

Evaluation of the seismic performance of bracing frames with friction dampers

Ramin Tabatabaei Mirhosseini^{1*} , Ata Falahatnejad²

1. Associate professor, Civil Engineering Dept., Islamic Azad University, Kerman Branch, Kerman, Iran.
2. Ph.D. Student in Civil Engineering, Islamic Azad University, Kerman Branch, Kerman, Iran.

Abstract

The effective design of structures resistant to seismic vibrations is one of the main concerns of structural engineers to deal with damages caused by earthquakes, which can withstand more earthquake forces with methods such as energy dissipation. Recent earthquake records show that the earthquake record characteristic of the near area differs from the earthquake records of the far area. Among these characteristics, it can be mentioned that the pulse-type state of these records, as well as the high maximum speed and ground displacements. For this reason, these types of records increase the seismic requirements of the structure compared to normal earthquakes. The map of faults and seismic zoning of Iran shows that important urban points such as Tehran, Tabriz, etc. have high seismicity and are located near the fault. Therefore, it is necessary to design and build structures that can properly withstand the features of near-fault earthquakes, this issue reveals the understanding and recognition of the behavior of structural systems and the structure's response to the special features of near-fault earthquakes. This article first investigated the seismic evaluation of three existing 4, 8, and 12-story steel structures with lateral load-resisting systems. Then the desired structure was strengthened using a friction damper, and finally, the acceleration recorder was applied to the structure in the near- and far-fault earthquake zone case study. The seismic demand of the retrofitted structure was investigated in ANSYS Workbench finite element software, which was done in the form of modal analysis, floor drift displacement, structure acceleration response, and von Mises stress. For seismic validation, a two-story, single-span steel frame has been used. The dynamic load used was 0.5g based on the north-south component of the El Centro earthquake (1940) with a maximum acceleration scaled to 50 cm/s. To validate the numerical results, the horizontal displacement of two points on the first and second floor was compared with experimental data, and an acceptable accuracy was obtained. The results of the maximum acceleration at the highest point of the building showed that in a far-fault earthquake zone, the best effect of dampers was on 8-story buildings with a 77% decrease, and in a near-fault earthquake zone, it was related to a 4-story building with a 66.4% decrease in acceleration. Stress in near- and far-fault earthquake zones, the best effect of dampers was on 4-story buildings with 83% and 84% reduction, respectively. In a far-fault earthquake zone, the best effect of dampers was on 8-story buildings with a 44% reduction in maximum displacement, and in a near-fault earthquake zone, it was related to a 4-story building with a 61% reduction in acceleration.

Review History

Received: Jan 16, 2024

Revised: Jun 18, 2024

Accepted: Nov 20, 2024

Keywords

Earthquake

Steel Frame

Friction damper

Finite element method

* Corresponding Author Email: tabatabaei@iauk.ac.ir ORCID: 0000-0001-8292-8571



ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی دارای میراگرهای اصطکاکی

رامین طباطبایی میرحسینی^{۱*}، عطا فلاح نژاد^۲

۱. دانشیار، دانشکده فنی، گرایش سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، گرایش سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

طراحی مؤثر سازه‌های مقاوم در مقابل ارتعاشات لرزه‌ای یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسان سازه برای مقابله با خسارات ناشی از زلزله است که با روش‌های مانند استهلاک انرژی قابلیت تحمل بیشتر نیروهای زلزله فراهم می‌شود. بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰ در این مقاله ابتدا به ارزیابی لرزه‌ای سه سازه ۴ و ۸ و ۱۲ طبقه فولادی موجود با سیستم باربر جانبی قاب خمشی پرداخته و سپس اقدام به مقاوم‌سازی سازه موردنظر با استفاده از میراگر اصطکاکی کرده و در انتها شتاب‌نگاشت‌ها در دو نمونه مورد مطالعه در حوزه نزدیک و دور از گسل زلزله به سازه اعمال شده و تقاضای لرزه‌ای سازه مقاوم‌سازی شده در نرم‌افزار المان محدود انسیس و رکن‌بج مورد بررسی قرار گرفت که به صورت تحلیل مودال، جابه‌جایی نسبی طبقات، پاسخ شتاب سازه و تنش فون میز انجام شد. نتایج بیشینه شتاب در بالاترین نقطه ساختمان نشان داد در زلزله دور از گسل، بهترین تأثیر میراگرها روی ساختمان‌های ۸ طبقه با ۷۷٪ کاهش، بوده است و در زلزله نزدیک به گسل، مربوط به ساختمان ۴ طبقه با ۶۶٪ کاهش شتاب است. نتایج تنش در زلزله نزدیک و دور از گسل نشان داد بهترین تأثیر میراگرها روی ساختمان‌های ۴ طبقه با ۸۳٪ و ۸۴٪ کاهش، بوده است. بیشینه جابه‌جایی نشان داد در زلزله دور از گسل، بهترین تأثیر میراگرها روی ساختمان‌های ۸ طبقه با ۴۴٪ کاهش و در زلزله نزدیک به گسل مربوط به ساختمان ۴ طبقه با ۶۱٪ کاهش شتاب است.

کلمات کلیدی

زلزله
قاب فولادی
میراگر اصطکاکی
روش المان محدود

۱- مقدمه

رکوردهای زلزله ثبت شده اخیر نشان‌دهنده تفاوت ویژگی‌های رکوردهای زلزله حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های حوزه دور است. به طوری که رکورد زلزله حوزه نزدیک دارای مشخصات متمایزی نسبت به رکوردهای زلزله حوزه دور دارد. ازجمله این ویژگی‌ها می‌توان به حالت پالس‌گونه بودن این رکوردها و همچنین بالا بودن بیشینه سرعت و جابه‌جایی‌های زمین اشاره کرد [1]. به همین دلیل این نوع رکوردها نسبت به زمین‌لرزه‌های معمولی باعث بالا رفتن نیازهای لرزه‌ای سازه

می‌شوند. نقشه گسل‌ها و پهنه‌بندی لرزه‌ای ایران نشان‌دهنده این است که نقاط مهم شهری مانند تهران و تبریز و ... دارای لرزه‌خیزی بالا بوده و در محدوده نزدیک گسل قرار دارند [2, 3]؛ بنابراین طراحی و ساخت سازه‌هایی که به‌طور مناسب بتوانند در مقابل ویژگی‌های زلزله‌های نزدیک گسل پایدار باشد الزامی است، این موضوع درک و شناخت رفتار سیستم‌های سازه‌ای و عکس‌العمل سازه به ویژگی‌های خاص زلزله‌های نزدیک گسل را آشکار می‌سازد. یکی از سیستم‌های متداول طراحی ساختمان‌ها در کشور

* رایانامه نویسنده مسئول: tabatabaei@iauk.ac.ir - ORCID: 0000-0001-8292-8571

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت 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، بازنشر 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.



لغزش بهینه به بررسی عملکرد میراگر اصطکاکی در قاب‌های بادبندی شورون و خارج از مرکز با استفاده از روش دینامیکی غیرخطی پرداختند [12].

وائقی امیری و همکاران [13] با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی به ارزیابی عملکرد قاب‌های فولادی مهاربندی‌شده خارج از مرکز مجهز به میراگر اصطکاکی پرداختند. در این مطالعه از سه نوع قاب فولادی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه که به ترتیب نمایانگر سازه‌های کوتاه، متوسط و بلند هستند در سری تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی و ۱۰ مقدار مختلف نیروی لغزش در معرض سه رکورد مختلف زلزله انجام شد و مکان مناسب میراگرهای اصطکاکی به جای ارائه آن‌ها در تمام سطوح نیز در اسکلت ۱۵ طبقه بررسی شد.

