

# کنترل نیمه فعال پیش‌بین برج میلاد مجهز به میراگر جرمی

## تنظیم‌شده در ترکیب با میراگر سیال مغناطیسی

سید مهدی زهرائی  
دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی،  
دانشگاه تهران، ایران  
گروه مهندسی عمران، دانشگاه اتاوا، کانادا  
mzahrai@ut.ac.ir

سینا جعفرپور  
دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی،  
دانشگاه تهران، ایران  
sina.jafarpour@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۶/۲۴

### چکیده

در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای برج میلاد مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شده (TMD) نیمه‌فعال<sup>۱</sup> تحت رکوردهای مقیاس‌شده‌ی زلزله بررسی شده و با دو حالت کنترل‌نشده و میراگر جرمی غیرفعال مقایسه گردیده است. برای ارزیابی دقیق‌تر، هشت شاخص عملکردی شامل مقادیر بیشینه و جذر میانگین مربعات پاسخ‌های سازه مورد استفاده قرار گرفت. رکوردهای زلزله با بهره‌گیری از روش مقیاس‌سازی طیفی مبتنی بر موجک تنظیم شدند تا محتوای انرژی لرزه‌ای در بازه‌های تناوب بحرانی سازه به‌درستی بازنمایی شود و تحلیل واقع‌گرایانه‌تری از پاسخ سازه حاصل گردد. در سامانه نیمه‌فعال، از میراگر سیال مغناطیسی<sup>۲</sup> به‌عنوان عنصر میرایی درون میراگر جرمی به کار گرفته شد. برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی این میراگرها، از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شد که پاسخ سریع‌تری نسبت به مدل‌های پارامتری سنتی ارائه می‌دهد. همچنین، کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین<sup>۳</sup> برای تنظیم نیروی میرایی در میراگرهای سیال مغناطیسی به کار گرفته شد. این الگوریتم با پیش‌بینی رفتار سازه در گام‌های آینده، امکان واکنش سریع و هدفمند در برابر تحریک‌های لرزه‌ای را فراهم کرده است. نتایج عددی نشان داد که سامانه نیمه‌فعال پیشنهادی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای برج عملکرد مؤثری داشته است. به‌طور خاص، مقدار جذر میانگین مربعات جابه‌جایی، سرعت و جابه‌جایی نسبی حدود ۳۰٪ نسبت به حالت کنترل‌نشده کاهش یافت، در حالی که این کاهش در حالت غیرفعال حدود ۱۵٪ بود. جذر میانگین مربعات شتاب نیز در حالت نیمه‌فعال بیش از ۱۵٪ کاهش داشت، در حالی که در حالت غیرفعال تنها حدود ۳٪ کاهش مشاهده شد. این نتایج نشان‌دهنده‌ی اثربخشی ترکیب کنترل پیش‌بین با میرایی متغیر در ارتقای تاب‌آوری لرزه‌ای سازه‌های بلند است.

**واژگان کلیدی:** سازه‌های مخابراتی، میراگر سیال مغناطیسی، میراگر جرمی تنظیم‌شده، مقیاس‌سازی طیفی به روش

موجک، کنترل‌کننده پیش‌بین

## ۱. مقدمه

سازه‌های بلند همچون برج‌های مخابراتی به دلیل ویژگی‌هایی نظیر دوره تناوب طبیعی زیاد و میرایی ذاتی پایین در برابر بارهای جانبی همچون باد و زلزله آسیب‌پذیرند. اهمیت این موضوع در مناطق لرزه‌خیز نظیر ایران دوچندان است، چرا که فعالیت گسل‌های فعال می‌تواند ارتعاشات شدیدی را به این دسته از سازه‌های حیاتی وارد کند. از این رو، بهره‌گیری از سامانه‌های نوین کنترل ارتعاشات، به‌ویژه سامانه‌های کنترلی نیمه‌فعال، به یکی از راهکارهای کلیدی در افزایش تاب‌آوری سازه‌های بلند در برابر مخاطرات طبیعی تبدیل شده است [۱].

روش‌های کنترل غیرفعال، اگرچه به دلیل سادگی، قابلیت اطمینان و عدم نیاز به انرژی خارجی مورد توجه قرار دارند، اما توانایی تطبیق با شرایط متغیر بارگذاری را ندارند. یکی از رایج‌ترین سامانه‌های کنترل غیرفعال در سازه‌های بلند، میراگر تنظیم‌شده‌ی جرمی است. نخستین بار، ایده‌ی استفاده از این نوع میراگر در سال ۱۹۱۱ توسط فرام برای کاهش نوسانات گهواره‌ای کشتی مطرح شد و پس از آن، کاربرد آن در مهندسی سازه گسترش یافت [۲]. در حوزه‌ی مهندسی سازه، میراگر جرمی از اجزایی چون جرم متمرکز، فنر و کمک‌فنر تشکیل شده و با هدف کاهش ارتعاشات ناشی از تحریکات خارجی، به کار گرفته می‌شود. این نوع میراگر معمولاً در بخش فوقانی سازه‌های بلند نصب می‌گردد و به گونه‌ای طراحی می‌شود که فرکانس طبیعی آن با فرکانس مود اول سازه‌ی کنترل‌نشده هم‌راستا باشد. این هم‌فرکانسی موجب بیشینه‌سازی اثربخشی میراگر در کاهش پاسخ دینامیکی سازه می‌شود [۱،۳].

میراگرهای تنظیم‌شده‌ی جرمی به انواع مختلفی از جمله نوع ساده، پاندولی، دو جهتی و سیال تنظیم‌شده تقسیم می‌شوند [۱]. تا سال ۲۰۲۲، بیش از ۲۰۸ سازه‌ی بلند در جهان به این نوع میراگر مجهز شده‌اند که از این میان، ۱۳۱ سازه از نوع غیرفعال (ساده یا پاندولی) بهره برده‌اند، آماری که نشان‌دهنده‌ی عملکرد موفق این سامانه‌ها در برابر زلزله‌ها و بادهای شدید گذشته است [۴].

در مقابل سامانه‌های کنترلی غیرفعال، سامانه‌های کنترلی فعال با بهره‌گیری از حسگرها، الگوریتم‌های کنترلی و محرک‌های دینامیکی، امکان تنظیم لحظه‌ای پاسخ سازه را فراهم می‌سازند. این سامانه‌ها با اعمال نیروی خارجی، میرایی مؤثر سازه را افزایش داده و عملکرد مناسبی در برابر تحریکات متغیر نشان می‌دهند. با این حال، نیازمند مصرف انرژی زیاد بوده و در صورت قطع برق یا بروز ناپایداری عملکرد مطلوب خود را از دست می‌دهند [۳]. نخستین نمونه‌ی عملی استفاده از کنترل فعال در سازه‌های بلند، در سال ۱۹۸۹ توسط شرکت کاجیما در ساختمان کیوباشی سیوا ژاپن اجرا شد که در آن، دو میراگر جرمی فعال برای کاهش حرکات جانبی و پیچشی ناشی از باد و زلزله به کار گرفته شدند [۵].

مطالعات میدانی نیز مؤید اثربخشی سامانه‌های کنترل فعال در کاهش ارتعاشات ناشی از باد هستند. به‌عنوان نمونه، کائو و همکاران [۶] استفاده از میراگر جرمی فعال را برای کاهش ارتعاشات باد در یک برج مخابراتی ۳۴۰ متری در شهر نانجینگ چین گزارش کرده‌اند. همچنین، لو و همکاران [۷] دو میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی فعال مشابه را در یکی از طبقات فوقانی برج ۴۹۲ متری مرکز مالی جهانی شانگهای نصب

کردند که هدف آن‌ها کاهش ارتعاشات ناشی از بادهای شدید بوده است. ژو و همکاران [۸] عملکرد یک سامانه‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی فعال را در یک برج بسیار بلند به ارتفاع ۶۰۰ متر مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، کنترل‌کننده‌ی  $LQR^4$  با بهره‌گیری از الگوریتم ضریب متغیر برای تنظیم پاسخ سامانه به کار گرفته شد. عملکرد این سامانه در شرایط واقعی، طی عبور طوفان، تحلیل گردید و نتایج نشان داد که استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی فعال موجب کاهش قابل توجه ارتعاشات ناشی از باد شده و پایداری سازه را به طور مؤثری ارتقاء داده است.

با وجود عملکرد مطلوب سامانه‌های کنترلی فعال در بسیاری از موارد، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد. وابستگی کامل به منبع انرژی خارجی، آن‌ها را در برابر قطع برق در شرایط بحرانی مانند زلزله یا طوفان آسیب‌پذیر می‌سازد. افزون بر این، پیچیدگی فنی بالا و هزینه‌های قابل توجه بهره‌برداری و نگهداری، موجب شده است که استفاده از سامانه‌های کنترل فعال در پروژه‌های عمرانی با محدودیت‌هایی همراه باشد [۶]. [۷]. به عنوان راه‌حل میانی، سامانه‌های نیمه‌فعال و به‌ویژه میراگرهای سیال مغناطیسی معرفی شده‌اند که با صرف انرژی اندک، قابلیت تنظیم لحظه‌ای میرایی و اطمینان‌پذیری بالا را فراهم می‌کنند. این سامانه‌ها با بهره‌گیری از اجزای قابل تنظیم مانند میراگرهای سیال مغناطیسی، قادرند بدون اعمال مستقیم نیروی خارجی، ویژگی‌های دینامیکی میراگر را به صورت لحظه‌ای تنظیم کنند. مزیت اصلی این سامانه‌ها، مصرف انرژی بسیار پایین در مقایسه با سامانه‌های فعال و در عین حال، حفظ قابلیت تطبیق با شرایط متغیر بارگذاری است، افزون بر این، در صورت قطع برق در

زمان اعمال بار جانبی، عملکرد آن‌ها به صورت غیرفعال ادامه یافته و همچنان در کاهش ارتعاشات مؤثر باقی می‌مانند (دارای امنیت در برابر خرابی هستند)، ویژگی‌ای که در برابر وابستگی کامل سامانه‌های فعال به منبع انرژی، مزیتی حیاتی محسوب می‌شود [۹]. بر اساس مطالعات انجام‌شده، سامانه‌های کنترلی نیمه‌فعال در بسیاری از موارد عملکردی برتر نسبت به روش‌های غیرفعال از خود نشان داده‌اند و در محدوده‌ی گسترده‌ای از بارگذاری‌های دینامیکی، توانایی دستیابی به بخش قابل توجهی از اثربخشی سامانه‌های فعال را دارا هستند [۳].

میراگرهای سیال مغناطیسی از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین میراگرهای نیمه‌فعال در کنترل ارتعاشات سازه‌ای محسوب می‌شوند. این نوع میراگرها نخستین بار در دهه‌ی ۱۹۴۰ میلادی، پس از کشف سیال مغناطیسی توسط جاکوب رابینو، توسط شرکت لرد توسعه یافتند [۱۰]. سیال مغناطیسی ماده‌ای هوشمند متشکل از ذرات ریز آهن معلق در یک مایع حامل (مانند روغن) است که در حضور میدان مغناطیسی، ساختار داخلی آن به سرعت تغییر کرده و خاصیت شبه‌جامد پیدا می‌کند. این تغییر رفتار موجب افزایش تنش تسلیم و چسبندگی سیال شده و در نتیجه، میزان میرایی قابل کنترل می‌شود. میدان مغناطیسی مورد نیاز برای تحریک سیال، از طریق جریان الکتریکی تأمین‌شده توسط یک منبع تغذیه خارجی (معمولاً با ولتاژ ۱۲ تا ۲۴ ولت) به سیم‌پیچ داخلی پیستون اعمال می‌گردد. این فرآیند امکان تنظیم لحظه‌ای میرایی را بدون اعمال مستقیم نیروی خارجی فراهم می‌سازد و اساس عملکرد نیمه‌فعال این میراگرها را تشکیل می‌دهد. میراگرهای MR در

محدوده‌ی دمایی وسیع (حدود ۴۰- تا ۱۵۰+ درجه‌ی سلسیوس) و میدان مغناطیسی ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلوآمپر بر متر، قادر به تولید تنش برشی قابل توجهی در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال هستند که آن‌ها را برای کاربرد در سازه‌های بلند تحت بارهای شدید، به گزینه‌ای قابل اطمینان تبدیل می‌کند [۹].

در سال‌های اخیر، ترکیب میراگرهای سیال مغناطیسی با میراگرهای تنظیم‌شده‌ی جرمی نیمه‌فعال به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در کنترل ارتعاشات سازه‌های بلند مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. کنگ و همکاران [۱۱] عملکرد یک میراگر جرمی نیمه‌فعال مجهز به میراگر MR را در یک برج ۷۶ طبقه تحت اثر باد بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از الگوریتم کنترل گراند‌هوک<sup>۵</sup>، نشان دادند که این سامانه کنترلی می‌تواند عملکردی مشابه با میراگر جرمی فعال داشته باشد، در حالی که مصرف انرژی آن به‌مراتب کمتر است. دیمیتریو و همکاران [۱۲] با بررسی چند الگوریتم کنترلی مختلف از جمله گراند‌هوک، PID، و کنترل بهینه بریده‌شده<sup>۶</sup>، دریافتند که برخی الگوریتم‌ها در کاهش پاسخ سازه مؤثرترند، هرچند ممکن است موجب افزایش جابه‌جایی نسبی بین جرم میراگر و سازه شوند. بطهای و همکاران [۱۳] با استفاده از کنترل‌کننده‌های فازی نوع اول و دوم برای تنظیم میراگر MR در یک مدل سازه‌ای چند درجه آزادی، نشان دادند که کنترل فازی تطبیقی می‌تواند در مواجهه با عدم قطعیت‌های ورودی، عملکرد پایدارتری نسبت به روش‌های کلاسیک ارائه دهد.

