی، سیال MR و استوانه است. هنگامی که سیال MR توسط سیم‌پیچ الکترومغناطیسی، تحت یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، ذرات آهن در سیال در یک راستا قرار گرفته و زنجیره‌های خطی موازی با خط شار مغناطیسی تشکیل می‌دهند. سیال MR بدون میدان مغناطیسی اعمال شده

¹ Bingham Model

² Friction Element

³ Bouc-Wen Model

۲- پیشینه پژوهش

در این پژوهش مهاربند کابلی همراه با میراگر MR در قاب فولادی به کار گرفته شده است. به همین منظور، ابتدا مطالعاتی که از مهاربند کابلی در سازه‌ها استفاده کرده‌اند مورد بررسی قرار می‌گیرند و سپس مطالعاتی که از میراگر MR در انواع سازه‌ها استفاده کرده‌اند، بررسی می‌شود. در ادامه نیز، مطالعات مرتبط با کابل همراه با میراگر MR در انواع سازه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱- استفاده از مهاربند کابلی و روش اجزای محدود

نجفی و برقیان در سال ۲۰۱۴ میلادی نوعی مهاربند جدید کابلی ضربدری همراه با صفحه فولادی را پیشنهاد داده و مدل پیشنهادی را با قاب بدون مهاربندی و قاب با مهاربندی ضربدری مقایسه کرده‌اند. قرار دادن صفحه فولادی باعث شده است که نیروی همه کابل‌ها به صورت کششی کار کنند. در حالی که در مهاربند ضربدری فقط یکی از کابل‌ها به کشش کار می‌کند. نتایج حاصل به این شرح است که با قراردادن صفحه در وسط مهاربندی در هر طبقه، جابه‌جایی نسبت به حالت قاب با مهاربند ضربدری، بیشتر شده اما از جابه‌جایی قاب بدون مهاربند، کمتر است [5]. ابهری و برقیان در سال ۲۰۱۸ میلادی سیستم جدیدی از آرایش مهاربندی کابلی در قاب دوبعدی بتنی ارائه کرده‌اند. صفحه فولادی در وسط قاب قرار گرفته و کابل‌ها به این صفحه متصل شده‌اند. نتایج نشان دادند که تمامی اعضای مهاربندی تحت اثر بار جانبی شل نشده و تحت کشش باقی مانده‌اند. تغییرات قطر کابل تأثیر قابل توجهی در مقادیر تغییر مکان جانبی قاب و تلاش‌های داخلی تیرها و ستون‌ها دارد. قاب مهاربندی شده با کابل همراه با صفحه فولادی، ویژگی‌های شکل‌پذیری مناسب و سختی زیاد را به صورت همزمان دارد [6]. افتخاری و همکاران در سال ۲۰۲۰، کنترل ارتعاش بهینه تیرهای ریز چندلایه فعال شده توسط لایه پیزوالکتریک بر اساس تئوری‌های الاستیسیته تنش زوجی اصلاح شده و تنش سطحی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مقیاس طول مواد کوچک در نظر گرفته شده در تئوری تنش زوجی اصلاح شده، نقش کلیدی در پاسخ کنترل ارتعاش تیر ریز یکپارچه شده با لایه‌های

پیزوالکتریک ایفا می‌کند [19]. حجازی و همکاران در سال ۲۰۲۳ از مدل ساختاری الاستوپلاستیک مبتنی بر روش المان محدود سه‌بعدی برای تأثیر پارامترهای صلبیت و انعطاف‌پذیری بر رفتار پی روسازه استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داده است که اجزای روسازه مانند دیوارهای برشی و دیوار زیرزمین می‌توانند به طور قابل توجهی بر انحراف، تنش‌برشی و لنگر خمشی پی گسترده و طراحی سازه‌ای آن تأثیر بگذارد [7]. چن و همکاران در سال ۲۰۲۳ نانولوله‌های کربنی دوجداره را تحت گرادیان‌های دما و میدان‌های الکتریکی مورد مطالعه قرار داده‌اند نتایج نشان داده است که با افزایش شعاع خارجی لوله‌های نانو، فرکانس بدون بعد اول کاهش می‌یابد [8].

۲-۲- استفاده از میراگر رئولوژی مغناطیسی

فرهمندآذر و همکارانش در سال ۲۰۱۱ میلادی پاسخ کنترل نیمه‌فعال ساختمان‌های بلند مجهز به میراگرهای MR را مورد بررسی قرار داده‌اند. الگوریتم کنترل گیره شده بهینه مبتنی بر تنظیم‌کننده درجه دوم خطی^۱ (LQR) برای طراحی کنترل کننده نیمه‌فعال و مدل بوک-ون برای بررسی رفتار غیرخطی میراگرهای MR استفاده شده است. نتایج حاصل نشان داده است که عملکرد بهینه میراگرهای MR زمانی حاصل می‌شود که در طبقات بالایی نصب شده‌اند. علاوه بر این، میراگرهای MR قابل انطباق بوده و قادر به کاهش پاسخ سازه‌ای در طول زمان تحریک زلزله هستند [9]. اوزگه شاهین و همکارانش در سال ۲۰۲۱ میلادی کارایی الگوریتم‌های کنترل نیمه‌فعال مرتبط با میراگرهای MR برای کنترل لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی را مقایسه کرده‌اند. سازه‌ای ۵ طبقه که میراگر MR بین زمین و طبقه اول نصب بوده، روی میز لرزه‌ای تحت سوابق تاریخی زلزله ارزیابی شده است. سه الگوریتم کنترل مختلف یعنی، مشتقی انتگرالی تناسبی^۲ (PID)، کنترل حالت کشویی^۳ (SMC) و کنترل مبتنی بر انرژی^۴ (EBC) روی سیستم اعمال شده است. نتیجه شده است که هریک از کنترل‌های نیمه‌فعال عملکرد بهتری از کنترل غیرفعال دارند [10]. یانگ و

¹ Linear Quadratic Regulator

² Proportional-Integral-Derivative

³ Sliding Mode Control

⁴ Energy-Based Controller

مغناطیسی به صورت نیمه فعال بیشتر در پل‌های کابلی استفاده شده و در نرم‌افزارهای ANSYS و Opensis مدل‌سازی شده و نتایج به دست آمده است. در این پژوهش مهاربند کابلی با میراگر رئولوژی مغناطیسی به صورت غیرفعال (جریان ثابت) در قاب‌های فولادی استفاده شده و در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی و نتایج به دست خواهد آمد.

۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از سیستم جدیدی برای کاهش اثر زلزله روی قاب‌های فولادی استفاده شده است که شامل مهاربند کابلی و میراگر MR است. هدف این پژوهش بررسی رفتار قاب فولادی با مهاربند کابلی و میراگر رئولوژی مغناطیسی تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی با در نظر گرفتن اثر P-Delta و تغییر مکان‌های بزرگ است. برای مدل‌سازی و بررسی نتایج، از نرم‌افزار SAP2000 استفاده شد.

۳-۱- مشخصات و مدل‌سازی میراگرهای رئولوژی مغناطیسی مورد استفاده

میراگرهای MR به کار برده شده در این پژوهش مدل RD-1005-3 است که توسط شرکت لرد ساخته شده است. در شکل (۳) نمودارهای نیرو-جابجایی و نیرو-سرعت این مدل میراگرها نشان داده شده‌اند. مشخصات میراگرهای MR مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) آورده شده است. برای مدل‌سازی میراگر MR از گزینه Link Properties در نرم افزار SAP2000 به کار برده شده است. در تحلیل‌های مورد نظر به صورت غیرخطی، برای مدل‌سازی میراگر MR نیاز به ضریب میرایی، سختی و توان میرایی^۵ است.

اگر از عضو میراگر انتظار رفتار خالص میرایی^۶ داشته باشیم، باید سختی به اندازه‌ای بزرگ انتخاب شود که نسبت ضریب میرایی به سختی، تقریباً دو تا سه مرتبه کوچکتر از $\frac{1}{\omega_n}$ شود که ω_n برابر فرکانس طبیعی سازه است [15].

همکارانش در سال ۲۰۲۲ میلادی یک سازه به شکل L با میراگرهای MR را برای تجزیه و تحلیل عملکرد کاهش لرزه‌ای چند بعدی و مشخصه ارتعاش پیچشی بررسی کرده‌اند. نتایج حاصل نشان داده است که آرایش معقول میراگرهای MR می‌تواند جابه‌جایی، شتاب، نیروی برشی، ارتعاش چند بعدی و پاسخ ارتعاش پیچشی سازه‌هایی با قاب به شکل L را به طور مؤثر کاهش دهد [11].

۳-۲- استفاده از مهاربند کابلی و میراگر رئولوژی مغناطیسی

سلطان و همکارانش در سال ۲۰۱۵ میلادی یک مدل جدید برای میراگرهای MR پیشنهاد کرده‌اند. مدل پیشنهادی سلطان که مدل هیسترتیک منظم بینگهام^۱ (HRB) نامیده شده است، برای بررسی طولانی‌ترین کابل پل ترکیه‌ای رادس^۲ در تونس در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌های عددی نشان داده است که مدل HRB پیشنهادی قادر است ارتعاشات آزاد و اجباری کابل را بهتر از مدل بینگهام کنترل کند [12]. وانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۹ میلادی، ۳۰ میراگر MR استفاده شده برای کنترل ارتعاش کابل‌های پل دانگتینگ در چین را انتخاب کرده و رفتار مکانیکی بلند مدت آن‌ها را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داده است که ۲۴ میراگر در بین میراگرهای استفاده شده پس از کارکرد نیز قادر به ایجاد نیروی میرایی قابل توجه هستند. با این حال، ضریب میرایی معادل و دامنه نیروی میرایی این ۲۴ میراگر استفاده شده به طور متوسط ۳۲/۴ درصد و ۲۹/۸ درصد کاهش یافته است [13]. جوادی نسب و همکارانش در سال ۲۰۲۰ میلادی چندین الگوریتم کنترل فازی نیمه فعال برای کاهش ارتعاش پل کابلی لالی^۳ ارائه کرده‌اند. نتایج نشان داده است که سیستم‌های کنترل نیمه فعال پیشنهادی می‌تواند بیشترین مقدار جابه‌جایی عرشه را تا ۸۰ درصد برای مقادیر کوچک بیشترین شتاب زمین^۴ (PGA) و بیش از ۴۰ درصد برای مقادیر بزرگ PGA کاهش دهد [14].

در مطالعات قبلی، مهاربند کابلی با میراگرهای رئولوژی

¹ Hysteretic Regularized Bingham

² Rades-La Goulette Cable-Stayed Bridge

³ Lali Cable- Stayed

⁴ Peak Ground Acceleration

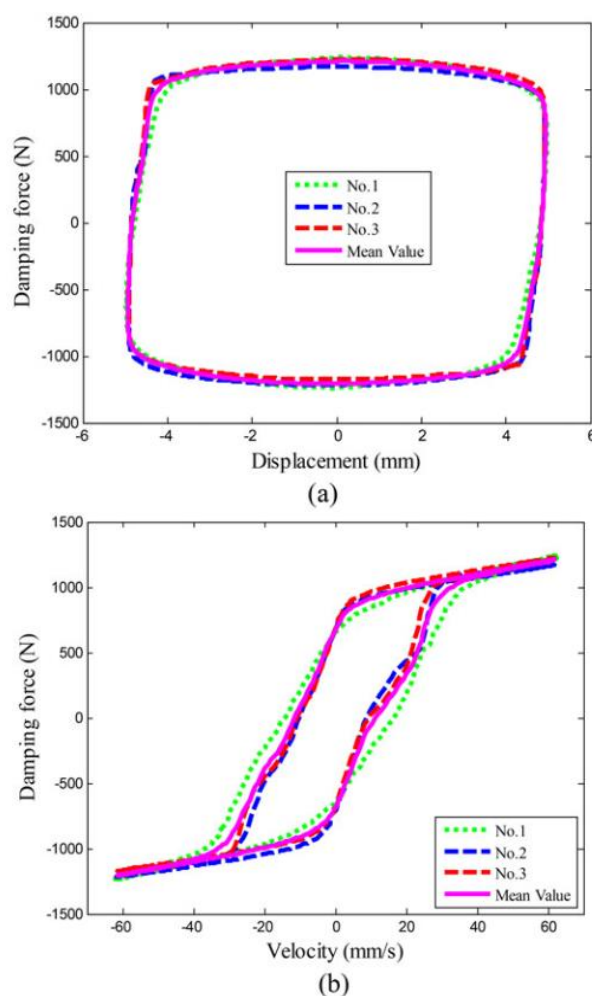
⁵ Damping Exponent

⁶ Pure Damping

جدول ۱. مشخصات میراگر MR مدل RD-1005-3 مورد استفاده [۱۶]