وائقی امیری و تمجید [14] به بررسی تأثیر میراگر اصطکاکی پال بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتنی پرداخت. در این مقاله سه قاب بتنی ۵، ۸ و ۱۰ طبقه به صورت قاب خمشی بتن مسلح طراحی و با استفاده از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج تعداد طبقات روی بار لغزش بهینه میراگرها تأثیر بسزایی دارد و در این بار لغزش بهینه سطح عملکرد سازه بهبود پیدا می‌کند. میرزائی فرد و همکاران [15] با تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی و تحلیل افزایشی دینامیکی به بررسی عملکرد میراگر اصطکاکی بر پاسخ لرزه‌ای قاب‌های فولادی مختلف پرداختند. در این کار میراگر اصطکاکی به صورت دو استوانه توپر و توخالی در نظر گرفته شد. پاسخ سازه در دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی بررسی شد و نتایج بهبود رفتار سازه را با استفاده از میراگر اصطکاکی نشان داد.

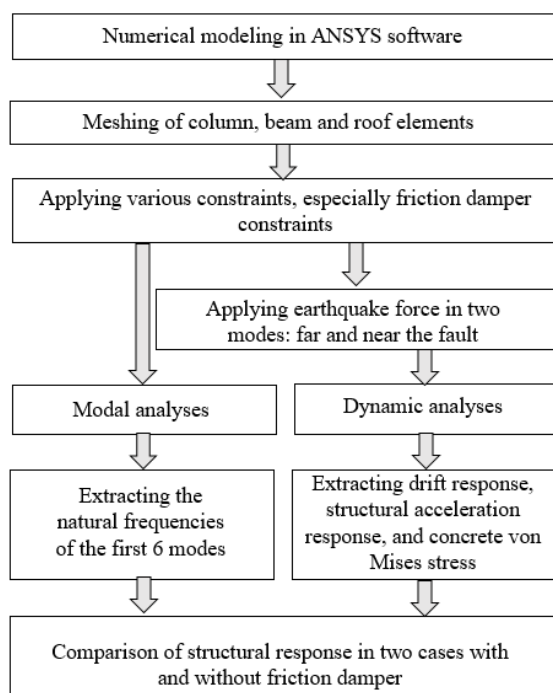
برای رفع نیاز به سختی بیشتر پس از تسلیم و اتلاف انرژی در طول زلزله‌های بزرگ، یک مهاربند میراگر اصطکاکی متغیر خودمحرور جدید توسط وانگ و همکاران پیشنهاد شد [16] و به صوت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه این طرح به صورت دوگانه مورد بررسی قرار گرفته تا اثربخشی آن برای سختی بیشتر و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی تقویت شود [17]. جوادیان و کیم یک مهاربند اصطکاکی چرخشی برای طراحی لرزه‌ای سازه‌های قاب ارتجاعی پیشنهاد کردند [18]. غفوری نجات و همکاران بررسی پارامتریک پاسخ لرزه‌ای قاب مهاربندی‌شده زانویی با میراگر اصطکاکی را مورد مطالعه قرار

استفاده از سیستم قاب فولادی است. این سیستم به دلیل در دسترس بودن مصالح مورد نیاز و نیز اجرایی ساده‌تر به یکی از سیستم‌های متداول و مورد نظر در ایران تبدیل شده است. پژوهشگران روش‌های مختلفی را برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای قاب‌ها پیشنهاد کردند که هر کدام از آن‌ها دارای مزایا و معایبی است. سازه‌های متداول انرژی زلزله را با تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای خود مستهلک می‌کنند اما یکی از روش‌های اخیر استهلاک انرژی زلزله استفاده از سیستم‌های کنترل سازه است که به شکل‌های کنترل فعال و غیرفعال و سیستم ترکیبی استفاده می‌شود [4]. از میان سیستم‌های کنترل ذکر شده ابزارهای کنترل فعال نیاز به جذب انرژی بالایی دارند و با توجه به احتمال ایجاد اشکال در منبع تأمین‌کننده انرژی در هنگام وقوع زلزله ضریب اطمینان استفاده از این ابزارها در مقابل زلزله کمتر خواهد بود و بیشتر برای سازه‌های در مقابل باد استفاده می‌شوند.

پدیده اصطکاک در مهندسی سازه نیز منجر به توسعه میراگرهای اصطکاکی شده است که قادرند انرژی قابل‌توجهی از سازه را در مقابل زلزله و تحریکات دینامیکی دیگر جذب کنند. در این نوع میراگر، انرژی زلزله صرف غلبه بر اصطکاک موجود در سطح تماس قطعات می‌شود. میراگرهای اصطکاکی که نوعی از سیستم‌های کنترل غیرفعال است، پتانسیل بالایی در جذب و استهلاک انرژی با هزینه پایین و سهولت در نصب و نگهداری دارد. میراگرهای اصطکاکی با اعمال میرایی اضافی، نیروهای وارد بر سازه، دامنه ارتعاش و شتاب سازه را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده و آسیب‌پذیری سازه و تجهیزات داخل آن را به حداقل می‌رساند [5].

سیستم‌های اصطکاکی انرژی را از طریق لغزش دو قطعه نسبت به یکدیگر مستهلک می‌کنند. استفاده از میراگرهای اصطکاکی برای مقاوم‌سازی سازه‌های زیادی در سرتاسر دنیا مرسوم شده است که می‌توان به مواردی از قبیل ساختمان‌های لاگاردنیا در هندوستان [6]، کارخانه‌های هواپیماسازی بوئینگ در واشنگتن [7]، ساختمان ایتون در مونترال [8]، منبع ذخیره آب در ساکرامنتو کالیفرنیا [9] و ساختمان دادگستری اوتاوا [10] اشاره کرد.

مهدویان و همکاران [11] به بررسی کنترل ارتعاشات لرزه‌ای ساختمان‌ها با استفاده از میراگرهای اصطکاکی و روش دینامیکی غیرخطی پرداختند. برخی پژوهشگران با تمرکز بر روی نیروی



شکل ۱. فلوچارت روند تحقیق

Fig. 1. Research Methodology Flowchart

در این مطالعه ابتدا به مدل‌سازی المان محدود سه سازه ۴ و ۸ و ۱۲ طبقه فولادی موجود با سیستم باربر جانبی قاب خمشی پرداخته و سپس با اعمال شبکه‌بندی مناسب و شرایط مرزی مناسب به ویژه قیود میراگر اصطکاکی اقدام به شبیه‌سازی سازه در دو بخش تحلیل مودال و تحلیل دینامیکی با اعمال بار لرزه‌ای ناشی از زلزله نزدیک و دور از گسل پرداخته شده است. در انتها نتایج جابه‌جایی نسبی طبقات، پاسخ شتاب سازه و تنش فون میز مربوط به دو حالت با و بدون میراگر با یکدیگر مقایسه خواهد شد.