علاوه بر بررسی رفتار کنترل نیمه‌فعال و مقایسه‌ی آن با روش‌های فعال و غیرفعال، پژوهش‌های متعددی در زمینه‌ی انتخاب الگوریتم‌های کنترلی مناسب برای این

سامانه‌ها انجام شده است. کوتسولوکاس و همکاران [۱۴]، برای کنترل ارتعاشات یک برج بلندمرتبه‌ی واقعی (برج ۲۴۵ متری روتوایل در آلمان) تحت اثر بارگذاری باد، از میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی فعال بهره گرفتند و با استفاده از الگوریتم پیش‌بین مدل همراه با فیلتر کالمن<sup>۷</sup>، عملکرد سامانه کنترلی را بهبود بخشیدند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که الگوریتم پیش‌بین در کاهش دامنه‌ی پیک پاسخ‌ها عملکرد بهتری نسبت به کنترل‌کننده‌ی LQR دارد، هرچند این برتری با افزایش مصرف انرژی همراه بوده است. کنترل پیش‌بین مدل، در بسیاری از مطالعات اخیر به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های کنترلی برای سامانه‌های کنترلی سازه‌ای معرفی شده است. این الگوریتم با بهره‌گیری از مدل دینامیکی سامانه و پیش‌بینی رفتار آینده‌ی آن، قادر است در هر لحظه، تصمیم کنترلی بهینه‌ای اتخاذ کند که ضمن رعایت محدودیت‌های فیزیکی و عملیاتی، عملکرد مطلوبی در کاهش ارتعاشات ارائه دهد. این الگوریتم با تعریف یک تابع هدف شامل معیارهایی نظیر پایداری، ردیابی نقطه‌ی مبنا (حالت سکون)، و مصرف انرژی، تلاش می‌کند تا عملکرد سامانه را در بازه‌ی زمانی پیش‌بینی‌شده بهینه‌سازی کند. فرآیند کنترل به‌صورت متوالی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی و عملیاتی سامانه انجام می‌شود و در هر گام، با به‌روزرسانی وضعیت سازه، تصمیم‌گیری کنترلی جدیدی صورت می‌گیرد [۱۵].

کاربردهای کنترل پیش‌بین مدل در صنایع مختلفی از جمله رباتیک، خودرو، اتوماسیون ساختمان و به‌ویژه مهندسی سازه و زلزله گزارش شده است. در زمینه‌ی کنترل ارتعاشات سازه‌های بلند، پژوهش‌های متعددی

اثر بخشی این روش را تأیید کرده‌اند. می و همکاران [۱۵] با استفاده از بازخورد شتاب و فیلتر کالمن، کنترل پیش‌بین مدل را برای سازه‌های یک و سه طبقه تحت تحریک لرزه‌ای به‌کار گرفتند و نشان دادند که این الگوریتم در کاهش پاسخ لرزه‌ای و تلاش کنترلی عملکرد مناسبی دارد. یان و همکاران [۱۶] نیز با مقایسه‌ی کنترل پیش‌بین مدل با روش‌های نیمه‌فعال دیگر، از جمله کنترل خطی درجه‌دوم گاوسی، دریافتند که کنترل پیش‌بین مدل در کنترل میراگرهای سیال مغناطیسی یک سازه‌ی بلند، عملکردی قابل‌اتکا دارد. همچنین چن و همکاران [۱۷] نسخه‌ی سریع‌تری از الگوریتم پیش‌بین مدل را معرفی کردند که با کاهش حجم محاسبات آنلاین، در سازه‌های بزرگ نظیر قاب‌های چندطبقه و پل‌های کابلی بسیار موثر عمل می‌کند.

برج میلاد، واقع در شمال غرب تهران، یکی از بلندترین برج‌های مخابراتی جهان محسوب می‌شود که با کاربری چندمنظوره طراحی شده و وظایفی همچون پخش رادیویی و تلویزیونی، ارتباطات مخابراتی، کنترل ترافیک و پایش‌های هواشناسی را برعهده دارد. این سازه از پنج بخش اصلی تشکیل شده است: پی عمیق، سازه‌ی پایه، شفت اصلی بتنی، سازه‌ی فوقانی بتنی و آنتن فولادی به ارتفاع ۱۲۰ متر. شفت اصلی شامل یک هسته‌ی مرکزی متشکل از دو هشت‌ضلعی تودرتو و چهار پایه‌ی توخالی دوزنقه‌ای شکل است که با افزایش ارتفاع، این پایه‌ها به تدریج باریک شده و تا تراز ۲۴۰ متری ادامه می‌یابند. قطر شفت از ۲۸ متر در پایه به ۱۷ متر در ارتفاع ۲۴۰ متر کاهش می‌یابد و هسته‌ی مرکزی تا ارتفاع ۳۱۵ متر ادامه دارد. سازه‌ی فوقانی از تراز ۲۴۷/۵ تا ۳۱۵ متر امتداد یافته و آنتن فولادی

نصب‌شده در بالای آن، ارتفاع نهایی برج را به ۴۳۵ متر می‌رساند [۱۸].

مطالعات متعددی به بررسی رفتار دینامیکی برج میلاد پرداخته‌اند. خالو و همکاران [۱۹] تحلیل‌های اجزای محدود خطی و غیرخطی را با در نظر گرفتن ترک‌خوردگی بتن و تغییرشکل‌های بزرگ انجام دادند. حر و همکاران [۲۰] روش اجزای طیفی را برای تحلیل لرزه‌ای برج با هدف بهبود کارایی محاسبات ارائه کردند. زعفرانی و همکاران [۲۱] نیز با شبیه‌سازی‌های لرزه‌ای مبتنی بر گسل‌های فعال شمال تهران، اثرات زلزله‌های نزدیک‌گسل بر برج را بررسی کردند. در ادامه، یحیایی و همکاران [۲۲] با انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت زلزله‌های طراحی، رفتار پلاستیک را به‌جز در بخش فوقانی در اغلب اجزای سازه مشاهده کردند. بازمونه و همکاران [۲۳] نیز عملکرد لرزه‌ای برج را با استفاده از روش زمان دوام و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی ارزیابی کردند. بارگذاری باد نیز توسط یحیایی و همکاران [۲۴] با بهره‌گیری از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی مانند LES<sup>۱</sup> و RANS<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن با داده‌های تونل باد اعتبارسنجی شد.

قربانی‌تنها و همکاران [۱۸] و [۲۵] یک مدل عددی مرجع برای برج میلاد ارائه دادند که در آن، سازه به‌صورت تیر طره‌ای با ۵۷ درجه آزادی انتقالی و ۵۷ درجه آزادی دورانی مدل‌سازی شد. آن‌ها با فرض هم‌زمانی مراکز جرم، سختی و آیرودینامیک، با استفاده از تکنیک کاهش گویان [۲۶]، درجات آزادی مربوط به مودهای دورانی را حذف کردند. در این مدل، یک میراگر جرمی تنظیم‌شده برای کاهش ارتعاشات ناشی از باد به‌کار گرفته شد که منجر به کاهش حدود ۵۶٪

در جذر میانگین مربعات جابه‌جایی و ۵۸ تا ۶۲٪ در جذر میانگین مربعات شتاب گردید.

با توجه به نزدیکی برج به گسل‌های فعال، خطر وقوع زمین‌لرزه‌های میدان نزدیک جدی است. یحیای و همکاران [۲۷] اثر زلزله‌های میدان نزدیک با پالس‌های شبیه‌سازی‌شده را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که نسبت دوره تناوب طبیعی سازه به دوره پالس (T/Tv) در تعیین میزان تغییرمکان و جابه‌جایی نسبی<sup>۱۰</sup> نقش کلیدی دارد. در مطالعه‌ای دیگر، امیری و یحیایی [۲۸] با استفاده از پایش ارتعاشات محیطی و تکنیک کاهش تصادفی، ویژگی‌های میرایی برج را بررسی کردند و نشان دادند که میرایی رایلی، مقادیر میرایی را در سازه‌های بلند بیش‌ازحد برآورد می‌کند. آن‌ها نمودار میرایی جدیدی براساس فرکانس طبیعی و نسبت ابعاد سازه پیشنهاد دادند که با داده‌های برج میلاد، CN کانادا، مونیخ، و شانگهای اعتبارسنجی شد. همچنین یک مدل اجزای محدود از برج میلاد توسعه دادند و با تحلیل تبدیل فوریه‌ی سریع داده‌های ثبت‌شده، مدل را اعتبارسنجی کردند.

در این پژوهش، کنترل نیمه‌فعال برج میلاد با استفاده از ترکیب میراگر جرمی تنظیم‌شده و میراگر سیال مغناطیسی به همراه الگوریتم کنترلی پیش‌بین مدل انجام شده است. همچنین در این مطالعه، به منظور دست‌یابی به سرعت محاسباتی بیشتر نسبت به مدل ریاضیاتی بوکون<sup>۱۱</sup>، از ترکیب دو شبکه‌ی عصبی مستقیم و معکوس برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی میراگر سیال مغناطیسی استفاده شده است. این روش امکان پیش‌بینی دقیق نیروی میراگر و تعیین ولتاژ کنترلی مناسب را در شرایط مختلف فراهم می‌سازد که با ساختار کنترلی نیمه‌فعال کاملاً سازگار است. شبکه‌ی

عصبی مستقیم وظیفه‌ی پیش‌بینی نیروی میراگر براساس ورودی‌های کنترلی را برعهده دارد، در حالی که شبکه‌ی عصبی معکوس، ولتاژ مناسب برای دست‌یابی به نیروی مطلوب را تعیین می‌کند.

به‌منظور انطباق رکوردهای انتخاب‌شده‌ی زلزله با ویژگی‌های دینامیکی برج میلاد با دوره‌ی تناوب بلند، از روش مقیاس‌سازی طیفی مبتنی بر موجک استفاده شده است. این روش با اعمال تغییرات موضعی در حوزه‌ی زمان، تاریخچه‌های زمانی زلزله را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که با طیف هدف سازه هماهنگ شوند، بدون آن‌که ویژگی‌های غیرایستای زلزله همچون محتوای فرکانسی و دامنه از بین برود. حفظ این ویژگی‌ها برای تحلیل دقیق سازه‌های بلند با دوره‌ی تناوب طبیعی طولانی، حیاتی است. استفاده از مقیاس‌سازی طیفی مبتنی بر موجک، ورودی‌هایی واقع‌گرایانه و سازگار با طیف طراحی را فراهم می‌سازد که برای ارزیابی عملکرد سازه‌های بلند تحت تحریک‌های لرزه‌ای، ضروری است [۲۹].

## ۲. روش تحقیق

در این پژوهش، پاسخ دینامیکی برج میلاد تحت تحریک لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی سازه بر اساس مطالعات پیشین انجام شده و برج به‌صورت یک تیر طره‌ای با ۵۷ درجه آزادی در نظر گرفته شده است [۱۵، ۱۶]. در این تحقیق یک میراگر جرمی تنظیم‌شده در بالاترین تراز شفت بتنی برج (گنبد برج) به‌کار گرفته شده است. به‌منظور دست‌یابی به کنترل نیمه‌فعال، به‌جای کمک‌فدر میراگر جرمی، از میراگر سیال مغناطیسی استفاده شده است. از الگوریتم کنترلی پیش‌بین مدل برای کنترل

نیمه‌فعال این سازه استفاده شده است که با بهره‌گیری از مدل دینامیکی سازه، در هر لحظه ورودی کنترلی بهینه را با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی (بیشینه ظرفیت میراگر MR) تعیین می‌کند. تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار متلب<sup>۱۲</sup> انجام شده و پاسخ سازه تحت تحریک‌های لرزه‌ای مختلف ارزیابی گردیده است. با توجه به اینکه خروجی الگوریتم‌های کنترلی، نیروی کنترلی است و در واقعیت، دستیابی به این نیرو از طریق اعمال ولتاژ به میراگر سیال مغناطیسی (MR) صورت می‌گیرد، لازم است نیروی کنترلی محاسبه شده به ولتاژ متناظر تبدیل شود. این تبدیل توسط یک سامانه‌ی معکوس انجام می‌شود که در ادبیات فنی با عنوان «کنترل‌کننده‌ی میراگر» شناخته می‌شود. این سامانه‌ی معکوس پس از محاسبه‌ی نیروی کنترلی و پیش از مدل رفتاری میراگر قرار می‌گیرد. در این پژوهش، سامانه‌ی معکوس توسط شبکه‌ی عصبی معکوس مدل‌سازی شده است و مدل رفتاری میراگر نیز با استفاده از شبکه‌ی عصبی مستقیم پیاده‌سازی شده است. یکی از دقیق‌ترین مدل‌های ریاضیاتی برای میراگرهای MR، مدل بوکون اصلاح‌شده است. شبکه‌های عصبی مورد استفاده در این پژوهش بر اساس داده‌های حاصل از این مدل و مطابق با روش پیشنهادی وانگ و لیائو<sup>۱۳</sup> [۳۰] آموزش دیده‌اند. این رویکرد ضمن حفظ دقت بالا، سرعت محاسباتی بیشتری نسبت به مدل بوکون اصلاح‌شده دارد. همچنین، مدل معکوس بوکون تنها با اعمال فرضیات ساده‌کننده قابل حل است، در حالی که استفاده از شبکه‌ی عصبی معکوس دقت بالاتری در بازتولید رفتار واقعی میراگر فراهم می‌سازد.