Table 1. Characteristics of MR damper model RD-1005-3 used [16]

Variables	Amounts
Compressed Length	150 Mm
Unfolded Length	208 Mm
Body Diameter	41.4 Mm
Rod Diameter	10 Mm
Weight	800 gr
Minimum Tensile Strength	4.4 KN



شکل ۳. نمودارهای میراگر MR مدل RD-1005-3 (الف) نمودار نیرو-جابجایی (ب) نمودار نیرو-سرعت [۱۳]

Fig. 3. RD-1005-3 model MR damper diagrams a) force-displacement loops b) force-velocity loops [13]

شده و با توجه به جدول (۲) میانگین ضریب میرایی و توان میرایی دو میراگر MR محاسبه شده است. $\bar{C}$ برابر میانگین ضریب میرایی بوده که با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده و $\bar{\alpha}$ برابر میانگین توان میرایی است که در رابطه (۲) مشخص شده است. زمان تناوب مدل مورد نظر برابر 0.1124 ثانیه به دست آمد. بنابراین، فرکانس طبیعی سازه از رابطه (۳) و سختی از رابطه (۴) به دست می‌آید.

مشخصات دینامیکی (ضریب میرایی و توان میرایی) دو میراگر MR از مدل RD-1005-3 در جدول (۲) نشان داده شده‌اند که در این جدول C_0 ضریب میرایی برحسب $\frac{N \cdot s}{m}$ و α توان میرایی است. این دو میراگر تحت تحریک سینوسی در فرکانس ۲ هرتز و با دامنه اولیه ۳ میلی‌متر در جریان‌های ورودی ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ آمپر قرار گرفته‌اند [17&18]. در این پژوهش از میراگر MR با جریان ورودی ۰/۵ آمپر استفاده

جدول ۲. ضریب میرایی و توان میرایی میراگر MR مدل RD-1005-3 [۱۸]

Table 2. Damping coefficient and damping exponent of MR dampers model RD-1005-3 [18]

Current (A)	Damper 021602		Damper 015918	
	C ₀	α	C ₀	α
0	557	0.30	585	0.34
0.25	2011	0.31	1632	0.34
0.50	2645	0.19	2700	0.28
0.75	3310	0.21	3150	0.21
1	4032	0.21	4150	0.21

$$\bar{C} = \frac{2700 + 2645}{2} = 2672.5 \frac{\text{N.s}}{\text{m}} = 2.6725 \frac{\text{kgf.s}}{\text{Cm}} \quad (۱)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{0.28 + 0.19}{2} = 0.235 \quad (۲)$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0.1124} = 55.872 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (۳)$$

$$\frac{C}{K} = \frac{1}{\omega_n} \rightarrow K = 100C \times \omega_n = 267.25 \times 55.872 \quad (۴)$$

$$\rightarrow K = 14931.79 \frac{\text{kgf}}{\text{Cm}}$$

مقابل سرعت میراگر خطی است. در جدول (۴) نتایج تحلیل کامپیوتری مدل ایجاد شده با مدل ترابی مقایسه شده است.

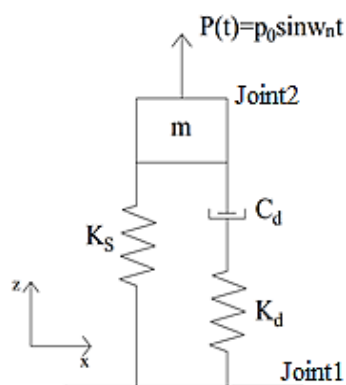
۳-۳- مشخصات شتاب‌نگاشت‌ها

شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده در این پژوهش با فرض نوع خاک ۳ و منطقه با لرزه‌خیزی زیاد ($A=0.35$) در نظر گرفته شد. مولفه‌های افقی سه شتاب‌نگاشت، زلزله‌های Landers، Tabas و Trinidad و مشخصات رکوردهای زلزله برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی در جدول (۵) نشان داده شده است.

۲-۳- درستی آزمایشی میراگر

با توجه به استفاده از میراگر MR، یک نمونه از میراگرها که توسط ترابی [15] ارائه شده، در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شده و نتایج به دست آمده با نتایج مرجع مقایسه شده است. در شکل (۴) شماتیک مدل نشان داده شده است.

سختی عضو اتصال فنر خطی فرض شده و با K_s نشان داده شده است. سختی و میرایی عضو میراگر به ترتیب با K_d و C_d و جرم گره با m دامنه بارگذاری با P_0 و فرکانس بارگذاری با ω_n نشان داده شده است. مقادیر فوق در جدول (۳) نشان داده شده است. توان میرایی میراگر، برابر با ۱ است به این معنی که نیرو در



شکل ۴. شماتیک مدل جرم-فنر-میراگر مورد بررسی توسط ترابی

Fig. 4. Schematic of mass- spring- damper model studied by Torabi

جدول ۳. مشخصات میراگر ارائه شده توسط ترابی [۱۵]

Table 3. Damper specifications provided by Torabi [15]

Variables	Amounts
Spring stiffness in linear mode (K_s)	100 $\frac{Kips}{in}$
Damper stiffness in linear mode (K_d)	0 $\frac{Kips}{in}$
Damper stiffness in nonlinear mode (K_d)	10000 $\frac{Kips}{in}$
Damping of the damper member in linear mode (C_d)	0 $\frac{Kips.s}{in}$
Damping of the damper member in nonlinear mode (C_d)	1 $\frac{Kips.s}{in}$
Mass of the node (m)	1 $\frac{Kips.s^2}{in}$
Loading amplitude (P_0)	10 Kips
Loading frequency (ω_n)	10 $\frac{rad}{s}$

جدول ۴. مقایسه نتایج تحلیل کامپیوتری مدل ایجاد شده با مدل ترابی برای تغییر مکان U_z گره ۲

Table 4. Comparison of the results of computer analysis of the created model with the Torabi model for displacement of U_z node 2