در این مقاله تنها از دو رکورد زلزله در دو حالت دور و نزدیک گسل استفاده شده است که با هدف مقایسه عملکرد میراگر اصطکاکی صورت گرفته است اگرچه برای مقایسه کامل تر نیازمند استفاده از رکوردهای زلزله بیشتر است که به علت حجم بالای محاسبات و نتایج در این مقاله به آن پرداخته نشده است.

۲-۱- شرح مسئله

در شکل (۲) نمای از روبرو و نمای ایزومتریک سه ساختمان با تعداد طبقات ۴، ۸ و ۱۲ نشان داده شده است. فاصله بین دهانه‌ها ۵ متر و ارتفاع هر طبقه ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی در نرم‌افزار انسیس انجام شد و برای ستون‌ها و تیرها از المان‌های خطی Beam188 با سطح مقطع مشخص و جنس فولاد

دادند [19]. بخشایش و همکاران با استفاده از یک میراگر برشی جدید به بهبود عملکرد قاب مهاربندی شده متحدالمرکز پرداختند [20]. عملکرد لرزه‌ای قاب خودمحمور با میراگر اصطکاکی از سه جنبه آزمایش اتصال تیر به ستون، روش طراحی لرزه‌ای قاب و تاریخچه زمانی دینامیکی توسط دینگ و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است [21]. پورزنگبار و همکاران با استفاده از روش المان محدود، آثار سیستم میراگر مهاربند ویسکوز را بر پاسخ دینامیکی قاب‌های فولادی برای رکوردهای مختلف زلزله بررسی کردند [22]. ابراهیمی و میرقادر یک میراگر مهاربند اصطکاکی- لغزشی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده پیشنهاد دادند. یافته‌های عددی با استفاده از روش اجزای محدود نشان داد که در مدل‌های مجهز به میراگر لغزشی اصطکاکی، مهاربندها فاقد کمانش سرتاسری و موضعی، آسیب و شکستگی بودند [23]. بارباگالو و همکاران یک روش طراحی سیستم میراگر مهاربندی-اصطکاکی ارائه کردند که برای یک چارچوب مطالعه موردی با در نظر گرفتن ترکیب‌های مختلف پارامترهای طراحی اعمال شد [24].

هدف این تحقیق مطالعه تأثیر مستهلک کننده‌های انرژی در هنگام وقوع زلزله است بنابراین سیستم‌های کنترل غیرفعال انتخاب شده و استفاده از میراگرها می‌تواند موردتوجه قرار گیرد. چراکه این روش کمترین اضافه‌وزن را به سازه اعمال می‌کند و اجرا آن نسبت به سایر روش‌ها ساده‌تر است. از میان انواع مختلف ابزارهای کنترل غیرفعال میراگر مکانیکی-اصطکاکی با توجه به سادگی عملکرد و اجرای این ابزارها و صرفه اقتصادی بیشتر انتخاب می‌شود. قاب‌های مهاربندی میراگرها یکی از سیستم‌های سازه‌ای برای مقابله با بارهای جانبی از قبیل زلزله است. از طرفی نیاز به شکل‌پذیر بودن سیستم‌های سازه‌ای برای مستهلک کردن انرژی در حین زلزله، است.

نوآوری این مقاله استفاده از میراگر اصطکاکی از طریق روش المان محدود برای محاسبه عملکرد این نوع میراگر در ساختمان‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه در حالت بارگذاری زلزله دور و نزدیک به گسل است.

۲- روش تحقیق

در شکل (۱) فلوچارت روند تحقیق نمایش داده شده است.

۲-۲- درستی آزمایی

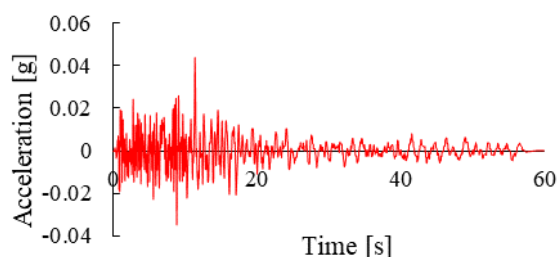
مدل تجربی تسای و همکاران [26] که یک قاب فولادی دوطبقه تک دهانه است برای اعتبارسنجی لرزه‌ای قاب‌های فولادی انتخاب شده و در شکل (۴) نشان داده شده است.

در این آزمایش از فولاد کلاس ASTM A36 با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگا پاسکال، ضریب پواسون ۰/۲۶ و استحکام تسلیم و مقاومت نهایی به ترتیب ۲۵۰ مگاپاسکال و ۴۰۰-۵۵۰ مگا

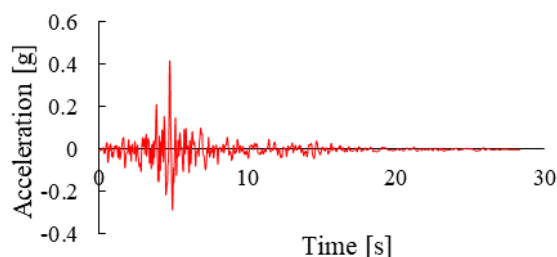
جدول ۱. ابعاد ستون، بادبند و تیر (برحسب میلی‌متر)

Table 1. Column, beam and brace dimensions (Unit: mm)

Beam ($b_f * h_w * t_f * t_w$)	Brace ($b_b * t_b$)	Column	Story level
110*200*10*8	80*8	C400-8	1-2
100*200*8*6	60*6	C350-8	3-4
140*300*12*8	120*12	C450-12	1-2
140*300*10*8	100*10	C450-10	3-4
120*240*10*8	80*8	C350-8	5-6
100*200*8*6	80*8	C300-8	7-8
170*360*12*10	160*14	C550-12	1-3
160*340*12*10	140*12	C500-12	4-6
150*320*12*8	120*12	C450-12	7-8
120*260*10*8	100*10	C350-12	9-10
100*220*10*6	80*8	C300-10	11-12



(الف) نزدیک به گسل



(ب) دور از گسل

شکل ۳. رکورد زلزله مورگان هیل ۱۹۹۴.

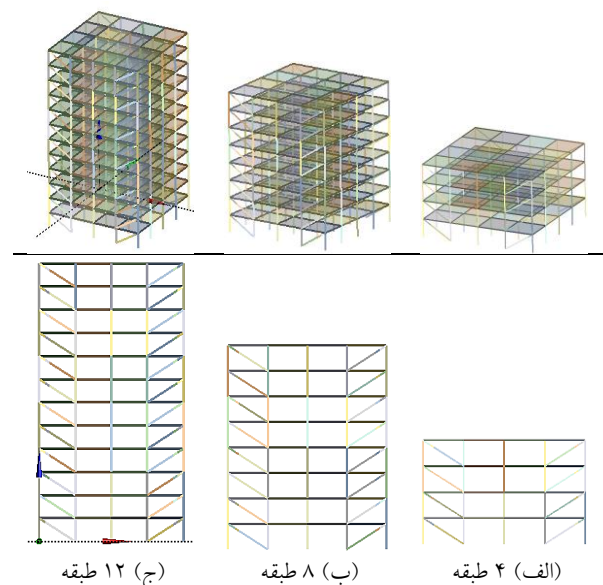
Fig. 3. Morgan Hill earthquake record 1994.

و برای سقف از المان‌های سطحی Shell 181 با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و جنس بتن استفاده شده است.

در جدول (۱) مقاطع ستون‌ها، تیرها و بادبندها بر اساس مرجع [25] به تفکیک هر یک از سه طرح در نظر گرفته شده لیست شده است.