برای بازتاب شرایط واقعی زلزله، مجموعه‌ای از ۷ رکورد زلزله انتخاب شده که با استفاده از روش مقیاس‌سازی طیفی مبتنی بر موجک، با ویژگی‌های دینامیکی برج میلاد (دوره‌ی تناوب بالا) هماهنگ شده‌اند. این روش با حفظ ویژگی‌های غیرایستا نظیر تغییرات زمانی فرکانس و دامنه، ورودی‌هایی واقع‌گرایانه و سازگار با طیف هدف را برای تحلیل دقیق سازه‌های بلند فراهم می‌سازد. ساختار روش تحقیق به صورت زیر سازمان‌دهی شده است: آماده‌سازی رکوردهای زلزله، مدل‌سازی سازه‌ی برج میلاد، مدل‌سازی میراگر سیال مغناطیسی، مدل‌سازی میراگر سیال مغناطیسی مبتنی بر شبکه‌ی عصبی، معادلات حاکم بر حرکت سازه مجهز به میراگر جرمی و میراگر سیال مغناطیسی، فرم فضای حالت برای سازه با STMD<sup>۱۴</sup>، روش انتگرال‌گیری عددی، سامانه کنترلی، طراحی کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مدل؛

#### • آماده‌سازی رکوردهای زلزله

تحلیل تاریخچه زمانی یکی از ابزارهای اصلی در ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها به‌شمار می‌رود، به‌ویژه در مورد سازه‌های بلند که رفتار دینامیکی آن‌ها پیچیده و وابسته به محتوای فرکانسی تحریک است. یکی از مراحل حساس در این نوع تحلیل، انتخاب و مقیاس‌سازی رکوردهای زلزله به‌گونه‌ای است که با طیف پاسخ هدف سازه تطابق داشته باشند. در روش‌های سنتی، معمولاً یک ضریب مقیاس یکنواخت به کل شتاب‌نگاشت اعمال می‌شود؛ اما در سازه‌هایی با دوره‌ی طبیعی بلند مانند برج میلاد، این رویکرد می‌تواند منجر به بزرگ‌نمایی غیرواقعی رکوردها شده و تقاضاهای لرزه‌ای نامتناسبی ایجاد کند [۲۹].

برای غلبه بر این محدودیت، روش‌های پیشرفته‌تری نظیر مقیاس‌سازی طیفی مبتنی بر موجک توسعه یافته‌اند. برخلاف مقیاس‌سازی یکنواخت که به صورت همگن کل رکورد را تغییر می‌دهد، مقیاس‌سازی طیفی مبتنی بر موجک با اصلاح موضعی بخش‌هایی از رکورد که با طیف هدف ناسازگار هستند، امکان تطابق دقیق‌تری را فراهم می‌سازد [۲۹]. این روش در دستورالعمل‌هایی مانند NIST<sup>۱۵</sup> برای تحلیل سازه‌های بلند توصیه شده است [۳۱].

الگوریتم مقیاس‌سازی طیفی موجکی توسعه یافته توسط ال‌اتیک و ابراهامسون<sup>۱۶</sup> [۲۹] در حوزه‌ی زمان عمل می‌کند و از موجک‌های کسینوسی مدوله شده با پنجره‌های گاوسی بهره می‌گیرد. در این فرآیند، موجک‌ها به صورت تکراری به بخش‌هایی از رکورد اصلی افزوده می‌شوند تا طیف پاسخ آن با طیف هدف هم‌راستا شود. اصلاحات به گونه‌ای اعمال می‌شوند که انتگرال سرعت و جابه‌جایی صفر باقی بماند، تا از رانش پایه<sup>۱۷</sup> جلوگیری شده و واقع‌گرایی فیزیکی حفظ شود. این روش ویژگی‌های غیرایستای رکورد زلزله، مانند تغییرات زمانی در محتوای فرکانسی و دامنه را حفظ کرده و انرژی لرزه‌ای را به صورت واقع‌گرایانه برای تحلیل سازه فراهم می‌سازد. در این پژوهش،

مقیاس‌سازی موجکی با استفاده از نرم‌افزار سائزموچج<sup>۱۸</sup> پیاده‌سازی شده است. پارامترهای ورودی شامل موارد زیر بوده‌اند:

- **طیف هدف:** استاندارد ۲۸۰۰ ایران، ویرایش چهارم [۳۲]، نوع خاک II، شتاب زمین اوج (PGA)<sup>۱۹</sup> برابر با ۰/۳۵g

- **دامنه‌ی دوره‌ها:** مطابق با ۰/۲ تا ۱/۵ برابر دوره‌ی تناوب طبیعی برج میلاد، ( $T_1 = 5.7$  s)

- **تلورانس خطا:** حاشیه‌ی خطای طیفی برابر با ۰/۳ برای ایجاد تعادل بین دقت و کارایی محاسباتی

در این پژوهش، ۷ رکورد زمین‌لرزه بر مبنای آیین‌نامه‌ی فمما [۳۳] در نظر گرفته شده‌است که همگی با روش مقیاس‌سازی به روش موجک به طیف هدف سازه مقیاس شده‌اند. با توجه به اینکه سازه یک‌بعدی مدل شده است، رکوردی با پیک بیشینه‌ی شتاب زمین‌لرزه، به عنوان رکورد انتخاب شده، در نظر گرفته شده است که این روش برای سازه‌های یک‌بعدی سازگار است. در جدول ۱ رکوردهای مورد بررسی، نوشته شده است.

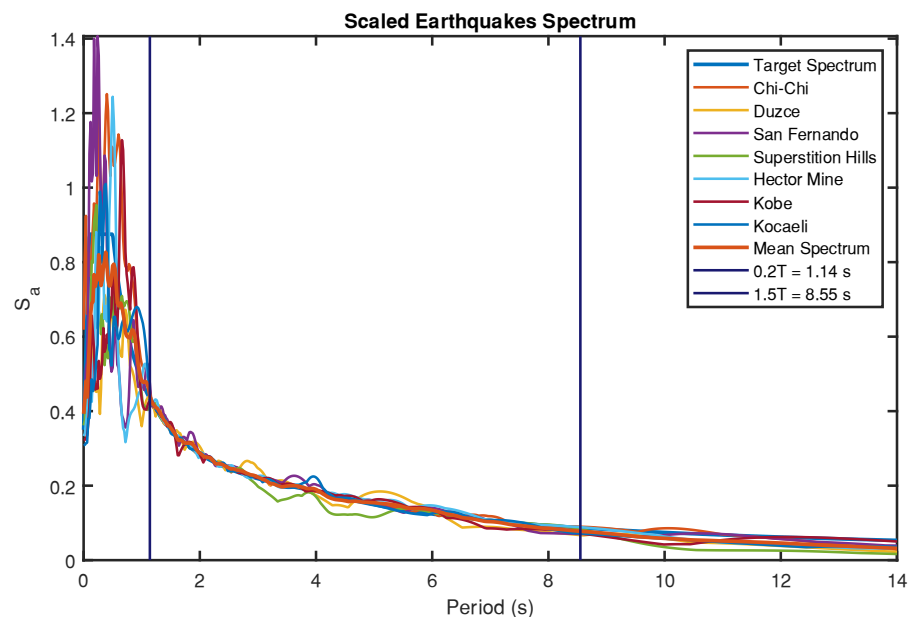
جدول ۱. رکوردهای مقیاس شده زلزله مورد استفاده در تحلیل لرزه‌ای

نام زلزله	ایستگاه ثبت	شتاب اوج زمین بزرگا (Mw) سال وقوع	شتاب اوج زمین (g)
چی چی، تایوان	TCU045 CWB	۱۹۹۹	۰/۸۷
دوزجه، ترکیه	Bolu ERD	۱۹۹۹	۰/۷۳
سن فرناندو، آمریکا	LA - Hollywood Stor CDMG	۱۹۷۱	۰/۵۹

۱۹۸۷	۶/۵	۰/۶۵	El Centro Imp. Co. CDMG	هیلتز، سوپرستیشن	آمریکا
۱۹۹۹	۷/۱	۰/۳۴	Hector SCSN	هکتور ماین، آمریکا	
۱۹۹۵	۶/۹	۰/۲۴	Shin-Osaka CUE	کوبه، ژاپن	
۱۹۹۹	۷/۵	۰/۳۶	Duzce ERD	کوجائیلی، ترکیه	

مناسب بین طیف‌های اصلاح‌شده و طیف هدف، اثربخشی روش مقیاس‌سازی مبتنی بر موجک را در تولید ورودی‌های لرزه‌ای واقع‌گرایانه و سازگار با ویژگی‌های دینامیکی برج میلاد تأیید می‌کند.

در شکل ۱ طیف رکوردهای مقیاس‌شده‌ی زمین‌لرزه را مشاهده می‌کنید. در این شکل، طیف هدف آیین‌نامه، طیف مقیاس‌شده‌ی هر رکورد زلزله، و میانگین طیف‌های رکوردها نمایش داده شده‌اند. هم‌راستایی



شکل ۱. مقایسه‌ی طیف رکوردهای مقیاس‌شده‌ی زلزله با طیف طراحی استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم مدل‌سازی سازه‌ی برج میلاد

گویان<sup>۲۰</sup> بهره گرفته شد تا درجات آزادی دورانی حذف شوند و مدل نهایی با ۵۷ درجه آزادی انتقالی مورد تحلیل قرار گیرد. در مدل‌سازی اجزای محدود، فرض شده است که مرکز جرم، مرکز سختی و مرکز آیرودینامیکی برج منطبق هستند، بنابراین

برای مدل‌سازی برج میلاد، از مدل مرجع ارائه‌شده توسط قربانی‌تنها و همکاران [۲۵] استفاده شده است. آن‌ها این سازه را به صورت یک تیر طره‌ای با ۵۷ درجه آزادی انتقالی و ۵۷ درجه آزادی دورانی مدل‌سازی کردند. به منظور کاهش بار محاسباتی، از روش کاهش

$$M = \begin{bmatrix} M_{tt} & M_{t\theta} \\ M_{\theta t} & M_{\theta\theta} \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} K_{tt} & K_{t\theta} \\ K_{\theta t} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن  $t$  درجات آزادی انتقالی و  $\theta$  درجات آزادی دورانی می‌باشند و ماتریس‌های کاهش‌یافته‌ی جرم و سختی با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند:

$$M^* = M_{tt} - M_{t\theta} K_{\theta\theta}^{-1} K_{\theta t} + K_{t\theta} K_{\theta\theta}^{-1} M_{\theta\theta} K_{\theta\theta}^{-1} K_{\theta t} - (M_{t\theta} K_{\theta\theta}^{-1} K_{\theta t})^T \quad (3)$$

$$K^* = K_{tt} - K_{t\theta} K_{\theta\theta}^{-1} K_{\theta t} \quad (4)$$

برای مدل‌سازی میرایی، از میرایی رایلی استفاده شده است که در آن ماتریس میرایی به صورت ترکیبی خطی از ماتریس‌های جرم و سختی تعریف می‌شود [۳۴]:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (5)$$

ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  با استفاده از فرکانس‌های طبیعی مدهای اول و دوم و نسبت‌های میرایی متناظر آن‌ها طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\alpha = 2\omega_i \omega_j \frac{\zeta_i \omega_j - \zeta_j \omega_i}{\omega_j^2 - \omega_i^2}, \beta = \frac{2(\zeta_j \omega_j - \zeta_i \omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \quad (6)$$

در رابطه‌ی بالا  $\omega_i$  فرکانس طبیعی مود  $i$ ام،  $\omega_j$  فرکانس طبیعی مود  $j$ ام،  $\zeta_i$  و  $\zeta_j$  نسبت میرایی مود  $i$ ام،  $\zeta_j$  نسبت میرایی مود  $j$ ام است.

بر اساس مطالعه‌ی امیری و یحیایی [۱۹]، ضرایب میرایی برای برج میلاد به صورت  $\alpha = 0.095$  و  $\beta = 0.015$  تنظیم شدند. این ضرایب با استفاده از داده‌های تجربی حاصل از پایش ارتعاشات محیطی برج میلاد تنظیم شده‌اند، به گونه‌ای که میرایی مدهای اول و دوم در مدل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده منطبق باشند. فرکانس‌های طبیعی حاصل از این مدل برای چهار مود اول برابر با  $1.09$ ،  $3.16$ ،  $5.67$  و  $11.6$  رادیان بر ثانیه

جابه‌جایی‌های پیچشی‌جانبی در امتداد ارتفاع سازه نادیده گرفته شده‌اند. برای تحلیل اجزای تیر، از تئوری تیر اوپلر-برنولی استفاده شده و ماتریس‌های سختی و جرم هر المان مطابق روابط زیر تعریف شده‌اند: [۳۴]

$$K = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

$$M = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

در روابط بالا،  $E$  مدول الاستیسیته،  $I$  ممان اینرسی،  $L$  طول المان،  $\rho$  چگالی ماده، و  $A$  سطح مقطع عرضی المان هستند.

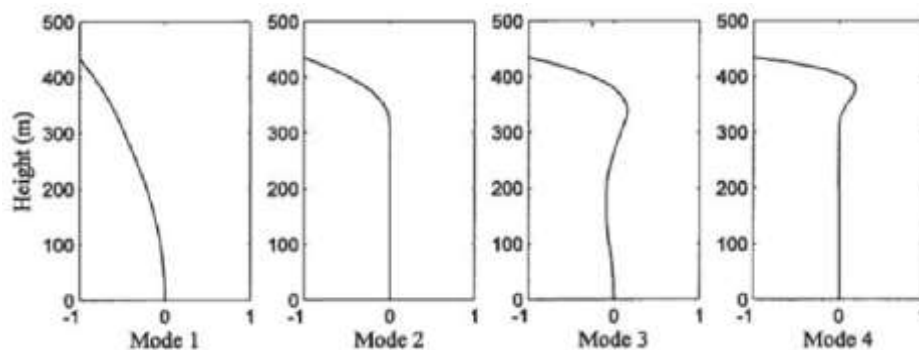
در مرحله‌ی سرهم‌بندی<sup>۲۱</sup>، ماتریس‌های جرم و سختی کلی سازه با ترکیب ماتریس‌های المانی تشکیل شده و شرایط مرزی اعمال گردید. سپس، برای کاهش حجم محاسبات، روش گویان به کار گرفته شد تا درجات آزادی مربوط به درجات آزادی دورانی، حذف شوند. این روش، که در تحلیل دینامیکی سازه‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد، درجات آزادی را به دو دسته تقسیم می‌کند [۲۶]:

- درجات آزادی باقی‌مانده<sup>۲۲</sup>: مؤثر در پاسخ دینامیکی و حفظ‌شده در تحلیل نهایی
- درجات آزادی فشرده‌شده<sup>۲۳</sup>: وابسته به درجات آزادی باقی‌مانده به صورت ایستا (و از اثرات اینرسی آن‌ها)

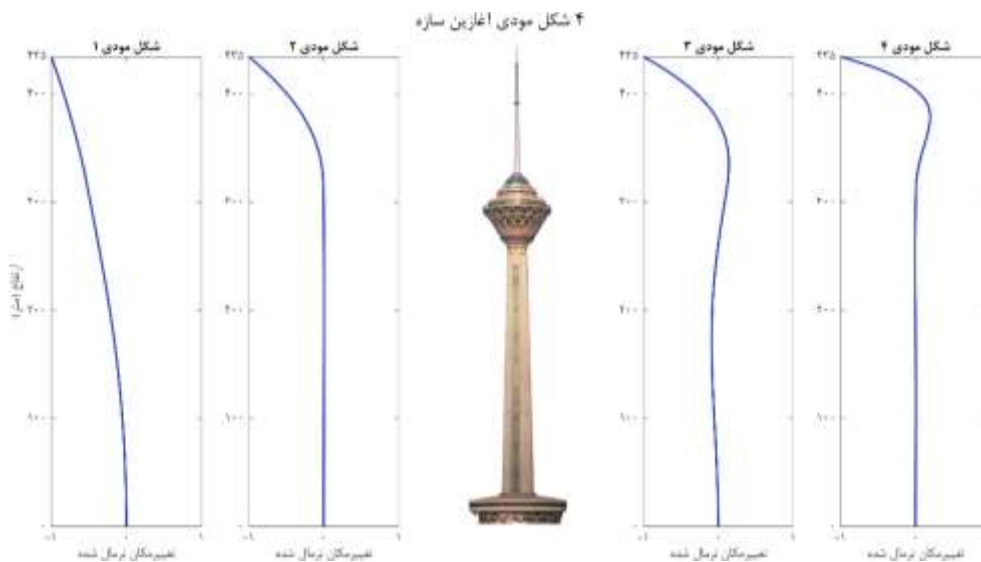
ماتریس‌های جرم و سختی به صورت زیر تفکیک شدند: [۱۸]

شده‌اند. المان‌های میان‌گره‌های ۱ تا ۳۱ (ارتفاع ۳۱۵ متری) مربوط به شفت بتنی برج و المان‌های میان‌گره‌های ۳۱ تا ۵۶ مربوط به آنتن فولادی برج است. موده‌های اول و سوم مربوط به شفت بتنی برج و موده‌های دوم و چهارم مربوط به آنتن فولادی هستند. تطابق نزدیک در فرکانس‌ها و شکل موده‌ها، صحت مدل‌سازی سازه را تأیید می‌کند.

به‌دست آمد که تطابق مناسبی با مقادیر گزارش‌شده در مطالعه‌ی مرجع (۱/۰۹، ۳/۶، ۵/۶۶، ۱۱/۵) نشان می‌دهد [۱۸]. شکل موده‌های سازه در این پژوهش و مطالعه‌ی مرجع در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. مدل عددی اولیه برج میلاد ابتدا شامل ۵۷ گره سازه‌ای بود که پس از اعمال شرایط تکیه‌گاهی به ۵۶ گره رسید. شکل موده‌های ارائه‌شده در این پژوهش، بر اساس جابه‌جایی‌های همین ۵۶ گره استخراج و ترسیم



شکل ۲. اشکال مودی برج میلاد، گزارش‌شده توسط قربانی‌تنها و همکاران [۱۸]



شکل ۳. اشکال مودی برج میلاد، مدل‌سازی‌شده در پژوهش حاضر

سامانه‌های کنترل نیمه‌فعال، با ترکیب مزایای سامانه‌های فعال و غیرفعال، ظرفیت بالایی در تولید

• مدل‌سازی میراگر سیال مغناطیسی (MR)

نیروی تولیدشده توسط میراگر MR در این مدل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F = c_0 \dot{x} + \alpha z \quad (7)$$

که در آن  $F$  نیروی میرایی،  $x$  جابه‌جایی نسبی،  $\dot{x}$  سرعت نسبی و  $z$  متغیر تکاملی هیستریزیس است که رفتار وابسته به تاریخچه‌ی بارگذاری را مدل می‌کند. معادله‌ی حاکم بر متغیر  $z$  به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A_m \dot{x} \quad (8)$$

در این رابطه ضرایب  $\gamma$  و  $\beta$  شکل و اندازه‌ی حلقه‌ی هیستریزیس را کنترل می‌کنند، توان  $n$  نرمی گذار بین حالات پیش‌تسلیم و پس‌تسلیم را تعیین می‌کند، و  $A_m$  دامنه‌ی کلی رفتار هیستریزیس را مقیاس‌دهی می‌کند. از آن‌جا که پارامترهای  $c_0$  و  $\alpha$  به ولتاژ کنترلی وابسته‌اند، روابط آن‌ها به صورت تابعی از ولتاژ اعمال‌شده  $u$  تعریف می‌شوند:

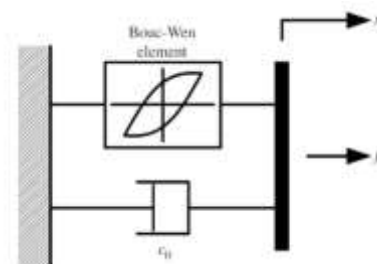
$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u, \\ c_0 &= c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \end{aligned} \quad (9)$$

برای در نظر گرفتن تأخیر زمانی ذاتی در پاسخ سیال MR، یک فیلتر مرتبه اول به مدل افزوده شده است:

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (10)$$

که در آن  $v$  ولتاژ فرمانی اعمال‌شده به میراگر است (هدف کنترلی)،  $u$  ولتاژ مؤثر واقعی است که بر رفتار سیال تأثیر می‌گذارد، و  $\eta$  ثابت زمانی فیلتر است که نرخ همگرایی  $u$  به  $v$  را کنترل می‌کند. این فیلتر موجب می‌شود تغییرات ولتاژ به صورت تدریجی اعمال

نیرو فراهم می‌کنند، در حالی‌که مصرف انرژی آن‌ها به مراتب کمتر از سامانه‌های کاملاً فعال است. میراگرهای سیال مغناطیسی (MR) نمونه‌ای برجسته از این نوع تجهیزات هستند که با بهره‌گیری از میدان مغناطیسی، قادر به تولید نیروهای میرایی بسیار بالا بوده و عملکرد مؤثری در کاهش ارتعاشات و بارهای دینامیکی دارند. قابلیت تنظیم لحظه‌ای نیروی میرایی در کنار مصرف انرژی پایین، موجب شده است که این نوع میراگرها به‌طور گسترده در سامانه‌های کنترل نیمه‌فعال سازه‌ای مورد استفاده قرار گیرند. برای مدل‌سازی رفتار مکانیکی میراگرهای MR، مدل‌های مختلفی پیشنهاد شده‌اند. اما یکی از پذیرفته‌شده‌ترین و معتبرترین آن‌ها، مدل اصلاح‌شده‌ی بوکون است. در این مدل، میراگر MR به صورت یک عنصر بوکون در کنار یک میراگر ویسکوزی موازی در نظر گرفته می‌شود. اعتبار تجربی این مدل در مطالعات مختلف تأیید شده و دقت بالایی در پیش‌بینی رفتار میراگر تحت ورودی‌های متنوع از خود نشان داده است. همچنین، این مدل در تحقیقات پیشین برای مدل‌سازی میراگرهای MR در مقیاس واقعی با موفقیت به‌کار گرفته شده است [۳۵]. در شکل ۴ مدل مکانیکی بوکون اصلاح‌شده را برای مدل‌سازی میراگر MR مشاهده می‌کنید.



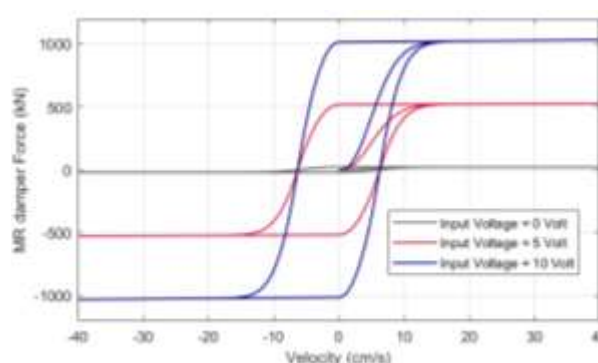
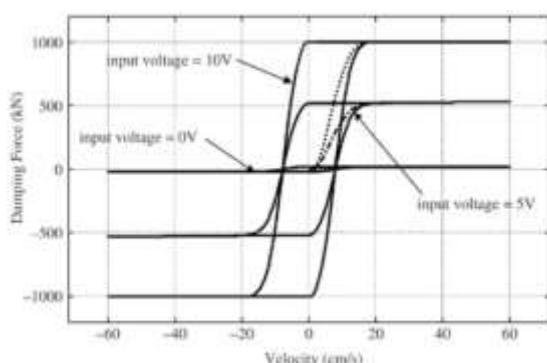
شکل ۴. مدل مکانیکی بوکون اصلاح‌شده برای مدل میراگر MR (اوک و همکاران ۲۴ [۳۶])

شوند و از نوسانات ناگهانی در عملکرد میراگر جلوگیری شود.

پارامترهای عددی مورد استفاده در این مدل از مطالعه‌ی اوک و همکاران [۳۶] استخراج شده‌اند. ظرفیت نهایی میراگر برابر با ۱۰۰۰ کیلونیوتن بوده که در ولتاژ فرمانی ۱۰ ولت حاصل می‌شود. مقادیر عددی پارامترها در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. پارامترهای مدل میراگر MR برگرفته از مطالعه‌ی اوک و همکاران [۳۶]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$\alpha_a$	$1/0.872 \times 10^5 \text{ N/cm}$	$c_{0b}$	$44/0 \text{ N s/cm/V}$	$\beta$	$3 \text{ cm}^{-1}$
$\alpha_b$	$4/9616 \times 10^5 \text{ N/cm/V}$	$A_m$	$1/2$	$\gamma$	$3 \text{ cm}^{-1}$
$c_{0a}$	$4/40 \text{ N s/cm}$	$n$	$1$	$\eta$	$50 \text{ s}^{-1}$



شکل ۶. رفتار نیرو-سرعت میراگر MR ارائه شده توسط اوک و همکاران [۳۶]

شکل ۵. رفتار نیرو-سرعت میراگر MR به دست آمده در پژوهش حاضر

دستیابی به نیروی میرایی مطلوب را تخمین می‌زند. داده‌های آموزشی این دو مدل از خروجی‌های مدل اصلاح شده‌ی بوکون استخراج شده‌اند. ورودی مشترک هر دو شبکه شامل تاریخچه‌ی سه‌زمانه از جابه‌جایی، ولتاژ و نیروی میرایی در گام‌های زمانی  $t$ ،  $t-1$  و  $t-2$  است که به صورت بردار زیر تعریف می‌شود:

• مدل‌سازی میراگر MR مبتنی بر شبکه‌ی عصبی برای تقریب رفتار دینامیکی میراگر سیال مغناطیسی، از دو شبکه‌ی عصبی پیش‌خور<sup>۲۵</sup> مجزا استفاده شده است. مدل مستقیم وظیفه دارد نیروی میرایی را بر اساس مقادیر گذشته‌ی جابه‌جایی و ولتاژ پیش‌بینی کند. مدل معکوس ولتاژ کنترلی موردنیاز برای

$$X = [x_t, v_t, F_t, x_{t-1}, v_{t-1}, F_{t-1}, x_{t-2}, v_{t-2}, F_{t-2}] \quad (11)$$

استفاده شده و خروجی شبکه با تابع فعال سازی خطی تولید می شود تا پایداری عددی در پیش بینی ها حفظ گردد. آموزش شبکه ها با الگوریتم پس انتشار لونیبرگ-مارکووات<sup>۲۷</sup> انجام شده که به طور مؤثر میانگین مربعات خطا را به حداقل می رساند [۳۰].

مدل مستقیم با دریافت این بردار، نیروی میرایی در گام بعدی  $F_{t+1}$  را پیش بینی می کند و بدین ترتیب قادر است پاسخ دینامیکی میراگر را به صورت عددی تقریب بزند. در مقابل، مدل معکوس با هدف کنترل نیمه فعال، ولتاژ کنترلی مورد نیاز در گام بعدی  $v_{t+1}$  را تخمین می زند تا نیروی میرایی مطلوب حاصل شود. هر دو شبکه از معماری مشابهی بهره می برند که شامل دو لایه ی پنهان با ۱۸ نورون در هر لایه است. در لایه های پنهان از تابع فعال سازی تانژانت سیگموئید<sup>۲۶</sup>

برای ارزیابی دقت مدل های آموزش دیده، مجموعه ای از داده های اعتبارسنجی مستقل از داده های آموزش و آزمون به کار گرفته شده است. این داده ها، که در جدول ۳ ارائه شده اند، از مطالعه ی وانگ و لیائو [۳۰] الهام گرفته شده اند و هدف آن ها بررسی توانایی تعمیم مدل ها به شرایط نادیده است.

جدول ۳. داده های اعتبارسنجی برگرفته از مطالعه ی وانگ و لیائو [۴۲]

داده ی اعتبارسنجی	جابه جایی (cm)	ولتاژ (V)	میرایی	نیروی (N) <sup>a</sup>	بازه ی زمانی (s)
۱	$\sin(4\pi t)$	۱/۵			۶
۲	$\sin(4\pi t)$	$GWN^{b+1/5}$			۶
۳	$0.4\sin(8\pi t)$	۱/۵			۶
۴	$\sin(4\pi t)$	$+0.75\sin(4\pi t)$ ۱/۵	مدل خروجی بوکون اصلاح شده		۶
۵	$GWN^c$	$GWN^{b+1}$			۶
۶	$0.5GWN^c$	$+0.75\sin(4\pi t)$ ۱/۵			۶

a: فقط برای اعتبارسنجی مدل معکوس

b: نوفه سفید گاوسی با فرکانس ۰ تا ۲ هرتز و دامنه ی  $\pm 2$

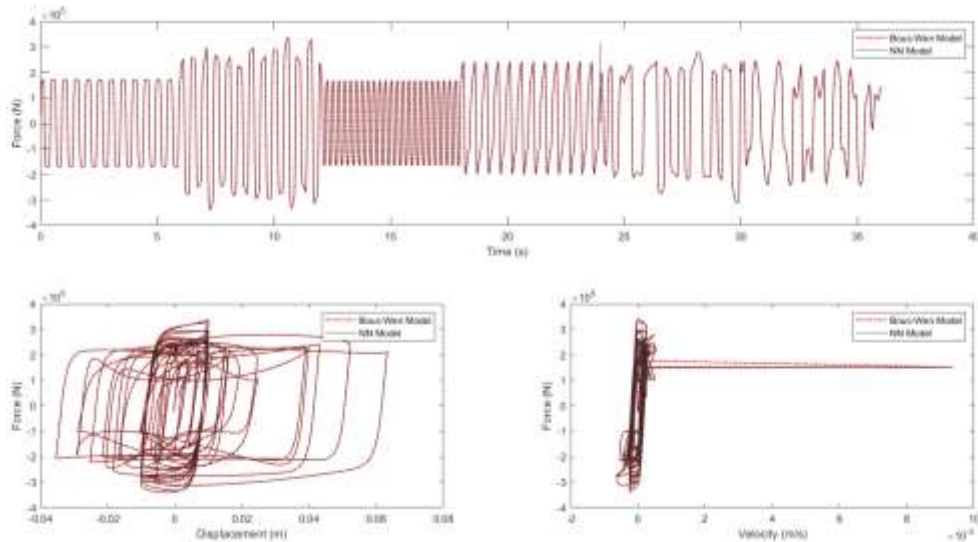
c: نوفه سفید گاوسی با فرکانس ۰ تا ۲ هرتز و دامنه ی  $\pm 10$

به طور مشابه، دقت مدل معکوس با مقایسه ی ولتاژ پیش بینی شده با ولتاژ واقعی مورد نیاز برای تولید نیروی

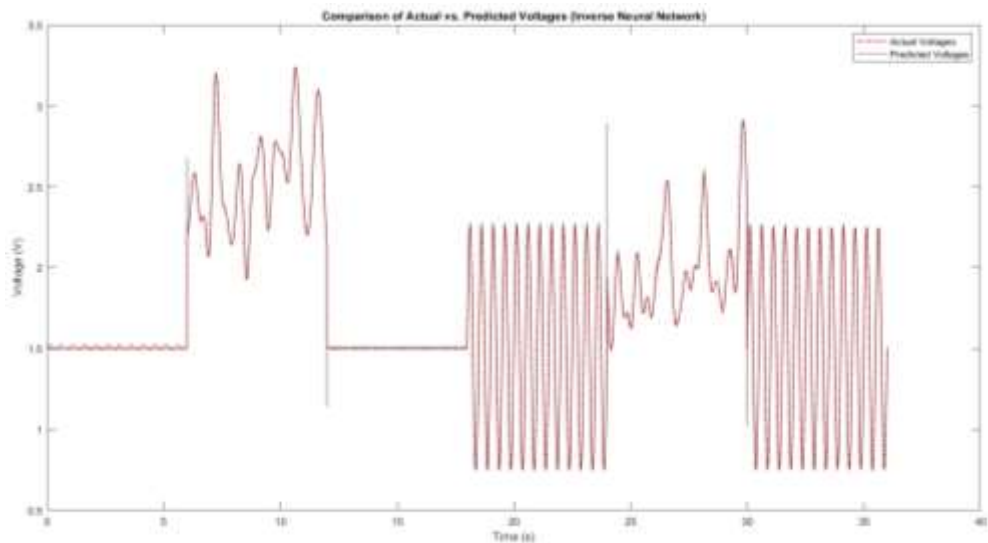
عملکرد مدل مستقیم با مقایسه ی نیروی پیش بینی شده با خروجی مدل بوکون ارزیابی شد.

توانایی بالایی در تقریب رفتار غیرخطی میراگر MR دارند و نسبت به مدل‌های ریاضی سنتی، مزایایی نظیر کارایی محاسباتی و قابلیت پیاده‌سازی بی‌درنگ ارائه می‌دهند.

هدف بررسی گردید. نتایج ارائه‌شده در شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند که هر دو شبکه تطابق بالایی با مقادیر مرجع دارند و برای مدل‌سازی و کنترل لحظه‌ای میراگر MR کاملاً مناسب هستند. نتایج حاصل از اعتبارسنجی نشان می‌دهند که شبکه‌های عصبی آموزش‌دیده



شکل ۷. مقایسه‌ی نیروی واقعی و نیروی پیش‌بینی‌شده توسط مدل مستقیم شبکه‌ی عصبی



شکل ۸. مقایسه‌ی ولتاژ واقعی و ولتاژ پیش‌بینی‌شده توسط مدل معکوس شبکه‌ی عصبی

برای یک سازه با  $n$  درجه آزادی که یک میراگر جرمی تنظیم‌شده به آن متصل شده است، معادلات حرکت دینامیکی به صورت زیر بیان می‌شوند. اگر  $x(t)$  بردار

• معادلات حاکم بر حرکت سازه مجهز به میراگر جرمی و میراگر MR

تغییر مکان سازه،  $x_s(t)$  تغییر مکان گره‌ای که میراگر جرمی به آن متصل است، و  $x_d(t)$  تغییر مکان جرم میراگر باشد، معادلات به صورت زیر نوشته می‌شوند [۳۷]:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) + [k_d(x_s(t) - x_d(t)) + c_d(\dot{x}_s(t) - \dot{x}_d(t))] = -M\ell\ddot{x}_g(t) \quad (12)$$

$$m_d\ddot{x}_d(t) + c_d(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_s(t)) + k_d(x_d(t) - x_s(t)) = 0 \quad (13)$$

که در آن  $M, C, K \in R^{n \times n}$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه هستند،  $\ell$  بردار تأثیر زلزله و  $\ddot{x}_g(t)$  شتاب زمین می‌باشد.  $m_d$  نیز جرم،  $c_d$  میرایی و  $k_d$  هم سختی میراگر جرمی هستند. نیروی منتقل شده توسط میراگر جرمی غیرفعال به سازه از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$F_{TMD} = - [k_d(x_s(t) - x_d(t)) + c_d(\dot{x}_s(t) - \dot{x}_d(t))] \quad (14)$$

در صورت اضافه شدن میراگر سیال مغناطیسی به میراگر جرمی معادلات دینامیکی سازه برابر است با:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) + [k_d(x_s(t) - x_d(t)) + c_d(\dot{x}_s(t) - \dot{x}_d(t)) + F_{MR}(t)] = -M\ell\ddot{x}_g(t)$$

(۱۵)

$$m_d\ddot{x}_d(t) + c_d(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_s(t)) + k_d(x_d(t) - x_s(t)) - F_{MR}(t) = 0$$

(۱۶)

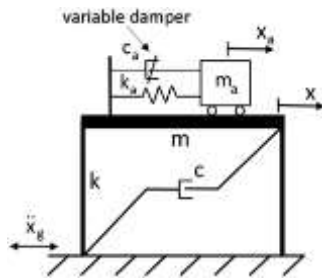
در این حالت، نیروی غیرخطی و قابل کنترل میراگر MR با نماد  $F_{MR}(t)$  نشان داده می‌شود و نیروی میراگر جرمی نیمه فعال مجهز به میراگر سیال مغناطیسی برابر است با:

$$F_{STMD} = - [k_d(x_s(t) - x_d(t)) + c_d(\dot{x}_s(t) - \dot{x}_d(t)) + F_{MR}(t)]$$

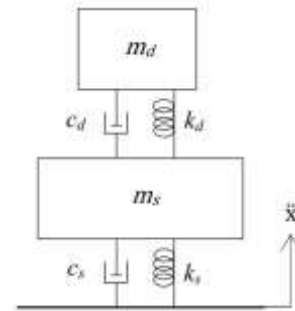
(۱۷)

در حالتی که میراگر MR جایگزین عنصر میرایی ویسکوز میراگر جرمی شود، پارامتر  $c_d = 0$  خواهد بود و این حالت را میراگر جرمی نیمه فعال می‌نامند. اگر میراگر MR به صورت موازی با عنصر میرایی ویسکوز قرار گیرد، حاصل یک میراگر ترکیبی خواهد بود که میراگر جرمی هیبریدی<sup>۲۸</sup> نامیده می‌شود و در این حالت  $c_d$  صفر نخواهد بود.

در پژوهش حاضر، میراگر MR به عنوان جایگزین کامل عنصر میرایی در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰ طرح شماتیک از موقعیت و اجزای میراگر جرمی تنظیم شده را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۰. طرح شماتیک از میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی نیمه‌فعال برای سازه‌ی یک درجه آزادی [۳۷]



شکل ۹. طرح شماتیک از میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی غیرفعال برای سازه‌ی یک درجه آزادی [۱]

که در آن  $u(t) = F_{MR}(t)$  است و  $e_s$  بردار موقعیتی است که موقعیت میراگر جرمی متصل شده را نمایش می‌دهد.

#### • روش انتگرال‌گیری عددی

برای انتگرال‌گیری عددی از روش نیومارک-بتا با پارامترهای  $\gamma=0.25$  و  $\beta=0.5$  استفاده شده است. این انتخاب مطابق با فرم کلاسیک پایدار این روش بوده و در منابع معتبر نظیر چوپرا [۳۸]<sup>۲۹</sup> توصیه شده است. همچنین این روش یکی از پرکاربردترین روش‌های عددی در تحلیل دینامیکی سازه‌هاست. این پارامترها موجب پایداری عددی بی‌قید و شرط در تحلیل سیستم‌های خطی شده و برای تحلیل لرزه‌ای گذرا در سازه‌های بلند مناسب هستند.

#### • سامانه کنترلی

در مدل کنترلی این پژوهش، یک میراگر جرمی تنظیم‌شده در گره ۳۰ (گنبد سازه) مدل سازه‌ای برج میلاد، متناظر با تراز ۳۰۵ متری، نصب شده است. سازه یک بار با میراگر جرمی غیرفعال و یک بار هم با میراگر جرمی نیمه‌فعال تحلیل شده و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در پیکربندی نیمه‌فعال، از دو میراگر MR استفاده شده است که به‌صورت جانبی به جرم

#### • فرم فضای حالت برای سازه با STMD

اگر متغیر حالت را به این صورت تعریف کنیم:

$$X(t) = [x(t) \quad x_d(t) \quad \dot{x}(t) \quad \dot{x}_d(t)]^T$$

که در آن  $x(t)$  بردار جابه‌جایی سازه،  $x_d(t)$  جابه‌جایی جرم میراگر جرمی،  $\dot{x}(t)$  بردار سرعت سازه و  $\dot{x}_d(t)$  سرعت جرم میراگر است. وقتی که میراگر MR به جای عنصر میرایی میراگر جرمی قرار داده می‌شود (یعنی  $c_d = 0$ )، معادلات (۱۵) و (۱۶) حاکم‌اند. در این حالت، فضای حالت به شکل زیر خواهد بود:

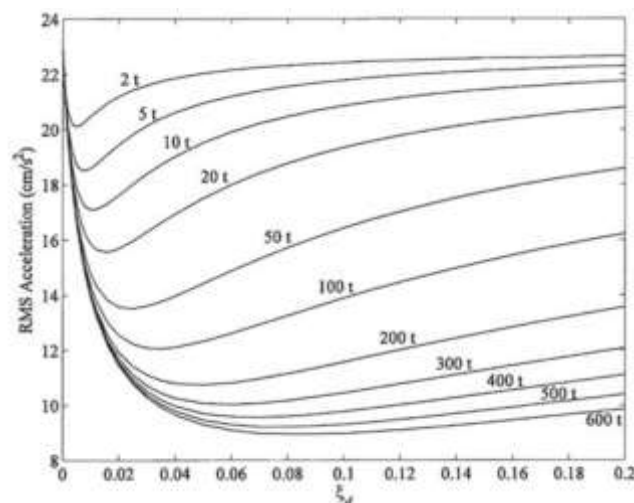
$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) + E\ddot{x}_g(t) \quad (18)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \\ -M^{-1}K & M^{-1}k_d e_s & -M^{-1}C & M^{-1}c_d e_s \\ \frac{k_d}{m_d} e_s^T & -\frac{k_d}{m_d} & \frac{c_d}{m_d} e_s^T & -\frac{c_d}{m_d} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M^{-1}e_s \\ -\frac{1}{m_d} \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\ell \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

متحرک متصل شده‌اند، به طوری که عنصر میرایی حذف شده و میرایی سامانه کنترلی به‌طور کامل توسط دو میراگر MR تأمین می‌شود. این میراگرها تحت کنترل نیمه‌فعال عمل می‌کنند، به طوری که نیروی میرایی آن‌ها به‌صورت لحظه‌ای و بر اساس قانون کنترلی تنظیم می‌شود. موقعیت نصب میراگر جرمی در رأس برج انتخاب شده تا بیشترین تأثیر را در کاهش ارتعاشات موده‌های بالاتر داشته باشد، و با سازه مقطع برج نیز کاملاً سازگار است.

پارامترهای جرم، سختی و میرایی میراگر جرمی در این پژوهش بر اساس مطالعه‌ی مبنای قربانی‌تنها و همکاران [۱۸] انتخاب شده‌اند. در آن مطالعه، با تحلیل تصادفی پاسخ برج میلاد تحت تحریک باد و با بررسی مقادیر مختلف جرم (در بازه‌ی ۵۰ تا ۶۰۰ تن) و

نسبت‌های میرایی متنوع، مشخص شد که جرم ۴۰۰ تن به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب می‌شود، چرا که در این حالت، مقدار جذر میانگین مربعات شتاب در رأس برج به کمتر از آستانه‌ی قابل قبول (۱۰ میلی‌جی) کاهش می‌یابد. همچنین، نسبت میرایی بهینه برابر با ۷٪ گزارش شده که منجر به سختی  $473/70 \text{ kN/m}$  و ضریب میرایی  $k_a = 60/94 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$  می‌شود. این پارامترها در طراحی میراگر جرمی این پژوهش نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای شفاف‌سازی روند انتخاب این پارامترها، نمودار تغییرات جذر میانگین مربعات شتاب در برابر نسبت میرایی و جرم‌های مختلف میراگر جرمی در شکل ۱۱ ارائه شده است [۱۸].



شکل ۱۱. تغییرات جذر میانگین مربعات شتاب گنبد سازه در برابر نسبت میرایی میراگر جرمی برای جرم‌های مختلف [۱۸]

بهینه را از طریق حل یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی مربعی با قیود<sup>۳۰</sup> در هر گام زمانی تعیین می‌کند. برخلاف روش‌هایی مانند کنترل بازخورد حالت (مانند LQR)، در کنترل پیش‌بین محدودیت‌های فیزیکی عملگرها و

#### • کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مدل

کنترل پیش‌بین مدل یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های کنترل به‌شمار می‌رود که با پیش‌بینی رفتار آینده‌ی سامانه در یک افق زمانی محدود، ورودی‌های کنترلی

قیود حالت به صورت صریح در فرآیند بهینه‌سازی لحاظ می‌شوند [۱۵], [۳۹], [۴۰], [۴۱].

از آنجا که کنترل پیش‌بین در حوزه‌ی زمان گسسته عمل می‌کند، ابتدا مدل پیوسته‌ی سازه به فرم گسسته تبدیل می‌شود. معادله‌ی گسسته‌شده‌ی سامانه به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۵], [۳۹].

$$X_{k+1} = A_d X_k + B_d U_k + E_d \ddot{x}_{g,k} \quad (20)$$

که در آن  $A_d$  ماتریس دینامیکی سامانه در زمان گسسته،  $B_d$  ماتریس ورودی کنترلی در زمان گسسته و  $E_d$  ماتریس تحریک لرزه‌ای در زمان گسسته هستند. برای گسسته‌سازی مدل، روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از رایج‌ترین آن‌ها، روش نگاه‌دارنده‌ی مرتبه صفر<sup>۳۱</sup> است. با استفاده از این روش، ماتریس‌های گسسته به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۵], [۳۹].

$$A_d = e^{A\Delta t}, \quad B_d = \left( \int_0^{\Delta t} e^{A\tau} d\tau \right) B, \\ E_d = \left( \int_0^{\Delta t} e^{A\tau} d\tau \right) E \quad (21)$$

که در آن‌ها  $\Delta t$  زمان نمونه‌برداری است.

در این پژوهش، افق پیش‌بینی ( $N_p$ ) و افق کنترل ( $N_c$ ) برابر در نظر گرفته شده‌اند و مقدار آن‌ها برابر با ۱۰ انتخاب شده است. افق پیش‌بینی مشخص می‌کند که وضعیت سامانه تا چند گام زمانی آینده پیش‌بینی می‌شود، و افق کنترل تعیین می‌کند که ورودی‌های کنترلی تا چند گام زمانی بهینه‌سازی می‌شوند [۱۵], [۳۹]. این انتخاب صرفاً بر پایه‌ی آزمون و خطا نبوده، بلکه با هدف جبران تأخیر زمانی فرض‌شده‌ی ۰/۱ ثانیه در سامانه کنترلی صورت گرفته است. با توجه به گام

زمانی محتمل ۰/۰۱ ثانیه (مطابق با مطالعات بطهایی و زهرایی [۴۰], [۴۱]) افق ۱۰ گامی برای پوشش این تأخیر مناسب ارزیابی شده است. هدف کنترل پیش‌بین مدل، کمینه‌سازی تابع هزینه‌ی مربعی زیر است:

$$J = \sum_{i=0}^{N_p-1} X_{k+i|k}^T Q X_{k+i|k} \\ + \sum_{i=0}^{N_c-1} U_{k+i}^T R U_{k+i} \quad (22)$$

این مسئله‌ی بهینه‌سازی تحت قیود ظرفیت نیروی کنترلی ( $\pm 10^6$  نیوتن) حل می‌شود. لازم به ذکر است که در این پژوهش ماتریس‌های وزن‌دهی ( $R$  و  $Q$ ) از طریق آزمون‌های تکراری تعیین شده‌اند.

اندازه‌گیری وضعیت فعلی سامانه  $x_k$ ، حل مسئله‌ی بهینه‌سازی و محاسبه‌ی  $U_k, U_{k+1}, \dots, U_{k+N_c-1}$ ، به‌روزرسانی اعمال تنها اولین ورودی کنترلی  $U_k$ ، به‌روزرسانی وضعیت سامانه و تکرار فرآیند در گام بعدی  $k+1$  گام‌های استراتژی افق لغزان<sup>۳۲</sup> در کنترل پیش‌بین مدل هستند که باعث می‌شود به صورت پویا و لحظه‌ای نسبت به تحریک‌های لرزه‌ای واکنش نشان دهد [۳۹].

### ۳. معیارهای ارزیابی عملکرد

برای ارزیابی عملکرد سامانه‌ی کنترل نیمه‌فعال پیشنهادی، پاسخ لرزه‌ای برج میلاد تحت هفت رکورد زلزله‌ی انتخاب‌شده (جدول ۱) تحلیل شده است. در این مطالعه، هشت شاخص عددی برای سنجش اثربخشی کنترل به‌کار گرفته شده‌اند که شامل مقادیر بیشینه و جذر میانگین مربعات از چهار پارامتر کلیدی

هستند: جابه‌جایی مطلق، سرعت مطلق، شتاب مطلق و جابه‌جایی نسبی.

شاخص‌های عملکرد به صورت نسبت مقدار کنترل شده به مقدار کنترل نشده تعریف شده‌اند به طوری که ۱ تا ۱۴ نسبت مقادیر بیشینه‌ی جابه‌جایی، سرعت، شتاب، و جابه‌جایی نسبی و ۱۵ تا ۱۸ هم به ترتیب نسبت مقادیر جذر میانگین مربعات آن‌ها است. این شاخص‌ها امکان مقایسه‌ی کمی بین حالت‌های کنترل شده و بدون کنترل را فراهم می‌کنند و معیار مناسبی برای سنجش اثربخشی سامانه میراگر جرمی غیرفعال و نیمه‌فعال تحت تحریک‌های لرزه‌ای محسوب می‌شوند.

#### ۴. نتایج و بحث

نتایج حاصل از تحلیل لرزه‌ای برج میلاد تحت هفت رکورد زلزله‌ی انتخاب شده در قالب شاخص‌های عملکردی ۱ تا ۱۸ ارائه شده‌اند. این شاخص‌ها شامل مقادیر بیشینه و جذر میانگین مربعات از چهار پارامتر کلیدی (جابه‌جایی، سرعت، شتاب، و جابه‌جایی نسبی) هستند که برای حالت‌های کنترل شده و بدون کنترل محاسبه شده‌اند.

جداول زیر، مقادیر عددی شاخص‌ها را برای هر رکورد زلزله و هر روش کنترلی نمایش می‌دهند. همچنین، میانگین کلی عملکرد هر روش کنترل در انتهای جداول گزارش شده است تا امکان مقایسه‌ی جامع فراهم گردد.

جدول ۴. نتایج رکوردهای زلزله‌ی مقیاس شده

	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	
چی چی	۰/۶۳	۰/۸۱	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۷۶	۰/۹۸	۰/۸۲	۰/۷۳	STMD
	۰/۸۱	۰/۹۵	۰/۸۱	۰/۸۰	۰/۹۴	۱/۰۰	۰/۹۶	۰/۹۲	TMD
دوزجه	۰/۶۴	۰/۸۳	۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۶۴	۰/۹۳	۰/۶۷	۰/۶۰	STMD
	۰/۸۳	۰/۹۶	۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۸۹	۱/۰۰	۰/۸۸	۰/۸۲	TMD
سن فرناندو	۰/۶۳	۰/۸۲	۰/۶۴	۰/۶۰	۰/۸۹	۰/۹۸	۰/۹۲	۰/۸۷	STMD
	۰/۷۸	۰/۹۶	۰/۷۹	۰/۷۵	۰/۹۸	۱/۰۰	۰/۹۹	۰/۹۷	TMD
سوپراستیشن	۰/۶۲	۰/۸۱	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۵۴	۰/۹۵	۰/۶۲	۰/۵۳	STMD
	۰/۸۶	۰/۹۶	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۹۹	۰/۷۸	۰/۸۰	TMD
هکتور ماین	۰/۷۳	۰/۸۷	۰/۷۳	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۷۱	STMD
	۰/۸۷	۰/۹۸	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۹۱	۱/۰۰	۰/۹۵	۰/۸۹	TMD
کوبه	۰/۸۳	۰/۸۸	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۷۹	STMD
	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۵	۱/۰۰	۰/۹۶	۰/۹۴	TMD
کوجائیلی	۰/۷۴	۰/۸۷	۰/۷۷	۰/۷۱	۰/۷۵	۰/۹۷	۰/۸۴	۰/۷۴	STMD
	۰/۹۱	۰/۹۸	۰/۹۲	۰/۸۹	۰/۹۳	۱/۰۰	۰/۹۶	۰/۹۲	TMD

جدول ۴. میانگین نتایج رکوردهای زلزله‌ی مقیاس‌شده

J۸	J۷	J۶	J۵	J۴	J۳	J۲	J۱	
۰/۶۹	۰/۸۴	۰/۷۰	۰/۶۸	۰/۷۳	۰/۹۵	۰/۷۹	۰/۷۱	STMD
۰/۸۶	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۸۵	۰/۹۲	۰/۹۹	۰/۹۲	۰/۸۹	TMD

میانگین

توانسته این معیار را بهتر کاهش دهد و در این مورد حدود ۱۳٪ بهتر از میراگر جرمی ساده عمل کرده است. یعنی شاید در لحظه‌ی بیشینه شتاب، میراگر جرمی نیمه‌فعال نتوانسته عملکرد مناسب خود را نشان دهد، اما در لحظات دیگر توانسته، بهتر شتاب وارده را کاهش دهد.

مشاهده می‌شود که جذر میانگین مربعات جابه‌جایی، سرعت و جابه‌جایی نسبی، در میراگر جرمی نیمه‌فعال نزدیک به ۳۰٪ نسبت به حالت کنترل‌نشده کاهش یافته است. جذر میانگین مربعات شتاب نیز بیش از ۱۵٪ نسبت به حالت کنترل‌نشده کاهش یافته است، در حالیکه این معیار در میراگر جرمی ساده تنها حدود ۳٪ کاهش یافته است.

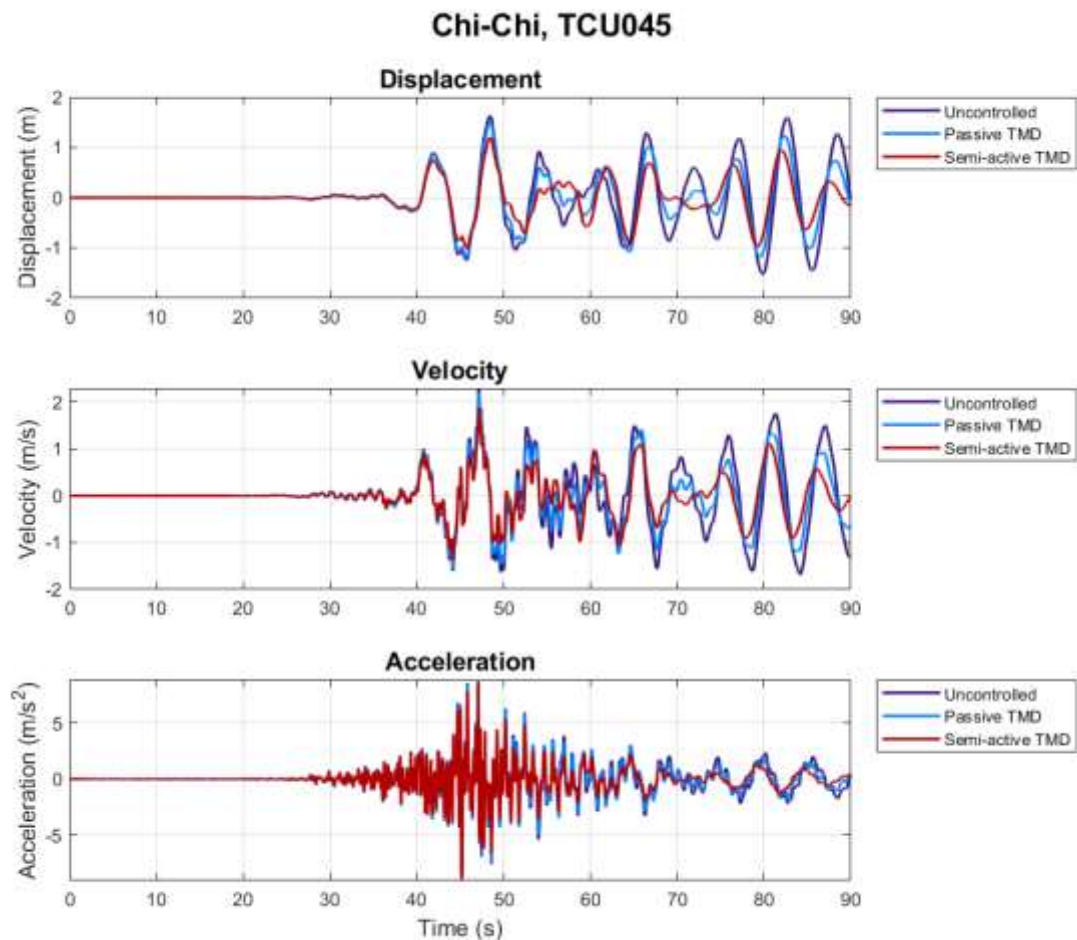
در ادامه، نمودارهای تاریخچه زمانی مربوط به پاسخ‌های لرزه‌ای برج میلاد تحت زلزله‌های چی‌چی، سوپرستیشن هیلز و سن فرناندو ارائه شده‌اند. این نمودارها شامل تغییرات زمانی جابه‌جایی، سرعت و شتاب در گنبد سازه (گره ۳۰، ارتفاع ۳۰۵ متر) هستند که عملکرد سامانه کنترلی نیمه‌فعال را در مقایسه با حالت غیرفعال و بدون کنترل نمایش می‌دهند.

در تمامی نمودارها، کاهش قابل‌توجهی در پاسخ سازه مشاهده می‌شود و پروفیل پاسخ‌ها در حالت کنترل‌شده هموارتر بوده و شدت نوسانات در بازه‌های بحرانی کاهش یافته است که بیانگر اثربخشی استفاده از ابزارهای کنترلی غیرفعال و نیمه‌فعال در سازه‌های بلند

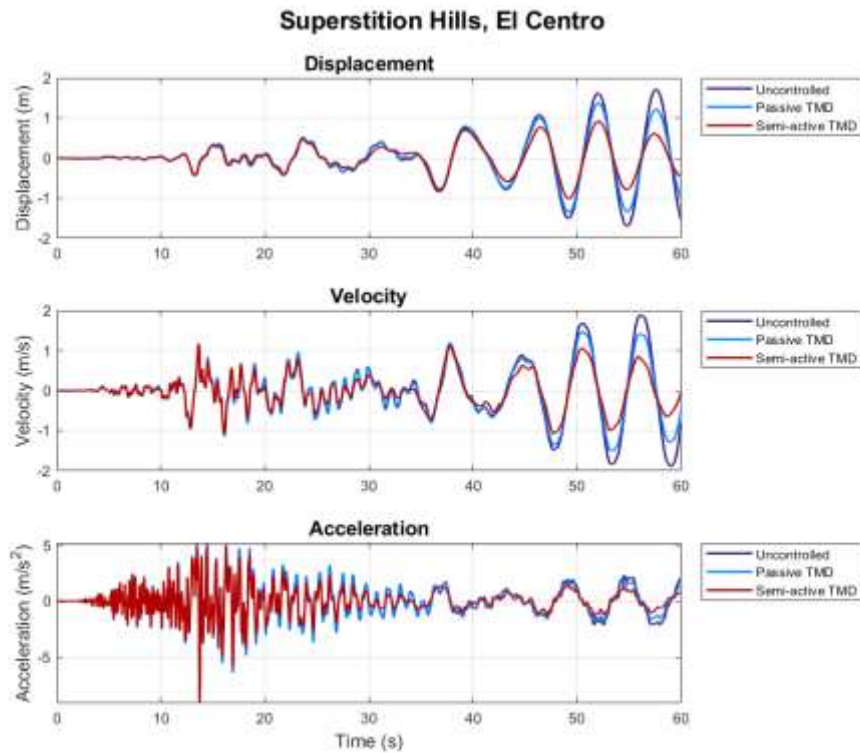
همان‌طور که از نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۴ و جدول ۵ مشاهده می‌شود، هر دو سامانه کنترلی توانسته‌اند بخشی از انرژی وارده به سازه را مستهلک کنند. در این میان، مشاهده می‌شود که میراگر جرمی نیمه‌فعال، انرژی بیشتری را نسبت به میراگر جرمی ساده مستهلک کرده است. به‌طور خاص مشاهده می‌شود که بیشینه جابه‌جایی و جابه‌جایی نسبی نزدیک به ۲۰٪، بیشینه سرعت نزدیک به ۱۵٪ و بیشینه شتاب در حدود ۵٪ در میراگر جرمی نیمه‌فعال نسبت به میراگر جرمی ساده کمتر بوده و این سامانه کنترلی در معیارهای بیشینه، بهتر از میراگر جرمی ساده عمل کرده است. همچنین، در معیارهای جذر میانگین مربعات جابه‌جایی و جابه‌جایی نسبی نیز حدود ۲۰٪ و در معیارهای سرعت و شتاب نزدیک به ۱۵٪ بیشتر از میراگر جرمی ساده، ارتعاشات را کاهش داده است. نکته‌ی قابل‌توجه، معیار بیشینه شتاب است که هر دو سامانه کنترلی نتوانسته‌اند به خوبی این مقادیر را کاهش دهند، حتی در بسیار از موارد این ضریب در میراگر جرمی ساده برابر واحد شده است. این مورد نشان‌دهنده‌ی ضعف میراگرهای جرمی در کاهش بیشینه شتاب سازه است که حتی با اضافه کردن دو میراگر MR، تنها حدود ۵٪ این معیار بهبود یافته است. یکی از نکات جالب جدول بالا، مشاهده‌ی ضعف میراگر جرمی ساده در کاهش جذر میانگین مربعات شتاب است، موردی که این بار میراگر جرمی نیمه‌فعال

لازم به ذکر است که این عملکرد بهتر، بسیار به الگوریتم کنترلی وابسته است. همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین یکی از مؤثرترین الگوریتم‌های کنترلی برای کنترل نیمه‌فعال و فعال سازه است و در صورتی که از الگوریتم کنترلی ضعیف‌تری استفاده می‌شود، انرژی کمتری مستهلک شده و کاهش ارتعاش کمتری شکل می‌گرفت.

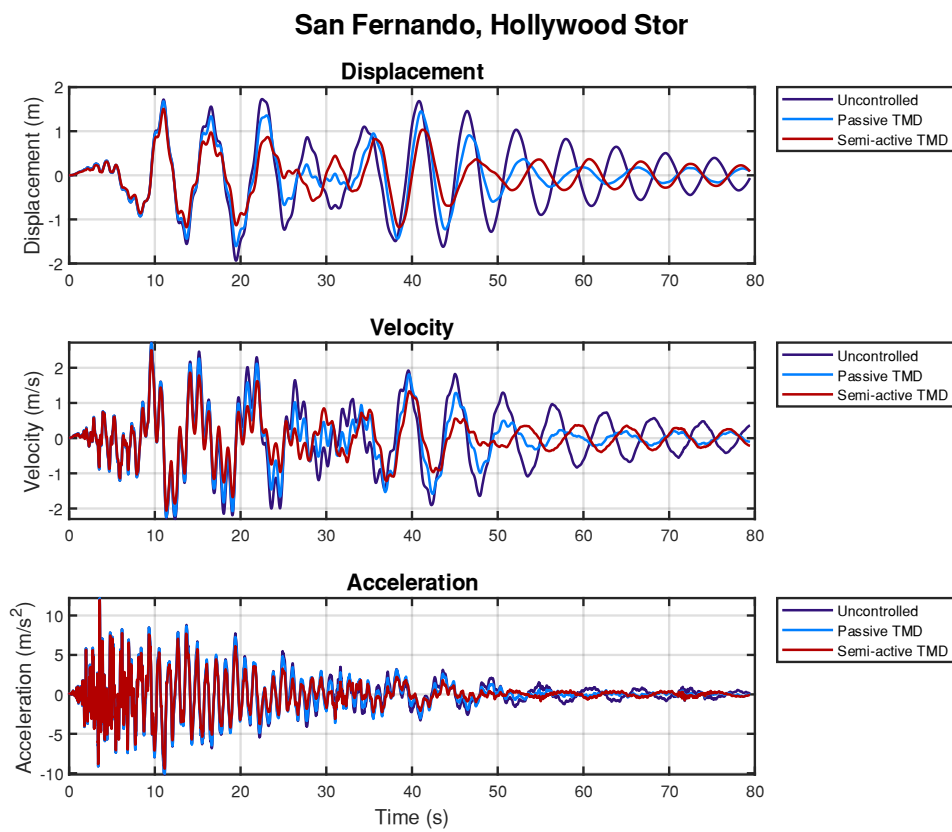
در این بین، میراگر جرمی نیمه‌فعال نسبت به میراگر جرمی غیرفعال، ارتعاشات بیشتری را کاهش داده است که نشان‌دهنده‌ی تأثیر میرایی متغیر در سامانه کنترلی است. سامانه کنترلی نیمه‌فعال با هزینه‌ی بسیار کم‌تر از کنترل فعال، توانسته بسیار مؤثر واقع شود و در تمامی پاسخ‌های سازه، کاهش ارتعاش مناسبی داشته باشد.



شکل ۱۲. نمودار تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان، سرعت و شتاب سازه در گره ۳۰ تحت زلزله‌ی چی چی



شکل ۱۳. نمودار تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان، سرعت و شتاب سازه در گره ۳۰ تحت زلزله‌ی سوپرستیشن‌هیلز



شکل ۱۴. نمودار تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان، سرعت و شتاب سازه در گره ۳۰ تحت زلزله‌ی سن‌فرناندو

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای برج میلاد مجهز به میراگر تنظیم‌شده‌ی جرمی نیمه‌فعال تحت رکوردهای مقیاس‌شده‌ی زلزله بررسی شد و با دو حالت کنترل‌نشده و میراگر جرمی غیرفعال مقایسه گردید. برای ارزیابی دقیق‌تر، هشت شاخص عملکردی شامل مقادیر بیشینه و جذر میانگین مربعات پاسخ‌های سازه مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور تطابق با ویژگی‌های تناوب بلند برج، رکوردهای زلزله با روش مقیاس‌سازی طیفی مبتنی بر موجک تنظیم شدند تا محتوای انرژی لرزه‌ای در بازه‌های بحرانی تناوب به‌درستی بازنمایی شود و تحلیل واقع‌گرایانه‌تری از پاسخ سازه حاصل گردد.

همچنین، مدل‌سازی میراگرهای سیال مغناطیسی با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام شد که جایگزینی سریع‌تر و کاملاً داده‌محور برای مدل‌های پارامتری سنتی مانند مدل اصلاح‌شده بوکون محسوب می‌شود. این ترکیب، بدون نیاز به مدل‌سازی پیچیده‌ی رفتار غیرخطی میراگر، عملکرد مؤثر و سریع‌تری در مدل‌سازی میراگرهای سیال مغناطیسی ارائه داده است. در سامانه کنترلی نیمه‌فعال، از کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین برای تنظیم نیروی میرایی در میراگر جرمی استفاده شد. این الگوریتم با پیش‌بینی رفتار سازه در گام‌های آینده، امکان واکنش سریع و هدفمند در برابر تحریک‌های لرزه‌ای را فراهم کرده و نیروی میرایی مطلوب میراگر سیال مغناطیسی را تعیین می‌کند.

نتایج عددی نشان داد که این سامانه کنترلی، در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای برج عملکرد قابل‌توجهی داشته و در اغلب شاخص‌های مقایسه‌ای، نسبت به حالت بدون کنترل و نیز

میراگر جرمی غیرفعال، کاهش مؤثرتری در جابه‌جایی، سرعت، شتاب و جابه‌جایی نسبی طبقه‌ای ایجاد کرده است. به‌طور خاص مشاهده می‌شود که جذر میانگین مربعات جابه‌جایی، سرعت و جابه‌جایی نسبی، در حالت نیمه‌فعال نزدیک به ۳۰٪ نسبت به حالت کنترل‌نشده کاهش یافته است. در حالی که این کاهش در حالت غیرفعال حدود ۱۵٪ مشاهده شد. همچنین، جذر میانگین مربعات شتاب در حالت نیمه‌فعال بیش از ۱۵٪ کاهش داشت، در حالی که در حالت غیرفعال تنها حدود ۳٪ کاهش مشاهده شد. در شاخص‌های بیشینه نیز، کنترل نیمه‌فعال کاهش‌هایی در حدود ۲۰٪ برای جابه‌جایی و جابه‌جایی نسبی، ۱۵٪ برای سرعت، و ۵٪ برای شتاب نسبت به حالت غیرفعال نشان داد که بیانگر اثربخشی بیشتر میرایی متغیر در کنترل نیمه‌فعال نسبت به حالت غیرفعال است. با توجه به این نتایج، استفاده از کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین در ترکیب با میراگر جرمی نیمه‌فعال می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر و قابل‌اجرا برای افزایش تاب‌آوری و کاهش ارتعاشات در سازه‌های بلند، به‌ویژه برج‌های مخابراتی، مورد توجه قرار گیرد.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، تأثیر پارامترهای طراحی میراگر جرمی نیمه‌فعال، همچون بررسی تأثیر استفاده از میرایی متغیر در کاهش جرم میراگر جرمی با استفاده از مقایسه‌ی پاسخ سازه‌ی مجهز به میراگر جرمی نیمه‌فعال با جرمی کوچک‌تر و مقایسه با حالت میراگر جرمی غیرفعال و با همان جرم اولیه بررسی شود. همچنین، استفاده از الگوریتم‌های پیش‌بینی پیشرفته‌تر و تحلیل پاسخ سازه تحت تحریک‌های تصادفی یا چندجهته نیز می‌تواند به گسترش دامنه‌ی کاربرد این روش در شرایط واقعی کمک کند.

- [1] Gutierrez Soto, M., & Adeli, H. (2013). Tuned mass dampers. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 20(4), 419–431. <https://doi.org/10.1007/s11831-013-9091-7>
- [2] Frahm, H. (1911, April 18). Device for damping vibrations of bodies
- [3] Spencer, B. F., & Nagarajaiah, S. (2003). State of the art of structural control. *Journal of Structural Engineering*, 129(7), 845–856. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:7\(845\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(845))
- [4] Koutsoloukas, L., Nikitas, N., & Aristidou, P. (2022). Passive, semi-active, active and hybrid mass dampers: A literature review with associated applications on building-like structures. *Developments in the Built Environment*, 12, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100094>
- [5] Kobori, T., Koshika, N., Yamada, K., & Ikeda, Y. (1991). Seismic-response-controlled structure with active mass driver system. Part 1: Design. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 20(2), 133–149. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290200204>
- [6] Cao, H., Reinhorn, A. M., & Soong, T. T. (1998). Design of an active mass damper for a tall TV tower in Nanjing, China. *Engineering Structures*, 20(3), 134–143. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00072-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00072-2)
- [7] Lu, X., Li, P., Guo, X., Shi, W., & Liu, J. (2014). Vibration control using ATMD and site measurements on the Shanghai World Financial Center Tower. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(2), 105–123. <https://doi.org/10.1002/tal.1027>
- [8] Zhou, K., Zhang, J.-W., & Li, Q.-S. (2022). Control performance of active tuned mass damper for mitigating wind-induced vibrations of a 600-m-tall skyscraper. *Journal of Building Engineering*, 45, 103646. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103646>
- [9] Abdul Aziz, M., Mohtasim, S. M., & Ahammed, R. (2022). State-of-the-art recent developments of large magnetorheological (MR) dampers: A review. *Korea-Australia Rheology Journal*, 34(2), 105–136. <https://doi.org/10.1007/s13367-022-00021-2>
- [10] Rabinow, J. (1948). The magnetic fluid clutch. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 67(2), 1308–1315. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1948.5059821>
- [11] Kang, J., Kim, H., & Lee, D. (2011). Mitigation of wind response of a tall building using semi-active tuned mass dampers. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(5), 552–565. <https://doi.org/10.1002/tal.609>
- [12] Demetriou, D., Nikitas, N., & Tsavdaridis, K. D. (2015). Semi-active tuned mass dampers of buildings: A simple control option. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(4), 620–632. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2015.620.632>
- [13] Bathaei, A., Zahrai, S. M., & Ramezani, M. (2018). Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+MR damper using type-1 and -2 fuzzy algorithms. *Journal of Vibration and Control*, 24(13), 2938–2953. <https://doi.org/10.1177/1077546317696369>
- [14] Koutsoloukas, L., Nikitas, N., Aristidou, P., & Meinhardt, C. (2020). Control law and actuator capacity effect on the dynamic performance of a hybrid mass damper: The case of Rottweil Tower. *Proceedings*, 1422–1432. <https://doi.org/10.47964/1120.9115.19241>

- [15] Mei, G., Kareem, A., & Kantor, J. C. (2002). Model predictive control of structures under earthquakes using acceleration feedback. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(5), 574–585. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2002\)128:5\(574\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:5(574))
- [16] Yan, G., Sun, B., & Lü, Y. (2007). Semi-active model predictive control for 3rd generation benchmark problem using smart dampers. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 6(3), 307–315. <https://doi.org/10.1007/s11803-007-0645-2>
- [17] Chen, Y., Zhang, S., Peng, H., Chen, B., & Zhang, H. (2017). A novel fast model predictive control for large-scale structures. *Journal of Vibration and Control*, 23(13), 2190–2205. <https://doi.org/10.1177/1077546315610033>
- [18] Ghorbani-Tanha, A. K., Noorzad, A., & Rahimian, M. (2009). Mitigation of wind-induced motion of Milad Tower by tuned mass damper. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 18(4), 371–385. <https://doi.org/10.1002/tal.421>
- [19] Khaloo, A. R., Asadpour, N., & Horr, A. M. (2001). Full dynamic analysis of Tehran telecommunication tower; linear and nonlinear responses. *The Structural Design of Tall Buildings*, 10(4), 263–281. <https://doi.org/10.1002/tal.184>
- [20] Horr, A. M., Safi, M., & Asadpour, N. (2002). Seismic analysis of Tehran Telecommunication Tower using complex fractional modulus. *The Structural Design of Tall Buildings*, 11(5), 353–373. <https://doi.org/10.1002/tal.206>
- [21] Zafarani, H., Ghorbani-Tanha, A. K., Rahimian, M., & Noorzad, A. (2008, October). Seismic response analysis of Milad Tower in Tehran, Iran, under site-specific simulated ground motions. In *The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing*
- [22] Yahyai, M., Rezayibana, B., & Daryan, A. S. (2009). Nonlinear seismic response of Milad Tower using finite element model. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 18(8), 877–890. <https://doi.org/10.1002/tal.468>
- [23] Bazmooneh, A., Dabbaghchian, I., Behboodi, S., Maghsoodi Shaghghi, A., Sanayei, M., & Esfandiari, A. (2020). Dynamic response evaluation of a super-tall tower via endurance time method. *Numerical Methods in Civil Engineering*, 5(2), 53–72. <https://doi.org/10.52547/nmce.5.2.53>
- [24] Yahyai, M., Daryan, A. S., Ziaei, M., & Mirtaheri, S. M. (2011). Wind effect on Milad Tower using computational fluid dynamics. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(2), 177–189. <https://doi.org/10.1002/tal.522>
- [25] Ghorbani-Tanha, A. K., Rahimian, M., & Noorzad, A. (2005, December). Dynamic response of Milad Tower in Tehran, Iran, under wind excitation. In *Future Sustainable Skycities and Towers in the Present Millennium: The 7th International Conference on Multi-Purpose High Rise Towers and Tall Buildings, Dubai (Paper IFHS-106)*
- [26] Guyan, R. J. (1965). Reduction of stiffness and mass matrices. *AIAA Journal*, 3(2), 380. <https://doi.org/10.2514/3.2874>
- [27] Yahyai, M., Rezayibana, B., & Mohammadrezapour, E. (2011). Effect of near-fault earthquakes with forward directivity on telecommunication towers. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 10(2), 211–218. <https://doi.org/10.1007/s11803-011-0059-z>

- [28] Amiri, M. M., & Yahyai, M. (2013). Estimation of damping ratio of TV towers based on ambient vibration monitoring. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22(11), 862–875. <https://doi.org/10.1002/tal.733>
- [29] Al Atik, L., & Abrahamson, N. (2010). An improved method for nonstationary spectral matching. *Earthquake Spectra*, 26(3), 601–617. <https://doi.org/10.1193/1.3459159>
- [30] Wang, D. H., & Liao, W. H. (2005). Modeling and control of magnetorheological fluid dampers using neural networks. *Smart Materials and Structures*, 14(1), 111–126. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/14/1/011>
- [31] National Institute of Standards and Technology. (2011). NIST GCR 11-917-15: Design of the next generation of seismic performance assessment procedures
- [32] Iranian Ministry of Roads and Urban Development. Standard for seismic design of buildings (ISIRI 2800: 4th ed.)
- [33] FEMA. (2009). FEMA P-695: Quantification of building seismic performance factors
- [34] Craig, R. R., & Kurdila, A. J. (2006). *Fundamentals of structural dynamics* (2nd ed.). Wiley.
- [35] Jansen, L. M., & Dyke, S. J. (2000). Semiactive control strategies for MR dampers: Comparative study. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(8), 795–803. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:8\(795\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:8(795))
- [36] Ok, S.-Y., Kim, D.-S., Park, K.-S., & Koh, H.-M. (2007). Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers. *Engineering Structures*, 29(5), 776–788. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.06.020>
- [37] Kaveh, A., Pirgholizadeh, S., & Khademhosseini, O. (2015). Semi-active tuned mass damper performance with optimized fuzzy controller using CSS algorithm. *Asian Journal of Civil Engineering*, 16, 587–606
- [38] A. K. Chopra, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2012.
- [39] Camacho, E. F., & Bordons, C. (2007). *Model predictive control*. London: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-398-5>
- [40] Bathaei, A., & Zahrai, S. M. (2024). Vibration control of an eleven-story structure with MR and TMD dampers using MAC predictive control, considering nonlinear behavior and time delay in the control system. *Structures*, 60, 105853. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105853>
- [41] Bathaei, A., & Zahrai, S. M. (2022). Compensating time delay in semi-active control of a SDOF structure with MR damper using predictive control. *Structural Engineering and Mechanics*, 82(4), 445–458. <https://doi.org/10.12989/sem.2022.82.4.445>

پی‌نوشت

<sup>1</sup> Semi-active Tuned Mass Damper (STMD)

<sup>2</sup> Magnetorheological (MR) damper

<sup>3</sup> Predictive controller

<sup>4</sup> Linear Quadratic Regulator

- 
- <sup>5</sup> Ground-hook control algorithm
  - <sup>6</sup> Clipped-optimal control algorithm
  - <sup>7</sup> Kalman filter
  - <sup>8</sup> Large Eddy Simulation (LES)
  - <sup>9</sup> Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS)
  - <sup>10</sup> Relative displacement
  - <sup>11</sup> Bouc-Wen model
  - <sup>12</sup> MATLAB
  - <sup>13</sup> Wang and Liao
  - <sup>14</sup> Semi-active Tuned Mass Damper (STMD)
  - <sup>15</sup> NIST GCR 11-917-15
  - <sup>16</sup> Al Atik and Abrahamson
  - <sup>17</sup> Baseline drift
  - <sup>18</sup> SeismoMatch
  - <sup>19</sup> Peak Ground Acceleration (PGA)
  - <sup>20</sup> Guyan reduction method
  - <sup>21</sup> Assemble
  - <sup>22</sup> Retained DOFs
  - <sup>23</sup> Condensed DOFs
  - <sup>24</sup> Ok et al.
  - <sup>25</sup> Feedforward Neural Network
  - <sup>26</sup> Tangent sigmoid (tansig)
  - <sup>27</sup> Levenberg–Marquardt
  - <sup>28</sup> Hybrid Tuned Mass Damper (HTMD)
  - <sup>29</sup> Chopra
  - <sup>30</sup> Quadratic Programming
  - <sup>31</sup> Zero-Order Hold (ZOH)
  - <sup>32</sup> Receding Horizon