Output in time	Torabi results [15]	Present analysis results	Difference percentage
0.5s	-0.1048	-0.1051	0.209
5s	-0.8887	-0.8914	0.298
11s	0.99453	0.9943	0.023

جدول ۶. مقایسه تغییر مکان جانبی گره ۴ در قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی

Table 6. Comparison of lateral displacement of node 4 in steel flexural frame with cable bracing

Lateral displacement (Cm)	Difference percentage
Abhari model [6]	12.21
Analyzed model	12.18
	0.245

جدول ۵. مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده برای تحلیل دینامیکی

Table 5. Characteristics of earthquake records used for dynamic analysis

Earthquake name	Station name	PGA (g)	PGA (g) after the scale
Tabas	Tabas	0.8360	0.35
Landers	Baker fire station	0.1077	0.35
Trinidad	Rio Dell overpass-w ground	0.1511	0.35

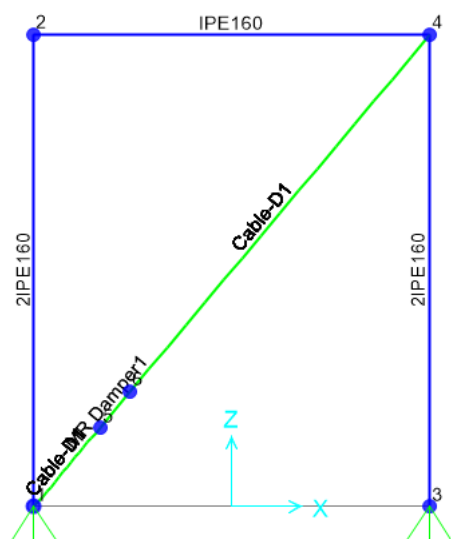
قاب تحلیل شده توسط ابهری و مقایسه نتایج در جدول (۶) نشان داده شده است.

۴- مدل پیشنهادی و نتایج آن

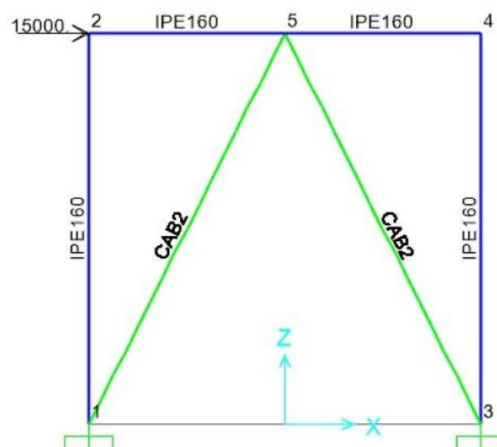
مدل پیشنهادی ارائه شده، ترکیبی از سیستم مهاربند کابلی با میراگر MR است. هدف از ارائه مدل پیشنهادی این است که قابها تحت اثر بارهای جانبی رفتار بهتری از خود نشان دهند. کابلها تحت اثر نیروهای پیش تنیده، کششی هستند. در شکل (۶) مدل پیشنهادی در این پژوهش، نشان داده شده است. قاب با مشخصات فولاد ST37 و کابل پیش تنیده با تنش تسلیم $16000 \frac{Kgf}{Cm^2}$ و مدول ارتجاعی $1.97 \times 10^6 \frac{Kgf}{Cm^2}$ در نظر گرفته شده است.

۳-۴- درستی آزمایشی مهاربند کابلی

برای درستی آزمایشی، قابهای تحلیل شده توسط ابهری [6]. در نرم افزار SAP2000 مدل سازی شده و نتایج به دست آمده مقایسه شده اند. در تحلیل مدلها از حالت استاتیکی غیرخطی تحت بار جانبی استفاده شده است. قاب مدل سازی شده یک طبقه و یک دهانه، با ارتفاع و دهانه ۳ متر در نظر گرفته شده است. برای ستونها و تیرها از مقطع فولادی IPE160 و برای مهاربند کابلی از کابل با قطر ۲ سانتی متر استفاده شده است. نیروی پیش تنیدگی کابلها برابر ۲۰۰ کیلوگرم نیرو لحاظ شده است [6]. ابهری به جای کابل، مشخصات سیم بکسل که مقاومتی شبیه ST37 را دارد، استفاده کرده است. در شکل (۵)



شکل ۶. مدل پیشنهادی در این پژوهش
Fig. 6. Proposed model in this research



شکل ۵. قاب خمشی فولادی با مهاربند کابلی در نظر گرفته شده توسط ابهری [۶]
Fig. 5. Steel flexural frame with cable bracing considered by Abhari [6]

کابلی، تغییرمکان جانبی کاهش یافته است. در قاب فولادی با میراگر MR، تغییرمکان گره مورد نظر نسبت به قاب فولادی بدون کابل و میراگر تغییری نکرده است. کمترین تغییرمکان گره ۴ نیز مربوط به قاب فولادی با مهاربند کابلی و میراگر MR است.

۳-۴- تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی مدل‌های یک دهانه تحت بار لرزه‌ای

شتاب‌نگاشت‌های Tabas، Landers و Trinidad برای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در نظر گرفته شدند. تغییرمکان جانبی گره ۴ در جهت X برای قاب فولادی با مهاربند کابلی و میراگر MR تحت زلزله‌های مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است. در جدول (۸) مقدار بیشترین و کمترین تغییرمکان جانبی گره ۴ در جهت X در قاب‌های مورد بررسی تحت زلزله‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به جدول، با افزودن مهاربند کابلی به قاب بدون کابل و میراگر، مقدار بیشترین و کمترین تغییرمکان‌های جانبی منفی شده و مقدار تغییرمکان جانبی در هر سه زلزله کاهش یافته است. افزودن میراگر MR به قاب بدون کابل و میراگر، تغییرمکان‌های جانبی سه زلزله را به طور قابل توجه کاهش داده است. افزودن مهاربند کابلی با میراگر MR به قاب بدون کابل و میراگر، مقدار بیشترین و کمترین تغییرمکان‌های جانبی منفی شده و در هر سه زلزله کاهش تغییرمکان‌های جانبی بسیار محسوس است.