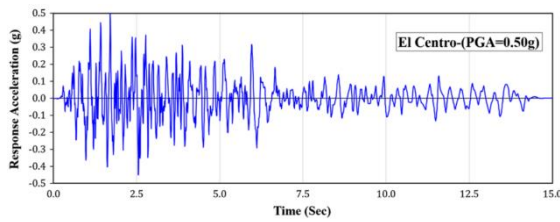
عبارات b , h و t به ترتیب طول بال (f), جان (w) و ضخامت تیر I شکل است. برای مهاربند (b) از دو مشخصه طول b و ضخامت t استفاده شده و برای ستون (C) مربعی شکل ابتدا طول و سپس ضخامت آورده شده است.

به منظور اعمال نیروهای زلزله به ساختمان، با دو بار مشتق‌گیری از اطلاعات تاریخچه زمانی رکورد شتاب زلزله، تاریخچه زمانی جابه‌جایی به دست آمد و سپس جابه‌جایی اجباری به پایه‌های تمام ستون‌های ساختمان وارد شد که در دو حالت دور و نزدیک به گسل انجام شده است. برای تسهیل و تسریع در حل مسئله، تنها جابه‌جایی‌ها در راستای محور X استفاده شد. قابل ذکر است این روش متفاوت از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی یا پوش‌اور است و به صورت دینامیکی انجام می‌شود. در شکل (۳) رکورد زلزله در موقعیت نزدیک و دور از گسل برای زلزله مورگان هیل در سال ۱۹۸۴، ارائه شده است.



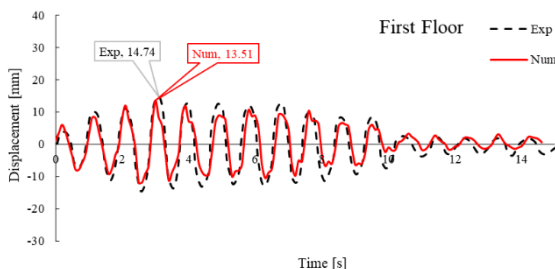
شکل ۲. نمای ایزومتریک و روبرو از ساختمان‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با بادبند قطری

Fig. 2. Isometric and front view of 4, 8, and 12-story with diagonal braces

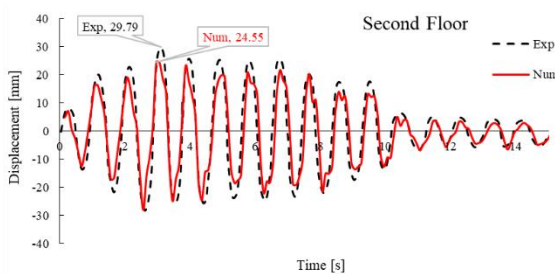


شکل ۶. رکورد شتاب زلزله ال سنترو.

Fig. 6. El Centro earthquake acceleration record.



(الف) طبقه اول



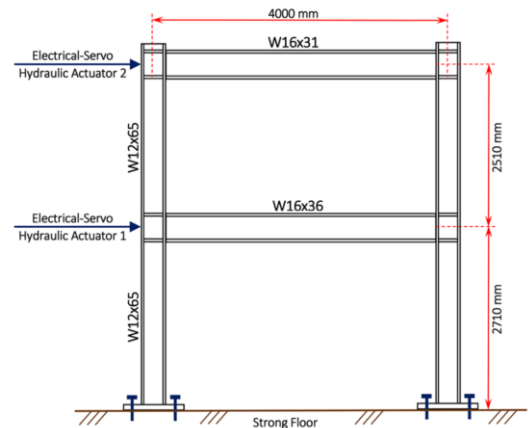
(ب) طبقه دوم

شکل ۷. مقایسه داده‌های تجربی و نتایج عددی جابه‌جایی نسبی طبقه اول و دوم.

Fig. 7. Comparison of experimental data and numerical results of story first and second drift.

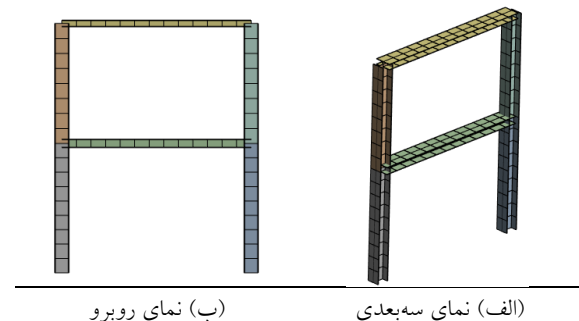
نسبت بیشترین جابه‌جایی نسبی به‌دست‌آمده از روش المان محدود در نرم‌افزار انسیس به نتایج تجربی برای طبقه اول و دوم به ترتیب $1/0.9$ و $1/0.21$ است که منجر به مدل‌سازی دقت رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی در نرم‌افزار انسیس می‌شود. بیشترین جابه‌جایی نسبی طبقه اول در روش تجربی و عددی به ترتیب برابر با $14/74$ و $13/51$ است و برای طبقه دوم نیز به ترتیب $29/79$ و $24/55$ میلی‌متر به دست آمده است؛ بنابراین خطای روش عددی در طبقه اول ۹ درصد و در طبقه دوم ۲۱ درصد به دست آمده است.

در ادامه برای بررسی کفایت روش پیاده‌سازی میراگر اصطکاکی از قاب ارائه شده در شکل (۴) استفاده شد با این تفاوت که مدل در دو حالت مختلف شامل اضافه کردن بادبند و اضافه کردن میراگر اصطکاکی شبیه‌سازی می‌شود. همان‌طور که در شکل



شکل ۴. مقاطع و ابعاد هندسی قاب دوطبقه [26].

Fig. 4. Sections and geometric dimensions of the two-story frame [26].



شکل ۵. شبکه‌بندی مدل عددی دوطبقه

Fig. 5. Meshing of the two-story numerical model

پاسکال استفاده شده است. شکل (۴) جزئیات مقاطع و ابعاد هندسی اسکلت فولادی را نشان می‌دهد. مقاطع تیر و ستون‌های پروفیل I wide-flange شکل طبق استاندارد آمریکا (class W) استفاده شد.

در شکل (۵) شبکه‌بندی سازه در نرم‌افزار المان محدود انسیس نشان داده شده است. در این تحلیل از اندازه شبکه ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد.

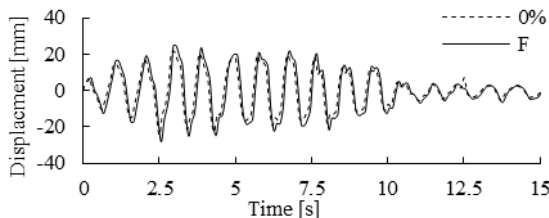
بار دینامیکی مورد استفاده مطابق با شکل ۶ مؤلفه شمال-جنوب زلزله ال سنترو (۱۹۴۰) با بیشترین شتاب مقیاس شده تا ۵۰ سانتی‌متر بر ثانیه $0.5g$ است.

برای اعتبارسنجی نتایج عددی به دست‌آمده از نرم‌افزار انسیس جابه‌جایی افقی دو نقطه روی طبقه اول و دوم با داده‌های تجربی مقایسه شد. درنهایت، نمودارهای زمانی جابه‌جایی نسبی به دست‌آمده از نرم‌افزار انسیس و داده‌های تجربی در شکل (۷) نشان داده شده است.

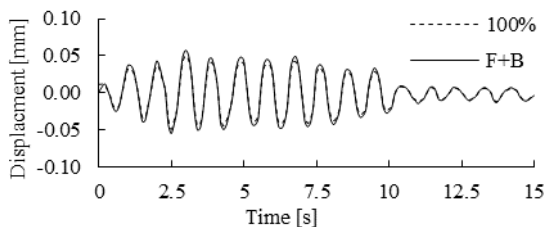
داده شده است.

فرکانس طبیعی ساختمان ۴ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

به طور کلی افزودن میراگر اصطکاکی موجب افزایش فرکانس طبیعی سازه در مودهای ارتعاشی اول تا ششم شده است. تحلیل



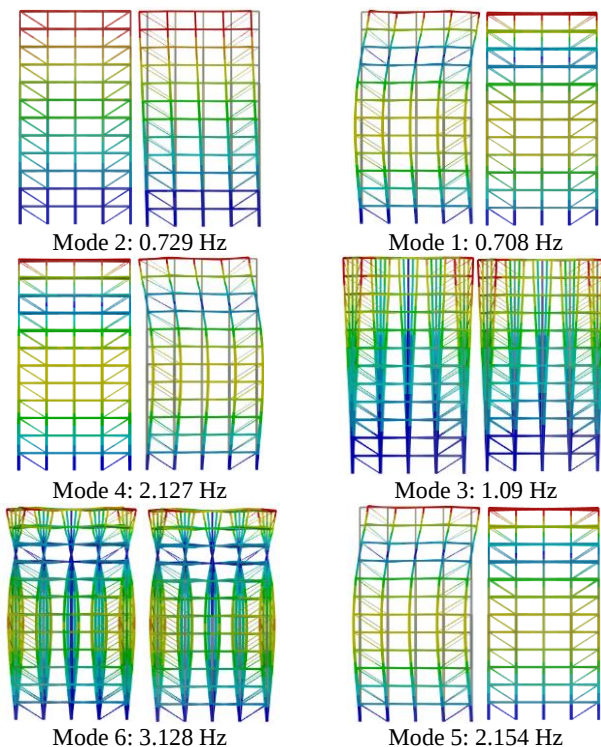
(الف) ضریب لغزش صفر-بدون بادبند (F)



(ب) ضریب لغزش ۱۰۰٪- دارای بادبند (F+B)

شکل ۸. مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان یک قاب دوطبقه.

Fig. 8. Comparison of the displacement time history for a two-story frame.



شکل ۹. فرکانس طبیعی ساختمان ۱۲ طبقه در حالت استفاده از میراگر از نمای روبرو و جانب.

Fig. 9. The natural frequency of a 12-story building in the case of using a damper from the front and side views.

(۸) نشان داده شده است نمودارهای تاریخچه زمانی تغییر مکان طبقه دوم در قاب‌های با بار لغزشی ۰٪ با قابل خمشی بدون بادبند مقایسه و در حالت قاب‌های با نیروی لغزش ۱۰۰٪ با قاب مهاربندی شده مقایسه شده است.

بر اساس نتایج هنگامی که بار لغزش میراگر صفر باشد قاب مدل شده رفتاری شبیه قاب بدون بادبند دارد و در صورت استفاده از بار لغزشی ۱۰۰٪ رفتار قاب شبیه قاب دارای بادبند است بنابراین با توجه به نزدیکی پاسخ‌ها می‌توان کفایت مدل میراگر به‌کاررفته را تأیید کرد.

۳- نتایج و بحث

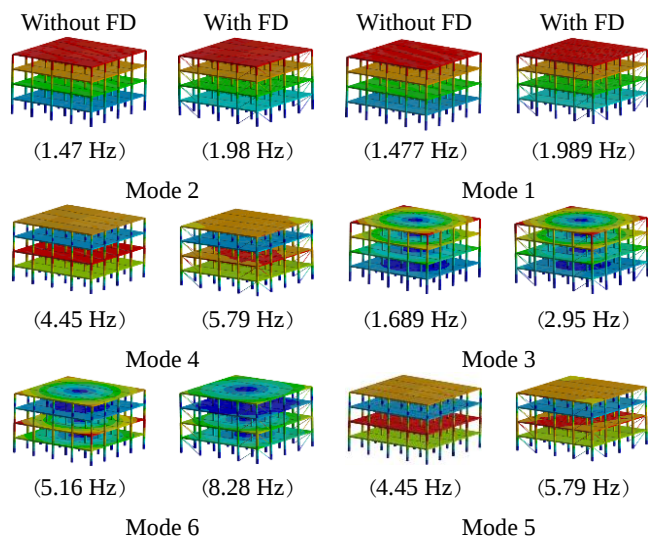
تحلیل مودال ساختمان یک روش تحلیلی است که در طراحی و تحلیل سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، رفتار دینامیکی ساختمان بر اساس مودهای طبیعی آن بررسی می‌شود. مودهای طبیعی، حالت‌های ارتعاشی اصلی یا رفتارهای دینامیکی مستقل ساختمان هستند که در زمان عدم اعمال نیروهای خارجی، ساختمان به این حالت‌ها ارتعاش می‌کند. در شکل (۹) فرکانس طبیعی ساختمان ۱۲ طبقه در حالت استفاده از میراگر از نمای روبرو و جانب آورده شده است.

مودهای اول تا ششم به ترتیب نشان‌دهنده شش حالت ارتعاشی اصلی ساختمان هستند که با فرکانس‌های طبیعی متفاوت ارتعاش می‌کنند. مود اول دارای کمترین فرکانس طبیعی و برابر با ۰/۷۰۸ هرتز است و مود ششم دارای بیشترین فرکانس طبیعی است. هر مود نشان‌دهنده یک الگوی ارتعاشی مشخص است که ساختمان در آن ارتعاش می‌کند.

در شکل (۱۰) مقایسه پاسخ فرکانس طبیعی یک ساختمان ۱۲ طبقه بین دو حالت با و بدون میراگر نشان داده شده است.

همان طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است افزودن میراگر باعث افزایش فرکانس طبیعی سازه در تمامی مودهای اول تا ششم شده است. این تغییر به دلیل اضافه شدن سختی کلی سازه ناشی از میراگر اصطکاکی است که در هنگام تحریک ساختمان با اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین قطعات مختلف میراگر موجب افزایش سختی و در نتیجه افزایش فرکانس طبیعی شده است.

در شکل (۱۱) مقایسه بین فرکانس‌های طبیعی اول تا ششم ساختمان ۸ طبقه بین دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی نشان



شکل ۱۲. تأثیر میراگر بر فرکانس طبیعی ساختمان ۴ طبقه

Fig. 12. Effect of damper on natural frequency of 4-story building

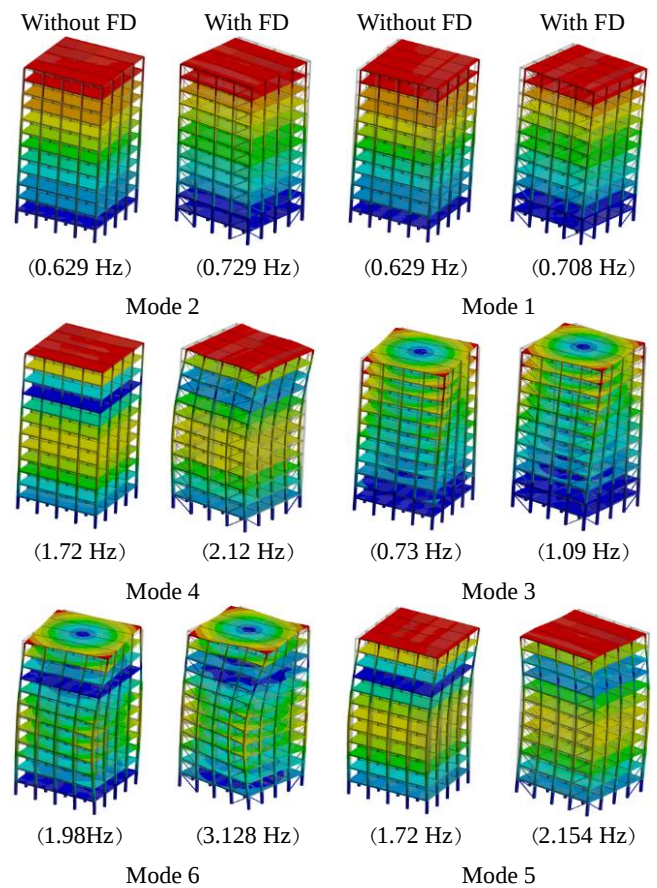
جدول ۲. تأثیر میراگر بر فرکانس طبیعی ساختمان‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه

Table 2. Effect of damper on natural frequency of 4- 8- and 12-story building

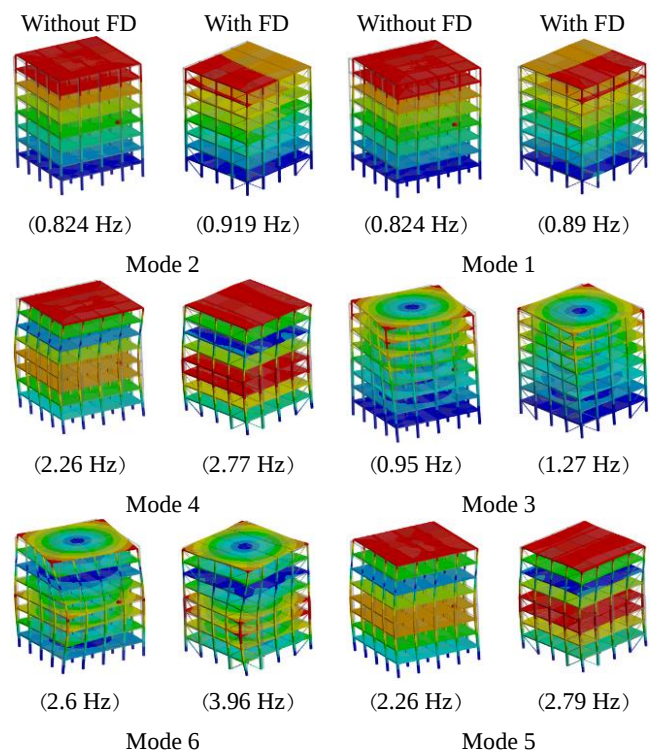
12 Story		8 Story		4 Story		Mode No.
with FD	Without FD	with FD	Without FD	with FD	Without FD	
0.708	0.629	0.89	0.824	1.989	1.477	1
0.729	0.629	0.919	0.824	1.989	1.477	2
1.09	0.736	1.27	0.95	2.95	1.689	3
2.127	1.72	2.77	2.26	5.79	4.45	4
2.154	1.72	2.79	2.26	5.79	4.45	5
3.128	1.98	3.96	2.6	8.28	5.16	6

مودال این امکان را می‌دهد تا فرکانس‌های طبیعی ساختمان تعیین شود. فرکانس طبیعی یک ساختمان وابسته به ویژگی‌های مکانیکی و هندسی آن است و نشان می‌دهد که ساختمان در چه فرکانس‌هایی به صورت طبیعی ارتعاش می‌کند. اطلاعات در خصوص فرکانس‌های طبیعی ساختمان به طراحان کمک می‌کند تا از ارتعاشات ناخواسته و تشدیدهای ممکن در ساختمان پیشگیری کنند. در جدول ۲ فرکانس طبیعی ساختمان‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر ارائه شده است.

همان طور که در جدول (۲) نشان داده شده است تأثیر میراگر در مودهای بالاتر بیشتر از مودهای پایین‌تر است با این حال مود سوم و ششم بیشترین تأثیرپذیری میراگر را نشان داده است. همچنین نتایج نشان از تغییرات قابل ملاحظه‌تر ساختمان ۴ طبقه نسبت به ۸ طبقه و سپس ۱۲ طبقه را نشان می‌دهد که به معنای غالب بودن سختی کلی ساختمان نسبت به حالت اضافه نمودن میراگر است.



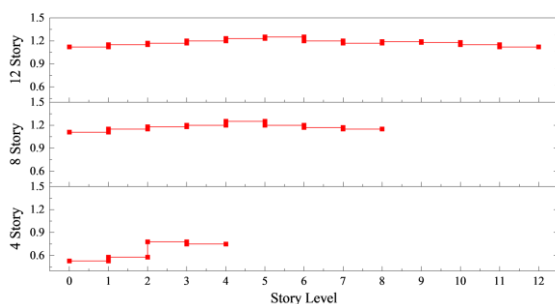
شکل ۱۰. تأثیر میراگر بر فرکانس طبیعی ساختمان ۱۲ طبقه

Fig. 10. Effect of damper on natural frequency of 12-story building.


شکل ۱۱. تأثیر میراگر بر فرکانس طبیعی ساختمان ۸ طبقه

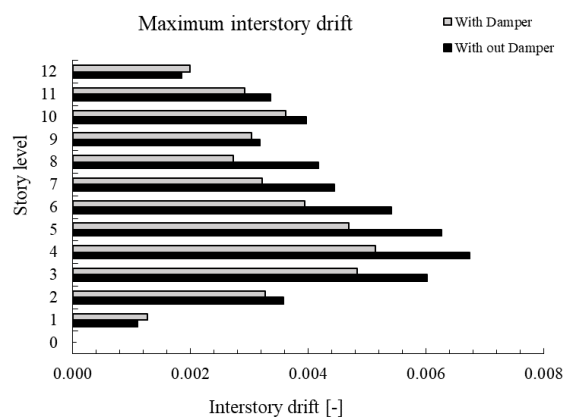
Fig. 11. Effect of damper on natural frequency of 8-story building

ساختمان در حالت با میراگر نشان داده شده است. اختلاف بین تنش برشی در جابه جایی‌های اولیه کمتر است و با افزایش جابه جایی اختلاف تنش برشی قابل ملاحظه‌تر می‌شود بیشترین میزان تنش برشی متعلق به ساختمان ۱۲ طبقه است و کمترین میزان تنش برشی نیز مربوط به ساختمان ۴ طبقه است که مقدار آن پس از جابه جایی ۴۰ سانتیمتر افت شدیدی پیدا کرده است.



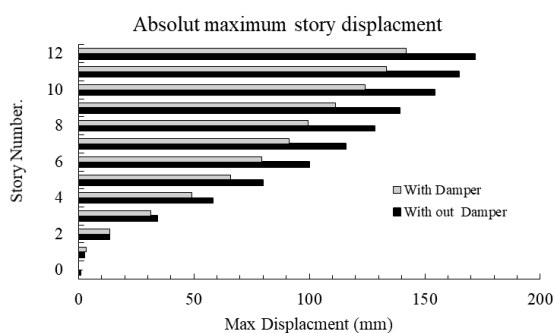
شکل ۱۳. نسبت جابه‌جایی نسبی طبقات در ساختمان‌های مختلف

Fig. 13. The story drift ratio in different buildings



شکل ۱۴. مقایسه بیشینه جابه‌جایی نسبی داخلی ساختمان ۱۲ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی

Fig. 14. Comparison of maximum interstory drift of 12-story building in both with and without friction damper



شکل ۱۵. مقایسه بیشینه جابه‌جایی در ساختمان ۱۲ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی.

Fig. 15. Comparison of absolute maximum displacement of 12-story building in both with and without friction damper

تحلیل مودال ساختمان این امکان را می‌دهد تا رفتار دینامیکی ساختمان را در برابر نیروهای دینامیکی مختلف، مانند نیروی زلزله یا بارهای دینامیکی دیگر، بررسی کرد. با مدل کردن ساختمان بر اساس مودهای طبیعی، می‌توان نیروهای دینامیکی را به صورت دقیق‌تری در ساختمان تحلیل کرد و اثر آن‌ها روی ساختمان را پیش‌بینی کرد.

۳-۱- جابه‌جایی نسبی ساختمان

نمودار جابه‌جایی نسبی طبقات مختلف ساختمان‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه برای ساختمان با میراگر اصطکاکی در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در ساختمان ۴ طبقه مقادیر جابه‌جایی نسبی طبقه دوم چند برابر از طبقه اول بیشتر شده است و در طبقه سوم و چهارم با کاهش جابه‌جایی نسبی مواجه شده است. در ساختمان‌های ۸ طبقه مشاهده می‌شود که افزایش ارتفاع تا طبقه پنجم با افزایش جابه‌جایی نسبی و سپس با کاهش جابه‌جایی نسبی تا طبقه ۸ مواجه شده است. در ساختمان ۱۲ طبقه نیز از طبقه اول تا ۵ روند افزایش و سپس یک کاهش جزئی در طبقه ۶ و ۷ وجود دارد سپس یک افزایش در طبقه ۸ و در ادامه تنها روند کاهشی جابه‌جایی نسبی مشاهده می‌شود.

در شکل (۱۲) مقایسه جابه‌جایی نسبی داخلی ساختمان ۱۲ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی نشان داده شده است.

بر اساس نتایج جابه‌جایی نسبی در بخش میانی ساختمان می‌توان دریافت که بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات ۴ و ۵ رخ داده است و سپس مقدار جابه‌جایی نسبی میانی روند کاهش داشته است. باین حال در طبقات ۹ و ۱۰ این روند با افزایش محلی مواجه شده است که پس از آن دوباره با کاهش جابه‌جایی نسبی مواجه شده است.

نتایج شکل ۱۵ نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع ساختمان مقدار جابه‌جایی نسبی روند افزایش داشته است باین حال استفاده از میراگر موجب کاهش زیاد جابه‌جایی نسبی خصوصاً در طبقات بالاتر شده است.

در شکل ۱۵ بیشینه جابه‌جایی در ساختمان ۱۲ طبقه در دو حالت با و بدون میراگر اصطکاکی با یکدیگر مقایسه شده است.

در شکل ۱۶ تأثیر تعداد طبقه در نمودار جابه‌جایی-برش پایه

به پایه‌های سازه اعمال شد. سازه‌ها تحت بار زمانی زلزله تحریک شدند. این کار برای دو حالت با میراگر و بدون میراگر انجام شد. همچنین هر سازه، تحت بارگذاری ۲ رکورد زلزله، شامل رکورد نزدیک به گسل و رکورد دور از گسل، قرار گرفتند. با اعمال میراگر اصطکاکی، نتایج زیر حاصل شد:

۱- از آنجاکه در بارگذاری زلزله نیرو وارد شده به سازه از پی وارد می‌شود، پس میراگرهای مستقر در طبقات اول و دوم نقش بسزایی در میرا کردن نیروهای وارد شده به کل سازه را دارند؛ اما در سازه‌های بلند چون میراگرهای پایین تنها مقداری از نیرو را میرا می‌کنند و برای کنترل حرکت و شتاب طبقات بالا، میراگرهای طبقات میانی بسیار مؤثر هستند. به همین خاطر است که کاهش درصد شتاب طبقه بالایی در سازه ۱۲ طبقه نسبت به سازه ۸ طبقه بیشتر است.

۲- از آنجایی که در این شبیه‌سازی از میراگرهای مشابه برای همه طبقات و همه ساختمان‌ها استفاده شده است، با افزایش وزن سازه نسبت توان میرایی افزایش نیافته، پس تنش‌های میانگین (فون میزز) و برشی کمتر کاهش یافته است.

۳- با بررسی بیشینه جابه‌جایی در کل سازه، می‌توان دریافت که استفاده از میراگرهای اصطکاکی در ساختمان ۴ طبقه تحت زلزله‌های نزدیک و دور از گسل کاملاً مؤثر بوده است.

۴- با بررسی نیروی برشی بیشینه در ساختمان‌ها، مشخص است که نوسانات تغییرات کاهش یافته و میرا شده است و در کل چه در کلیه سازه‌ها به ویژه سازه ۴ طبقه و به خصوص تحت زلزله‌های نزدیک به گسل، این میراگرها مثر ثمر بوده است.

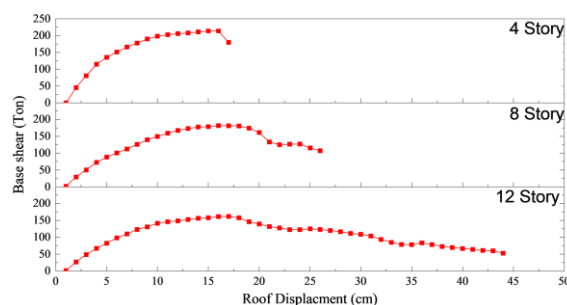
در انتها می‌توان گفت به علت هزینه بسیار زیاد خرید و اجرای میراگرهای بزرگ ساختمانی‌چگونگی چیدمان و تعداد آن در طبقات مختلف بسیار مهم است.

قدردانی

در انجام این پژوهش حمایتی از سوی مراکز یا دانشگاه‌ها نشده است.

تعارض منافع

هیچ تعارض منافی برای نویسندگان این پژوهش در انتشار آن وجود ندارد.



شکل ۱۶. تأثیر تعداد طبقه در نمودار جابه‌جایی-برش پایه ساختمان در حالت با میراگر.

Fig. 16. The effect of the story number on the displacement-shear diagram of the foundation of the building in the case with dampers.

جدول ۳. درصد کاهش بیشینه پارامترهای مورد بررسی

Table 3. The percentage of the maximum reduction of the studied parameters

Acceleration	Equivalent Stress	Deformation	Shear Force	Cases
	Damping Percent			
58%	83%	30%	32%	4S-Far
66%	84%	40%	61%	4S-Near
77%	62%	44%	57%	8S-Far
40%	27%	25%	28%	8S-Near
31%	20%	18%	23%	12S-Far
27%	27%	17%	25%	12S-Near

در جدول (۳) درصد کاهش بیشینه پارامترهای مورد ارزیابی برای سازه با میراگر نسبت به سازه بدون میراگر در دو حالت دور و نزدیک به گسل نشان داده شده است.

بر اساس نتایج مربوط به شتاب بیشینه در زلزله دور از گسل، بهترین تأثیر میراگرها روی ساختمان‌های ۸ طبقه با ۷۷٪ کاهش، بوده است؛ و در زلزله‌های نزدیک به گسل مربوط به ساختمان ۴ طبقه با ۶۶٪ کاهش است. همچنین در زلزله‌های نزدیک و دور از گسل، بهترین تأثیر میراگرها روی تنش معادل فون میزز مربوط به ساختمان‌های ۴ طبقه با ۸۳٪ و ۸۴٪ کاهش، بوده است. در زلزله‌های دور از گسل، بهترین تأثیر میراگرها روی جابه‌جایی مربوط به ساختمان ۸ طبقه با ۴۴٪ کاهش، بوده است. همچنین تنش برشی نشان می‌دهد که در زلزله‌های نزدیک به گسل بیشترین تأثیر میراگر مربوط به ساختمان ۴ طبقه با ۶۱٪ کاهش است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای بررسی آثار میراگرها روی سازه‌های اسکلت فلزی تحت نیروی زلزله، سه ساختمان ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مدل‌سازی و سپس شبیه‌سازی شد. نیروی زلزله به صورت جابه‌جایی اجباری

سهم نویسندگان

منابع مالی

سهم هر یک از نویسندگان با هم برابر است (۵۰٪) برای هر نویسنده).

در انجام این پژوهش از منابع مالی شخص یا نهادهای استفاده نشده است.

References

- [1] Luo, Q., Dai, F., Liu, Y., Gao, M., Li, Z. and Jiang, R., 2021. Seismic performance assessment of velocity pulse-like ground motions under near-field earthquakes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(8), pp.3799-3816.
- [2] Kamranzad, F., Memarian, H. and Zare, M., 2020. Earthquake risk assessment for Tehran, Iran. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), p.430.
- [3] Karimzadeh, S., Miyajima, M., Hassanzadeh, R., Amiraslazadeh, R. and Kamel, B., 2014. A GIS-based seismic hazard, building vulnerability and human loss assessment for the earthquake scenario in Tabriz. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, pp.263-280.
- [4] Soong, T.T. and Spencer Jr, B.F., 2002. Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering structures*, 24(3), pp.243-259.
- [5] Bhaskararao, A.V. and Jangid, R.S., 2006. Seismic analysis of structures connected with friction dampers. *Engineering structures*, 28(5), pp.690-703.
- [6] Chandra, R., Masand, M., Nandi, S.K., Tripathi, C.P., Pall, R. and Pall, A., 2000, January. Friction-dampers for seismic control of La Gardenia towers south city, Gurgaon, India. In *12th world conference on earthquake engineering, Auckland, New Zealand*.
- [7] Vail, C., Hubbell, J., O'Connor, B., King, J. and Pall, A., 2004, August. Seismic upgrade of the Boeing commercial airplane factory at Everett, WA, USA. In *The 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada*.
- [8] Pasquin, C., Leboeuf, N., Pall, R.T. and Pall, A., 2004, August. Friction dampers for seismic rehabilitation of Eaton's building, Montreal. In *13th world conference on earthquake engineering* (pp. 1-2).
- [9] Hale, T. and Pall, R., 2000, January. Seismic upgrade of the Freeport water reservoir, Sacramento, California. In *Twelfth World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand*.
- [10] Balazic, J., Guruswamy, G., Elliot, J., Pall, R. and Pall, A., 2000. Seismic Rehabilitation of Justice Headquarters Building, Ottawa, Canada. In *Twelfth World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand*.
- [11] Mahdavian, S., et al. 2007. Using friction dampers for vibration control of buildings. In *International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, -(5), 0-0. SID. <https://sid.ir/paper/447227/fa>. [In Persian]
- [12] Jalali, S. G. and Vaseghi, J., 2009. Performance of Steel Frames Equipped with Rotational Friction Dampers (RFD). *Structure and Steel*, 5(6), 93-105. SID. <https://sid.ir/paper/136617/fa>. [In Persian]
- [13] Vaseghi Amiri, J., Navayinia, B. and Navaei, S., 2011. Evaluation of performance of eccentric braced frame with friction damper. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 39(5), pp.717-732.
- [14] Amiri, J.V. and Tamjid, F., 2014. Evaluation of Seismic Performance of Reinforced Concrete Frames Using Pall Friction Damper. *Modares Journal of Civil Engineering*, 14(2).
- [15] Mirzaeeafard, H., Mirtaheri, M. and Rahmani S. H., 2016. Effect of Cylindrical Frictional Dampers on Seismic Response of Steel Structures ". *Modares Civil Engineering*, 16(1), pp.227-236. [In Persian].
- [16] Wang, Y., Zhou, Z., Xie, Q. and Huang, L., 2020. Theoretical analysis and experimental investigation of hysteretic performance of self-centering variable friction damper braces. *Engineering Structures*, 217, p.110779.
- [17] Wang, Y., Zeng, B., Zhou, Z. and Xie, Q., 2021. Hysteretic and seismic performance of dual self-centering variable friction damper braces. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147, p.106774.
- [18] Javidan, M.M. and Kim, J., 2022. A rotational friction damper-brace for seismic design of resilient framed structures. *Journal of Building Engineering*, 51, p.104248.
- [19] Ghafouri-Nejad, A., Alirezaei, M., Mirhosseini, S.M. and Zeighami, E., 2021, August. Parametric study on seismic response of the knee braced frame with friction damper. In *Structures* (Vol. 32, pp. 2073-2087). Elsevier.
- [20] Bakhshayesh, Y., Shayanfar, M. and Ghamari, A., 2021. Improving the performance of concentrically braced frame utilizing an innovative shear damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 182, p.106672.
- [21] Ding, Y., Zhou, Z., Huang, L. and Si, Y., 2021. Seismic performance of self-centering glulam frame with friction damper. *Engineering Structures*, 245, p.112857.
- [22] Pourzangbar, A., Vaezi, M., Mousavi, S.M. and Saber, A., 2020. Effects of brace-viscous damper system on the dynamic response of steel frames. *International Journal of Engineering. Transactions B: Applications*, 33(5), pp.720-731.

- [23] Ebrahimi, S. and Mirghaderi, S.R., 2023. A new friction-slip brace damper to improve seismic performance of braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 207, p.107945.
- [24] Barbagallo, F., Bosco, M., Floridia, A., Marino, E.M. and Rossi, P.P., 2020. Design for seismic upgrading of existing RC frames by friction dampers. *International Journal*, 37(1-2020).
- [25] Ebadi Jamkhaneh, M., Homaioon Ebrahimi, A. and Shokri Amiri, M., 2019. Investigation of the seismic behavior of brace frames with new corrugated all-steel buckling restrained brace. *International Journal of Steel Structures*, 19, pp.1225-1236.
- [26] Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P. and Su, Y.F., 1993. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction. *Earthquake spectra*, 9(3), pp.505-528.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Tabatabaei Mirhosseini, R. and Falahatnejad, A., 2025. Evaluation of the seismic performance of bracing frames with friction dampers. *Modares Civil Engineering journal*, 25(3), pp.7-18.

DOI: 10.22034/25.3.3