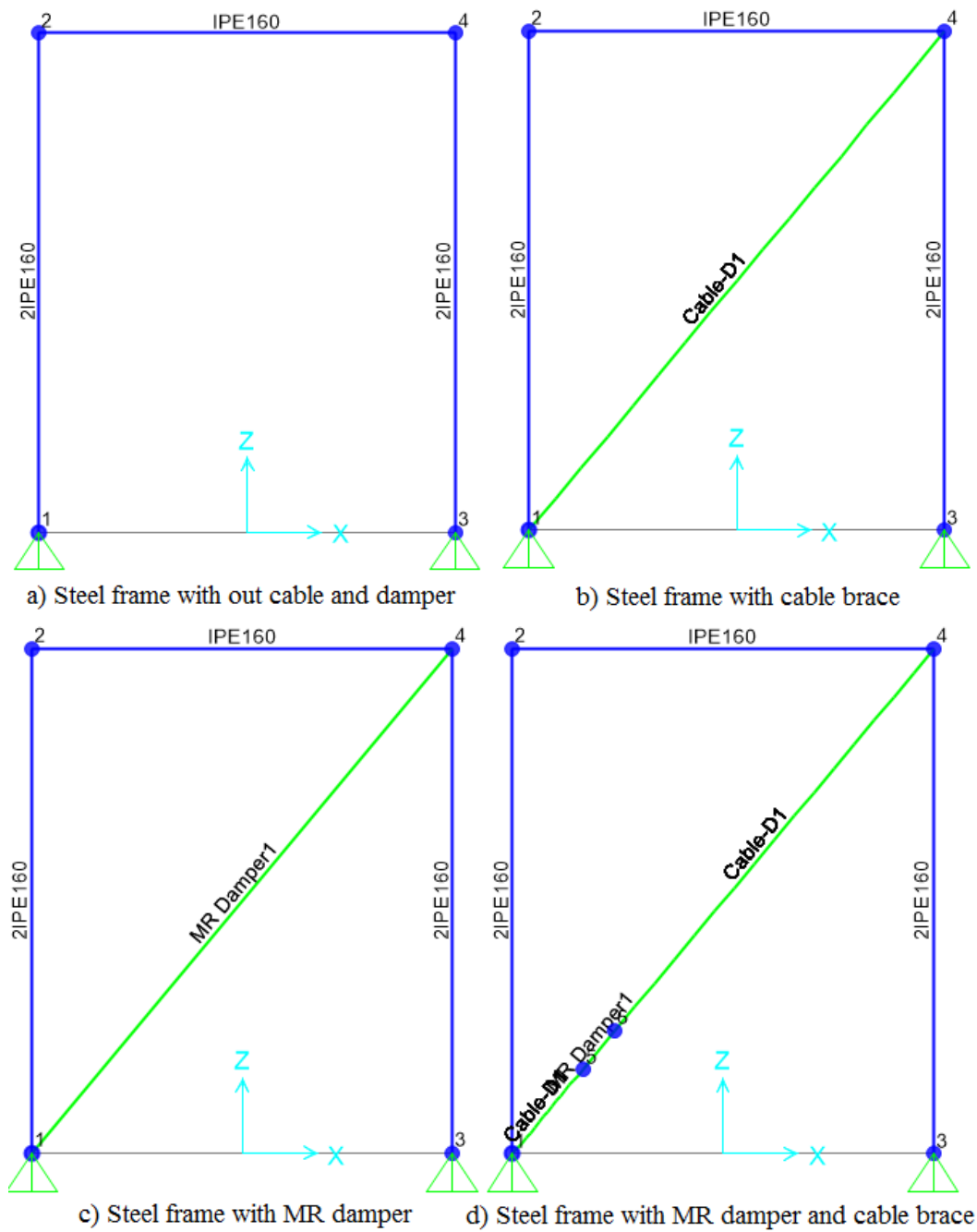
۴-۱- مشخصات سیستم‌های سازه‌ای یک دهانه

در این قسمت چهار قاب دوبعدی فولادی دارای یک دهانه، مطابق شکل (۷) بررسی شده‌اند. در شکل (۷)، الف) مربوط به قاب فولادی بدون کابل و میراگر، ب) مربوط به قاب فولادی با مهاربند کابلی، ج) مربوط به قاب فولادی با میراگر MR و د) مربوط به قاب فولادی با مهاربند کابلی و میراگر MR است. قاب‌های مورد نظر در نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

هر چهار قاب، تحت بار جانبی ۵۰۰۰ کیلوگرم نیرو در گره ۲ (گره بالای قاب سمت چپ در شکل ۷) قرار گرفته‌اند. ابعاد هر چهار قاب یکسان بوده و دهانه قاب‌ها برابر ۲۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن‌ها برابر ۳۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. برای تیرها مقطع فولادی IPE160 و برای ستون‌ها مقطع فولادی 2IPE160 استفاده شده است. در قاب‌ها با مهاربند کابلی، از کابل با قطر ۱ سانتی‌متر استفاده شده است. نیروی پیش‌تندگی افقی برابر با ۳۰۰ کیلوگرم نیرو بر کابل‌ها اعمال شده است.

۴-۲- تحلیل استاتیکی غیرخطی قاب‌های یک دهانه تحت بار جانبی

در جدول (۷) تغییرمکان جانبی گره ۴ (مطابق شکل ۷) برای هر چهار قاب مورد بررسی نشان داده شده است. با مقایسه کردن تغییرمکان جانبی گره مورد نظر، مشخص شد که با افزودن مهاربند



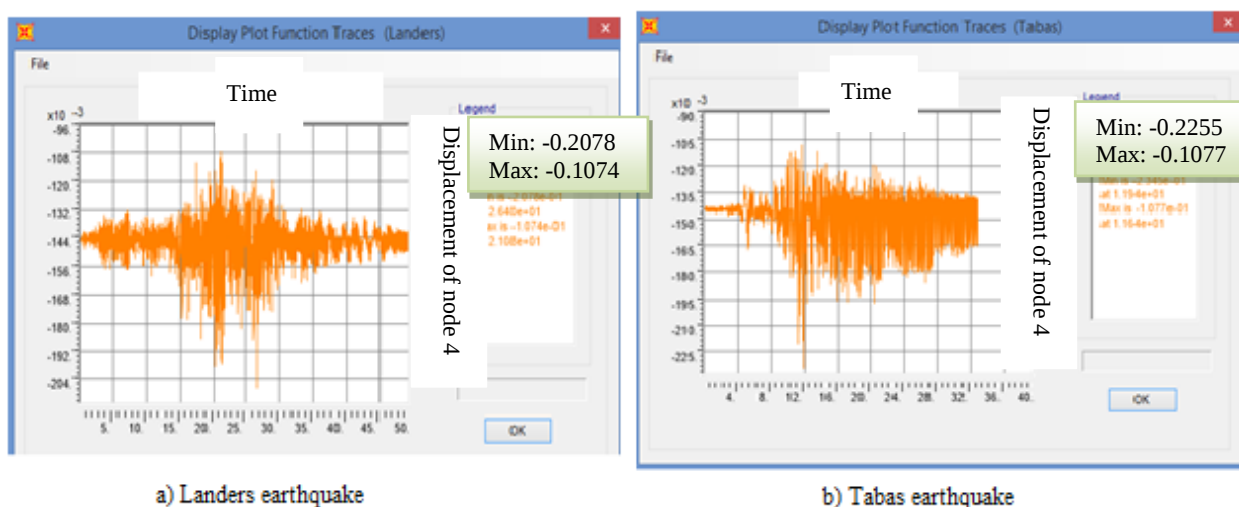
شکل ۷. قاب‌های یک دهانه مورد بررسی در این پژوهش

Fig. 7. One-span frames examined in this research

جدول ۷. تغییر مکان جانبی گره ۴ در جهت محور X در قاب‌های یک دهانه تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی

Table.7. The lateral displacement of node 4 in the direction of the X-axis in the one-span frames under nonlinear static analysis

The investigated frame	Lateral displacement of the node 4 (Cm)	Percentage difference with steel frame without cable and damper
Steel frame without cable and damper	11.691	0
Steel frame with cable brace	2.325	-80.11
Steel frame with MR damper	11.691	0
Steel frame with MR damper and cable brace	2.182	-81.34



شکل ۸. تغییر مکان جانبی گره ۴ در جهت X در قاب فولادی یک دهانه با مهاربند کابلی و میراگر MR تحت زلزله‌های مختلف

Fig. 8. Lateral displacement of node 4 in the X direction in a one-span steel frame with cable brace and MR damper under different earthquakes

جدول ۸. مقادیر بیشترین و کمترین تغییر مکان جانبی گره ۴ در قاب‌های یک دهانه مورد بررسی تحت زلزله‌های مختلف

Table 8. The maximum and minimum values of lateral displacement of node 4 in the one-span frames investigated under different earthquakes.

Type of frames	Lateral displacement in X direction under time-history analysis (Cm)					
	Trinidad		Landers		Tabas	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Steel frame without cable and damper	-0.5806	0.5584	-0.3473	0.3222	-0.5955	0.5536
Steel frame with cable brace	-0.2092	-0.1097	-0.2231	-0.1055	-0.2285	-0.1108
The percentage difference of the top row in absolute terms with the first row	63.96 decrease		35.77 decrease		61.63 decrease	
Steel frame with MR damper	-0.2730	0.2714	-0.2356	0.2433	-0.3323	0.3045
The percentage difference of the top row in absolute terms with the first row	52.98 decrease		29.95 decrease		44.20 decrease	
Steel frame with MR damper and cable brace	-0.2075	-0.1068	-0.2078	-0.1074	-0.2262	-0.1077
The percentage difference of the top row in absolute terms with the first row	64.27 decrease		40.16 decrease		62.02 decrease	

قاب مانند بند ۴-۱ مقاله است.

۴-۴- مشخصات سیستم‌های سازه‌ای دو دهانه

۴-۵- تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی قاب‌های دو

دهانه تحت بارهای لرزه‌ای

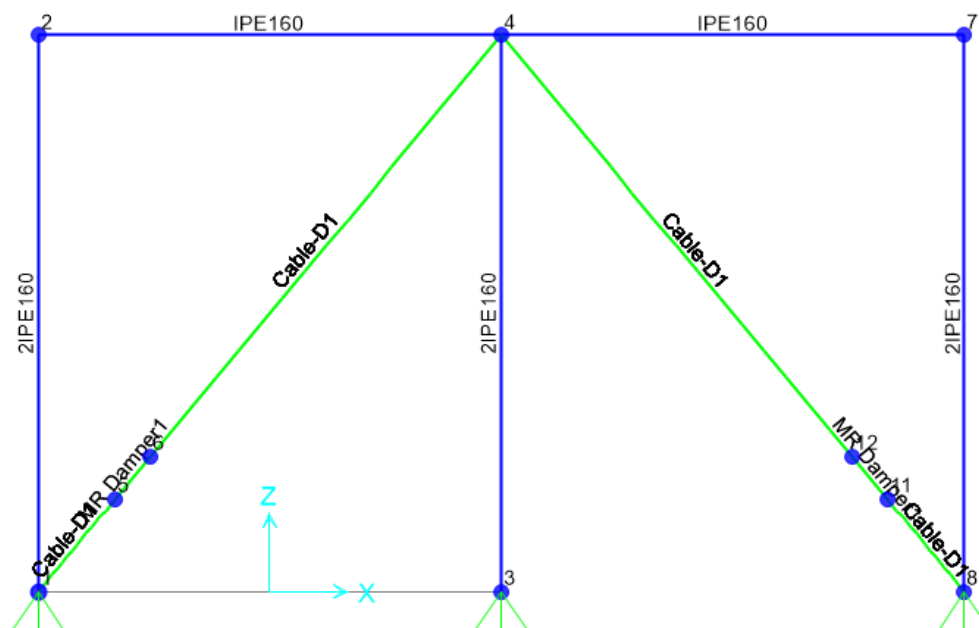
تحلیل‌های این بخش با ابعاد و مشخصات قاب‌های ارائه شده در قسمت قبلی است. شتاب‌نگاشت‌های Tabas، Landers و Trinidad برای تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مقیاس شده و قاب‌های دو دهانه مورد نظر، تحت این زلزله‌ها مورد بررسی قرار

چهار قاب دوبعدی فولادی دارای دو دهانه که (الف) مربوط به قاب فولادی دو دهانه بدون کابل و میراگر، (ب) مربوط به قاب فولادی دو دهانه با مهاربند کابلی، (ج) مربوط به قاب فولادی دو دهانه با میراگر MR و (د) مربوط به قاب فولادی دو دهانه با مهاربند کابلی و میراگر MR است، بررسی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شکل (۹) قاب فولادی دو دهانه با مهاربند کابلی و میراگر MR نشان داده شده است. مشخصات هر چهار

میراگر کاهش پیدا کرده و ۲۳/۰۳ درصد نسبت به قاب فولادی با مهاربند کابلی کاهش یافته است.

در جدول (۹) مقدار بیشترین و کمترین تغییر مکان جانبی گره ۴ (مطابق شکل ۹) در جهت X در قاب‌های دو دهانه مورد نظر، تحت زلزله‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول (۹) مشاهده می‌شود، در زلزله Trinidad مقادیر تغییر مکان‌های جانبی گره ۴ در حالت رفت و برگشت، بیشتر از

گرفتند. بیشترین و کمترین نیروی برشی وارد بر تیر سمت چپ (مطابق شکل ۹) در هر چهار قاب دو دهانه تحت زلزله‌های مشخص شده مورد بررسی قرار گرفته است. با افزودن مهاربند کابلی و میراگر MR به قاب بدون کابل و میراگر، مقادیر بیشترین و کمترین نیروی برشی وارد بر تیر، نسبت به سایر قاب‌های مورد بررسی کاهش بیشتری داشته است. به عنوان نمونه در قاب فولادی با مهاربند کابلی و میراگر MR، نیروی برشی در زلزله Landers، ۸۲/۱۸ درصد نسبت به قاب فولادی بدون کابل و



شکل ۹. قاب فولادی دو دهانه با مهاربند کابلی و میراگر MR

Fig. 9. Two-span steel frames with the MR damper and cable brace

جدول ۹. مقادیر بیشترین و کمترین تغییر مکان جانبی گره ۴ در قاب‌های دو دهانه تحت زلزله‌های مختلف

Table 9. Maximum and minimum lateral displacement values of node 4 in two-span frames under different earthquakes

Type of frames	Lateral displacement in X direction under time-history analysis (Cm)					
	Trinidad		Landers		Tabas	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Steel frame without cable and damper	-0.6693	+0.6558	-0.3970	+0.3642	-0.5218	+0.5051
Steel frame with cable brace	-0.0507	-0.0036	-0.0547	+0.003	-0.0549	+0.005
The percentage difference of the top row in absolute terms with the first row	92.42 decrease		86.23 decrease		89.48 decrease	
Steel frame with MR damper	-0.2555	+0.2525	-0.2330	0.2436	-0.3350	+0.2855
The percentage difference of the top row in absolute terms with the first row	61.83 decrease		38.64 decrease		35.80 decrease	
Steel frame with MR damper and cable brace	-0.0220	+0.0199	-0.0304	+0.0243	-0.0265	0.0235
The percentage difference of the top row in absolute terms with the first row	96.72 decrease		92.34 decrease		94.92 decrease	

زلزله Tabas و آن هم بیشتر از زلزله Landers است. با افزودن مهاربند کابلی به قاب بدون میراگر، مقدار بیشترین و کمترین تغییر مکان‌های جانبی را در هر سه زلزله، نزدیک به صفر کرده است. افزودن میراگر MR به قاب بدون کابل و میراگر، تغییر مکان‌های جانبی را در هر سه زلزله به طور قابل توجه کاهش داده است. افزودن مهاربند کابلی با میراگر MR به قاب، مقدار بیشترین و کمترین تغییر مکان‌های جانبی را در هر سه زلزله، نزدیک به صفر کرده است. با توجه به نتایج به دست آمده از نیروی محوری وارد بر کابل‌ها، در قاب فولادی دو دهانه با مهاربند کابلی و میراگر MR، نیروی محوری وارد بر کابل‌ها به صورت کششی است. به عبارت دیگر، کابل‌ها در تحمل بارهای جانبی وارد شده بر قاب مشارکت کرده و نیروی هیچ یک از آن‌ها فشاری نیست. مقدار بیشترین نیروی محوری در ستون سمت راست در قاب با مهاربند کابلی و میراگر MR، در هر سه زلزله بیشتر از سایر قاب‌ها کاهش یافته است.

۵- نتیجه گیری

هدف در این پژوهش ارائه سیستم جدیدی برای کاهش اثر زلزله روی قاب‌های فولادی با استفاده از مهاربند کابلی و میراگر MR است. در این پژوهش یک قاب دو بعدی موردی فولادی دارای یک دهانه و یک طبقه، سپس یک قاب دوبعدی موردی فولادی دارای دو دهانه و یک طبقه، تحت بار جانبی استاتیکی غیرخطی و تحریک‌های زلزله مشخص، قرار گرفتند.

نتایج زیر در محدوده مطالعات انجام گرفته تحت بار استاتیکی غیرخطی و تحریک‌های زلزله به دست آمد.

- ۱- با مقایسه رفتار قاب فولادی یک دهانه بدون کابل و میراگر با قاب‌های یک دهانه با مهاربندهای مختلف، تحت اثر بارهای جانبی استاتیکی غیرخطی، بیشترین تغییر مکان جانبی در تیر مربوط به قاب فولادی یک دهانه بدون کابل و میراگر است. با افزودن مهاربند کابلی به قاب فولادی، تغییر مکان جانبی کاهش یافت. با افزودن میراگر MR به قاب فولادی بدون کابل، تغییر مکان جانبی تغییر چندانی نکرد. با افزودن مهاربند کابلی و میراگر MR به قاب فولادی، کمترین تغییر مکان جانبی در بین مدل‌ها به دست آمد.

۲- با توجه به نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی در قاب‌های فولادی یک دهانه، افزودن مهاربند کابلی به قاب، در هر سه زلزله مقادیر تغییر مکان جانبی و تلاش‌های داخلی تیر و ستون به طور قابل توجه کاهش داد. افزودن میراگر MR به قاب بدون کابل، در زلزله Trinidad، تغییر مکان‌های جانبی قاب و تلاش‌های داخلی تیر و ستون را بیشتر از سایر زلزله‌ها کاهش داد. افزودن مهاربند کابلی و میراگر MR به قاب، در هر سه زلزله مقادیر تغییر مکان جانبی و تلاش‌های داخلی تیر و ستون را به طور قابل توجه کاهش داد. در حالت کلی با توجه به نتایج، قاب فولادی یک دهانه با مهاربند کابلی و میراگر MR، بهترین عملکرد را در بین قاب‌های مورد بررسی در زلزله‌های Landers، Trinidad و Tabas دارد.

۳- با توجه به نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی در قاب‌های فولادی دو دهانه، افزودن مهاربند کابلی به قاب بدون کابل و میراگر، در هر سه زلزله، مقادیر تغییر مکان جانبی و تلاش‌های داخلی تیر و ستون را کاهش داده است. افزودن میراگر MR به قاب بدون کابل و میراگر، در زلزله Trinidad، تغییر مکان‌های جانبی قاب و تلاش‌های داخلی تیر و ستون را بیشتر از سایر زلزله‌ها کاهش داده است. افزودن مهاربند کابلی و میراگر MR به قاب بدون کابل و میراگر، در هر سه زلزله، مقادیر تغییر مکان جانبی و تلاش‌های داخلی تیر و ستون را کاهش داده است. در حالت کلی با توجه به نتایج، قاب فولادی دو دهانه با مهاربند کابلی و میراگر MR، بهترین عملکرد را در بین قاب‌های مورد بررسی در هر سه زلزله دارد.

۴- طبق نتایج به دست آمده از تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی، افزودن مهاربند کابلی و میراگر MR به قاب بدون کابل و میراگر، باعث بهبود عملکرد سازه در برابر بارهای جانبی می‌شود. افزودن مهاربند کابلی و میراگر MR، تلاش‌های داخلی تیر و ستون‌ها را بیشتر از سایر قاب‌ها کاهش داده است.

قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از داوران این تحقیق اعلام می‌کنند. نظرات سازنده آن‌ها سبب بهبود کیفی تحقیق شد.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان به یک اندازه در این تحقیق مشارکت داشتند.

اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

منابع مالی

این تحقیق بدون دریافت حمایت مالی از سوی مرکزی و یا دانشگاه تبریز صورت گرفت.

References

- [1] Code No 766., 2017. "Guidelines for the use of dampers in the design and retrofitting of buildings". Road, Housing and Urban Development Research Center [In Persian].
- [2] Chae Y., 2011. "Seismic hazard mitigation of building structures using magneto-rheological dampers". PhD thesis, Lehigh University, pp: 1-200.
- [3] Rahman M., Ong Z., Julai S., Ferdaus M. and Ahmed J., 2017. "A review of advances in magnetorheological dampers: their design optimization and applications", J. Zhejiang Univ. Sci, 18(12), pp: 991-1010.
- [4] Rossi A., Orsini F., Scorza A., Botta F., Belfiore NP. and Sciuto S., 2018. "A review on parametric dynamic models of magnetorheological dampers and their characterization methods". In Actuators, 7(2), pp: 1-21.
- [5] Najafi M., Barghian M., 2014. "New cable brace suggestion for retrofit of steel frames". Sharif journal of civil engineering, 2(30), pp: 121-127.
- [6] Abhari S. and Barghian, M., 2017. "Improvement of cable arrangement in concrete structures with cable brace under earthquake load". Master's thesis, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University [In Persian].
- [7] Hejazi SAM., Feyzpour A., Eslami A., Fouladgar, S., Eftekhari. A and Toghraie D., 2023. "Numerical investigation of rigidity and flexibility parameters effect on superstructure foundation behavior using three-dimensional finite element method." Case Studies in Construction Materials, 18.
- [8] Chen J., Khabaz, MK., Ghasemian, MM., Altalbawy FM., Jalil AT., Eftekhari, SA. and Albahash, ZF., (2023). "Transverse vibration analysis of double-walled carbon nanotubes in an elastic medium under temperature gradients and electrical fields based on nonlocal Reddy beam theory". Materials Science and Engineering.
- [9] Farahmandazar B., Mohajer RN. and Talatahari S, 2011. "Seismic Mitigation of Tall Buildings Using Magnetorheological Dampers". Asian Journal of civil engineering, 12(5), pp: 637-649.
- [10] Şahin Ö., Gökhanadar N., Kemerli M., Caglar N., Şahin I., Parlak Z., Kükrek S. and Engin T., 2021. "A comparative evaluation of semi-active control algorithms for real-time seismic protection of buildings via magnetorheological fluid dampers". Journal of Building Engineering, 42(1), pp: 1-11.
- [11] You J., Yang Y., Yongfeng F. and Zhang X., 2022. "Seismic response study of L-shaped frame structure with magnetorheological dampers". Applied Sciences, 12(12), pp: 1-22.
- [12] Soltane S., Montassar S., BenMekki O. and El Fatmi R., 2015. "A hysteretic Bingham model for MR dampers to control cable vibrations". Journal of Mechanics of Materials and Structures, 10(2), pp:195-206.
- [13] Wang W., Hua X., Wang X., Wu J., Sun H. and Song H., 2019. "Mechanical behavior of magnetorheological dampers after long term operation in a cable vibration control system". Structural Control and Health Monitoring, 26(1), pp: 1-19.
- [14] Javadinasab S. and Ghorbani-Tanha A., 2020. "Semi-active fuzzy control of Lali Cable-Stayed Bridge using MR dampers under seismic excitation". Frontiers of Structural and Civil Engineering, 14(1), pp: 706-721.
- [15] Torabi A, 2005. "Examples of SAP2000 along with analysis results". Tehran Simai Danesh, pp: 612-620 [In Persian].
- [16] Lord Corporation., 2003. "RD-1005-3 Product Bulletin", Prepared by Lord Company.
- [17] RamaRaju K., 2008. "Studies on seismic performance enhancement of buildings with viscous fluid dampers and magnetorheological dampers", Chennai university

India, PhD Thesis.

21(5), pp: 741-755.

- [18] RamaRaju K., Jame A., Gopalakrishnan N., Muthumani K. and Nages, R, 2014. "Experimental studies on seismic performance of three-story steel moment resisting frame model with scissor jack magnetorheological damper energy dissipation systems". Structural Control and Health Monitoring,

- [19] Eftekhari., A, Hashemian M. and Toghraie D, 2020. "Optimal vibration control of multi-layer micro-beams actuated by piezoelectric layer based on modified couple stress and surface stress elasticity theories." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Abbasi, M. and Barghian, M., 2025. Earthquake Effect on Steel Frame with Cable Bracing and Magnetorheological (MR) Damper. *Modares Civil Engineering journal*, 25(4), pp.33-47.

DOI:

