

# طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم کنترل نیمه‌فعال سازه‌یی با استفاده از یک میراگر مغناطیسی جدید

Research Note

مهدی سلیمانی\* (دانشیار)

طهورت عسگری (کارشناس ارشد)

مهدی صادقی (کارشناس ارشد)

گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

در نوشتار حاضر، یک سیستم نیمه‌فعال سازه‌یی با استفاده از یک میراگر مغناطیسی جدید طراحی، ساخته و بر روی یک قاب برشی دو درجه آزادی آزمایشگاهی پیاده‌سازی شده است. در ابتدا بر پایه‌ی نتایج آزمون، پارامترهای مدل میراگر براساس مدل بوک - ون شناسایی شدند. در ادامه، کنترل‌کننده‌های قلاب آسمانی و تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر طراحی و بر روی سازه پیاده‌سازی و عملکرد آن‌ها برای یک زلزله‌ی نمونه با استفاده از نتایج آزمون میز لرزه بررسی شدند. نتایج آزمون آزمایشگاهی مدل ایده‌آل قلاب آسمانی، نشان‌دهنده‌ی مؤثر بودن مدل مذکور در کاهش میزان شتاب انتقالی به طبقات و برش پایه است. همچنین، نتایج آزمون آزمایشگاهی کنترل‌کننده‌ی تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر نشان می‌دهد که عملکرد کنترل‌کننده‌ی ذکر شده، در کاهش شتاب انتقالی به طبقات و جابه‌جایی نسبی با کنترل‌کننده‌ی قلاب آسمانی کاملاً قابل مقایسه است که این امر حاکی از موفقیت کنترل‌کننده‌ی تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر در مواجهه با تحریک لرزه‌یی است.

واژگان کلیدی: کنترل نیمه‌فعال، میراگر مغناطیسی، آزمون آزمایشگاهی میز لرزه.

## ۱. مقدمه

سامانه‌ی کنترلی نیمه‌فعال، سامانه‌یی است که در آن با تغییر میرایی یا سختی، رفتار سیستم اصلاح می‌شود. در سامانه‌های کنترلی نیمه‌فعال، خواص مکانیکی عملگرها به صورت لحظه‌یی قابل تنظیم است. تفاوت عمده‌ی سامانه‌ی نیمه‌فعال با سامانه‌ی فعال این است که در سامانه‌ی کنترلی نیمه‌فعال، سامانه از سازه انرژی می‌گیرد؛ ولی سامانه‌ی کنترلی فعال می‌تواند هم به سازه انرژی بدهد و هم از سازه انرژی بگیرد. نیاز به انرژی کم، حفظ پایداری دینامیکی سیستم و همچنین داشتن ویژگی‌های سیستم‌های غیرفعال و در عین حال داشتن کارایی سیستم‌های فعال، از مزیت‌های سامانه‌های کنترلی نیمه‌فعال است. سامانه‌های کنترلی، نظیر میرایی متغیر و میراگرهای مغناطیسی جزء سامانه‌های کنترلی نیمه‌فعال هستند.<sup>[۱]</sup> در سیستم کنترلی مورد بررسی در پژوهش حاضر، میراگر مغناطیسی به‌عنوان عملگر کنترلی برای سازه در نظر گرفته شده است.

در سامانه‌ی کنترل فعال، یک یا چند عملگر فعال با توجه به بازخورد رفتار سازه، در یک چرخه‌ی کنترلی به سازه نیرو وارد می‌کنند و از این طریق رفتار سازه را در مواجهه با اغتشاش‌های خارجی به مقدار مطلوب نزدیک می‌کنند. همچنین در سیستم‌های کنترل فعال، سیگنال‌های کنترلی تابعی از پاسخ سیستم هستند که به کمک حس‌گرها<sup>۱</sup> اندازه‌گیری می‌شوند.<sup>[۲]</sup> قابلیت توانایی کاهش ارتعاش‌ها در وضعیت‌های چندمخاطره‌یی (به طور نمونه اغتشاش بادهای قوی و زلزله) و کارایی

به منظور افزایش مقاومت سازه‌ها در برابر تحریک‌های محیطی، در سال‌های اخیر به کنترل سازه بسیار توجه شده است. سامانه‌های کنترلی را به‌طور کلی می‌توان به ۴ دسته‌ی کلی: غیرفعال<sup>۱</sup>، نیمه‌فعال<sup>۲</sup>، ترکیبی<sup>۳</sup> و فعال<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی کرد. سامانه‌ی کنترلی غیرفعال، یک سیستم سازه‌یی فرعی است که به سازه‌ی اصلی متصل می‌شود. در سامانه‌ی مذکور، کنترل‌کننده‌های غیرفعال در واقع نوعی از جاذب‌های ارتعاشی هستند که در پاسخ به حرکت سازه، به سازه نیرو وارد می‌کنند و باعث جذب بخشی از انرژی منتقل شده از منبع تحریک خارجی به سازه می‌شوند. سادگی نصب، هزینه‌ی نگهداری پایین و پایداری دینامیکی سازه به دلیل عدم اعمال نیروی خارجی از مزایای سامانه‌های کنترلی غیرفعال هستند. عدم قابلیت کنترل و تغییر نیرو به صورت مداوم در حین فرایند کنترل از بزرگ‌ترین عیوب سامانه‌ی کنترلی است. سامانه‌های کنترلی غیرفعال، نظیر: جداساز پایه<sup>۵</sup>، میراگر جرمی تنظیم‌شونده (TMD)<sup>۶</sup>، میراگر اصطکاکی<sup>۷</sup>، میراگر فلزی تسلیمی (ADAS damper)<sup>۸</sup>، میراگر مایع تنظیم شده (TLCD)<sup>۹</sup> و میراگرهای ویسکوز و ویسکوکشسان، جزء سامانه‌های کنترلی غیرفعال هستند.<sup>[۱]</sup>

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۶/۴/۱۸، پذیرش ۱۳۹۶/۶/۷

DOI:10.24200/J30.2018.1922.2079

## Archive of SID

موقعیت قرار گرفتن میراگر در ماشین و نیز سرعت متفاوت چرخش قطعه‌ی کار با اعمال جریان ثابت به میراگر بود.

همچنین در همان سال<sup>[۱۳]</sup> با استفاده از تئوری لیاپانوف، به کنترل پل کابلی نامتقارن به کمک میراگرهای مغناطیسی پرداخته شد. در پژوهش دیگری (۲۰۱۴) نیز از کنترلر  $H_{\infty}$  برای مهار ارتعاشات غیرخطی سازه‌های بلند در معرض زلزله استفاده و نتایج به دست آمده با کنترلرهای پیش‌بین MPC و LQG مقایسه و نتیجه‌گیری شد که روش مذکور عملکرد مناسبی داشته است.

همچنین در مطالعه‌ی در سال ۲۰۰۴<sup>[۱۴]</sup> به مقایسه‌ی در زمینه‌ی راهبردهای کنترل نیمه‌فعال سازه جهت کاهش ارتعاش‌های القا شده به سازه پرداخته و نتیجه‌گیری شد که استفاده از کنترل‌کننده‌ی نیمه‌فعال، مناسب‌ترین گزینه برای کنترل سازه‌هاست. در سال ۲۰۰۲<sup>[۱۵]</sup> نیز آزمایش میز لرزه بر روی دو سازه‌ی مجاور یکدیگر به وسیله‌ی میراگر مغناطیسی غیرفعال و نیمه‌فعال کنترل و انجام شده است. همچنین برخی پژوهشگران در سال ۱۹۹۶<sup>[۱۶]</sup> کنترل نیمه‌فعال سازه بر پایه‌ی شبکه‌ی عصبی مصنوعی را به کمک میراگر مغناطیسی بررسی کردند.

در سال ۲۰۰۴<sup>[۱۷]</sup> نیز یک روش کنترلی جدید جهت کاهش ارتعاش‌های سازه با در نظر گرفتن عدم قطعیت معرفی شد، به طوری که در آن کنترل‌کننده‌ی LQR با رویکرد فیلتر کالمن UKF ترکیب شد و نتایج پژوهش با کنترلر LQR-KF مقایسه شد. همچنین در سال ۱۹۷۰<sup>[۱۸]</sup> طراحی کنترلر نیمه‌فعال تطبیقی ساده برای سازه‌ی غیرخطی ۲۰ طبقه مجهز به میراگر مغناطیسی انجام و نتیجه‌گیری شد که روش مذکور برای سازه‌های در معرض زلزله، عملکرد بهتری نسبت به دیگر کنترلرها دارد. برخی پژوهشگران (۲۰۱۴)<sup>[۱۹]</sup> نیز راهکاری به منظور بهینه کردن هزینه اقتصادی و همچنین رسیدن به سطح مطلوبی از ایمنی برای یک ساختمان ۹ طبقه که میراگرهای مغناطیسی در بین طبقات آن نصب می‌شد، ارائه و در پروژه‌ی خود از میراگرهای مغناطیسی ۲۰۰ کیلو نیوتنی استفاده کردند.

در پژوهش حاضر، یک نمونه‌ی جدید از میراگرهای مغناطیسی با کاربرد کنترل سازه‌ی ارائه شده است. نوآوری میراگر مغناطیسی مذکور در شکل خاص اریفس‌های آن به منظور کاهش میرایی پایه است. مزیت طرح ارائه شده در آن است که کاملاً بومی بوده و از نمونه‌ی خارجی کپی نشده است. علاوه بر این، میزان اثر بخشی کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی در کاهش شتاب‌های مشتق شده به طبقات و نتیجتاً برش پایه و همچنین جابه‌جایی نسبی طبقات بر روی یک سازه‌ی آزمایشگاهی به کمک آزمون میز لرزه بررسی شده است. علاوه بر این، با پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ی مرسوم تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر و کنترل‌کننده‌ی ایده‌آل فلاب آسمانی بر روی میراگر مغناطیسی ذکر شده، میزان موفقیت کنترل‌کننده‌ی مرسوم تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر در کاهش جابه‌جایی نسبی طبقات و برش پایه در میراگر ارائه شده بررسی شده است.

## ۲. طراحی و ساخت میراگر مغناطیسی

میراگرهای مغناطیسی، میراگرهای ویسکوز سیلندر - پیستونی هستند که از سیال مغناطیسی به جای سیال معمولی در آن‌ها استفاده می‌شود و در پیستون آن‌ها، یک هسته‌ی مغناطیسی قرار دارد. هنگامی که سیال تحت میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، تغییر لزجت می‌دهد و لذا امکان کنترل میرایی از طریق اعمال ولتاژ یا جریان فراهم می‌شود. با توجه به در اختیار داشتن متغیرهای سازه، اولین گام برای طراحی میراگر، تعیین محدوده‌ی قابل قبولی از میرایی ویسکوز است. برای این منظور از شبیه‌سازی رفتار سیستم در نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. میرایی پایه<sup>[۷]</sup>، کمیته‌ی

بیشتر در کنترل سازه، از مزایای سامانه‌ی کنترل فعال و امکان ایجاد ناپایداری در سازه، نیاز به تجهیزات پیچیده‌ی پردازش سیگنال و نیاز به عملگرهای پرتوان برای ایجاد نیروی زیاد و در نتیجه مصرف انرژی زیاد، از معایب سامانه‌های کنترل فعال است.<sup>[۱]</sup> سامانه‌های کنترلی، نظیر میراگرهای جرمی فعال (AMD)<sup>[۱]</sup> و سامانه‌ی تاندون فعال<sup>[۲]</sup> جزء سامانه‌های کنترل فعال هستند.

سامانه‌های کنترل ترکیبی، در واقع ترکیبی از سامانه‌ی کنترل فعال یا نیمه‌فعال با سامانه‌ی کنترل غیرفعال هستند. در سامانه‌ی کنترل ترکیبی، از یک سامانه‌ی کنترل فعال و یا نیمه‌فعال برای بهبود عملکرد سیستم غیرفعال استفاده می‌شود و یا برعکس سامانه‌ی کنترل غیرفعال به یک کنترل‌کننده‌ی فعال یا نیمه‌فعال، برای کاهش انرژی مصرفی اضافه می‌شود.<sup>[۱]</sup>

یکی از عملگرهای سامانه‌های کنترلی نیمه‌فعال، میراگرهای مغناطیسی است. میراگرهای مغناطیسی، با کشف سیال مغناطیسی<sup>[۳]</sup> در سال ۱۹۴۰ ساخته شدند.<sup>[۲]</sup> در سال ۲۰۰۳<sup>[۴]</sup> اولین مدل از یک میراگر مغناطیسی ارائه شد و همچنین برای اولین بار در موزه‌ی ملی علم و فناوری توکیو در سال ۲۰۰۱، دو میراگر مغناطیسی ۳۰ تنی برای کنترل آن ساختمان به کار گرفته شد.<sup>[۵]</sup>

یکی از مهم‌ترین قسمت‌های یک سیستم کنترل نیمه‌فعال، طراحی کنترل‌کننده‌ی آن است. تاکنون کارهای بسیاری در زمینه‌ی طراحی کنترل‌کننده‌ی سیستم‌های نیمه‌فعال سازه‌ی انجام شده است. برخی پژوهشگران (۲۰۱۵)<sup>[۶]</sup> دو روش کنترلی نیمه‌فعال برای کنترل دو پل سوتنگ<sup>[۴]</sup> و راسکی<sup>[۵]</sup> پیشنهاد کردند. در راهبرد کنترلی آن‌ها، کنترل براساس کنترل سیکل انرژی و کنترل میرایی ویسکوز بود. همچنین، مدلی که برای میراگر مغناطیسی استفاده کردند، مدل بینگهام<sup>[۶]</sup> بود. آن‌ها کنترل‌کننده‌ی بی را که براساس کنترل میرایی طراحی کرده بودند، برای دو پل مذکور پیاده‌سازی کردند. کنترل‌کننده‌های آن‌ها در کاهش جابه‌جایی در حد مطلوب مؤثر بود، اما ضعف کار آن‌ها در کاهش شتاب انتقالی به سازه بود که به صورت افزایش برش پایه آشکار شد. همچنین کنترل‌کننده‌ی آن‌ها بر پایه‌ی کنترل روشن - خاموش طراحی شده بود.

برخی پژوهشگران (۲۰۱۵)<sup>[۷]</sup> نیز از کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی برای کنترل نیمه‌فعال یک ساختمان ۳ طبقه استفاده کردند و محل قرارگیری میراگر مغناطیسی را بین کف و طبقه‌ی اول ساختمان در نظر گرفتند. کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی آن‌ها به خوبی با عدم قطعیت پارامترهای مدل میراگر و سازه مقابله نکرده بود؛ همچنین آن‌ها آثار چتریگ را در نظر نگرفته بودند. علاوه بر این، در کار آن‌ها میزان تأثیر سیستم کنترلی در برش پایه بررسی نشده بود.

همچنین در پژوهش دیگری در همان سال<sup>[۸]</sup> به منظور کنترل ارتعاش‌های عرضی یک توربین بادی، از کنترل‌کننده‌ی نیمه‌فعال فازی در یک میراگر مغناطیسی و نیز برای مدل کردن رفتار میراگر مغناطیسی از مدل بوک - ون استفاده کردند. کاترینو نیز در همان سال<sup>[۹]</sup> از دو راهبرد کنترلی برای کنترل ارتعاش‌ها و همچنین کاهش تنش وارده به پایه‌ی یک توربین بادی ساخته شده در دانشگاه هوفنهایم با مقیاس ۱:۲۰ با استفاده از میراگر مغناطیسی بهره برد. همچنین در سال ۲۰۱۴<sup>[۱۰]</sup> برای مدل‌سازی یک میراگر مغناطیسی، از شبکه‌ی عصبی استفاده شد و نتایج حاصل با نتایجی که از آزمون به دست آورده شده بود، اعتبار بخشی شد، این کار بر مبنای ردیابی نیروی میراگر انجام شده بود.

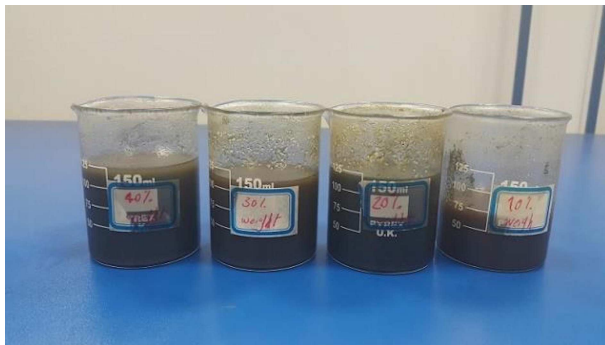
صحت و همکارانش<sup>[۱۱]</sup> برای کنترل ارتعاش‌های دو ساختمان مجاور یکدیگر، از میراگر مغناطیسی و همچنین کنترل‌کننده‌ی فازی و برای به دست آوردن مقادیر بهینه برای متغیرهای مدل بوک - ون، از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استفاده کردند. برخی پژوهشگران (۲۰۱۴)<sup>[۱۲]</sup> نیز به منظور کاهش ارتعاش‌های مته‌ی سوراخ‌کاری در ماشین‌های سوراخ‌کاری، از میراگرهای مغناطیسی استفاده کردند تمرکز آن‌ها بر

جدول ۱. ابعاد میراگر مغناطیسی.

طول مجرای حلقوی (mm)	شعاع خارجی پیستون داخلی سیلندر (mm)	مساحت پیستون (mm)
۵۰	۱۲٫۴	سطح دسته
	۱۳	۵۳۰٫۹
		۵۰٫۲۷

جدول ۲. پارامترهای دینامیکی مدل.

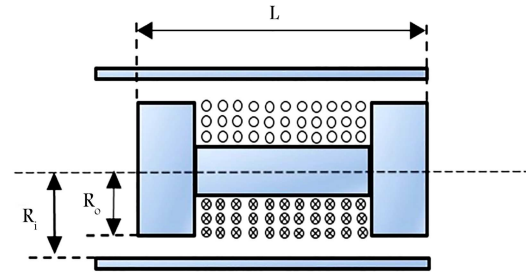
جرم طبقه اول (kg)	۳٫۷۷۶۹
جرم طبقه دوم (kg)	۳٫۲۳۷۳
سختی طبقه اول (N/m)	۳۱۴٫۱۴۲
سختی طبقه دوم (N/m)	۳۳۳٫۱۷۶
بسامد طبیعی اول (R/s)	۵٫۹۹
بسامد طبیعی دوم (R/s)	۱۵٫۴۴



شکل ۲. نانو سیال‌های ساخته شده با ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی.

که ذرات فرومغناطیس به خود می‌گیرند، عامل ایجاد مقاومت بیشتر در برابر حرکت پیستون و در نتیجه میرایی بیشتر است. یکی از ویژگی‌های مهم سیال‌های مغناطیسی، دینامیک سریع تغییرات خواص رئولوژیکی<sup>۱۹</sup> در اثر اعمال میدان مغناطیسی است، به این معنی که سیال در زمان بسیار کوتاهی از حالت غیرمغناطیسی به مغناطیسی و بالعکس تغییر می‌کند.

سیال‌های مغناطیسی معمولاً به دو صورت نانوسیال و میکروسیال وجود دارند. در سیال‌های نانو از نانوذرات فرومغناطیس به عنوان ذرات معلق استفاده می‌شود، در حالی که در میکروسیال‌ها از ذرات فرومغناطیس در ابعاد میکرو به عنوان ذرات معلق استفاده می‌شود. در ساخت سیال مغناطیسی باید به دو نکته توجه شود: نکته اول، انتخاب سیال پایه است. در پژوهش حاضر، از روغن گیاهی به عنوان سیال پایه برای سیال مغناطیسی استفاده شده است. انتخاب روغن گیاهی به عنوان سیال پایه هدف (میرایی با جریان صفر) صورت گرفته است. برای این منظور، روغن‌های مختلفی آزمون شدند. در این بین، به دلیل اینکه لزجت روغن گیاهی در محدوده‌ی مطلوب قرار گرفته است و از طرفی باعث خوردگی قطعات میراگر نیز نمی‌شود، انتخاب شده است. البته روغن انتخابی یگانه گزینه‌ی موجود نیست. لیکن در انتخاب روغن قید، در دسترس بودن و قیمت نیز لحاظ شده است. نکته دوم، پایداری سیال است. سیال‌های نانو با توجه به نوع ساخت، مراحل ساخت، و همچنین با توجه به استفاده از نانوذرات در ساخت، نسبت به میکروسیال‌ها پایدارتر هستند. اما در مقایسه با میکروسیال‌ها، باید درصد وزنی بیشتری از ذرات فرومغناطیس برای اثربخشی استفاده کرد، که همین امر هزینه‌ی محصول را بالا می‌برد. در پژوهش حاضر، ۴ نانوسیال با ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی (شکل ۲) ساخته و استفاده شده‌اند. نانوذره‌ی مورد استفاده، پودر اکسید آهن نانو با فرمول  $Fe_3O_4$  و با ابعاد ۲۰-۳۰ نانومتر بوده



شکل ۱. نمای برش خورده از سیلندر و پیستون.<sup>[۱۴]</sup>

میرایی ممکن است که میراگر مغناطیسی می‌تواند داشته باشد. میرایی پایه ناشی از عبور سیال از روزنه‌های پیستون میراگر در حالتی است که جریانی از سیم پیچ هسته نمی‌گذرد و مقدار آن به لزجت سیال و ابعاد میراگر بستگی دارد. در پژوهش حاضر، توجه ویژه‌ی به طراحی ارفیس‌های میراگر به منظور دست‌یابی به سطح میرایی پایه‌ی مطلوب شده است. برای تعیین محدوده‌ی میرایی و بسکوز پایه از مدل قلاب آسمانی به عنوان مدل مبنا استفاده شده است.

## ۱.۲. میراگر مغناطیسی

برای تعیین ابعاد میراگر، از جمله: قطر داخلی سیلندر، طول سیلندر، قطر پیستون و قطر روزنه‌ها، نیاز است که رابطه‌ی بین میرایی لزجی و ابعاد میراگر مشخص باشد. به منظور ساده‌سازی تحلیل میراگر مغناطیسی، فرض می‌شود که سیال تراکم‌ناپذیر و فشار در ناحیه‌ی بین سیلندر و پیستون، یکنواخت است. برای جریان آرام در مجرای حلقوی، مقاومت معادل سیال به صورت رابطه‌ی ۱ که پارامترهای آن در شکل ۱ معرفی شده‌اند، بیان می‌شود:<sup>[۱۴]</sup>

$$R_e = \frac{\lambda L}{\pi \left[ R_o^2 - R_i^2 - \frac{(R_o^2 - R_i^2)^2}{L n(R_o/R_i)} \right]} \eta \quad (1)$$

که در آن،  $\eta$  لزجت سیال مغناطیسی،  $R_o$  شعاع خارجی پیستون،  $R_i$  شعاع داخلی سیلندر و  $L$  طول مجرای حلقوی است.

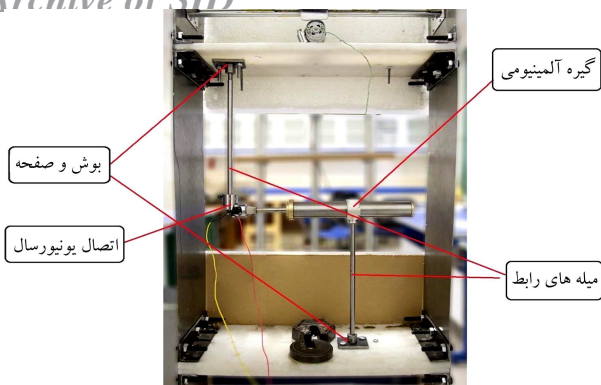
در نهایت، میرایی معادل برای میراگر مغناطیسی به صورت رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید،<sup>[۱۴]</sup> که در آن،  $A_p$  مساحت پیستون و  $A_r$  مساحت دسته‌ی پیستون است.

$$C_e = (A_p - A_r)^2 R_e \quad (2)$$

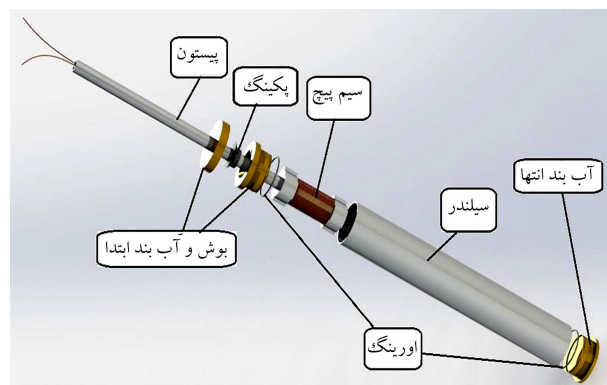
با در نظر گرفتن معادلات ۵ و ۶ ابعاد میراگر به صورت جدول ۱ محاسبه می‌شود. همچنین پارامترهای دینامیکی مدل در جدول ۲ آورده شده است.

مواد مغناطیسی، سیال‌هایی هستند که برخی خواص رئولوژی آن‌ها مانند گرانروی، در اثر اعمال یک میدان الکتریکی یا مغناطیسی در مدت چند میلی‌ثانیه به وضوح تغییر می‌کنند و با حذف میدان اعمال شده به حالت اولیه باز می‌گردند.

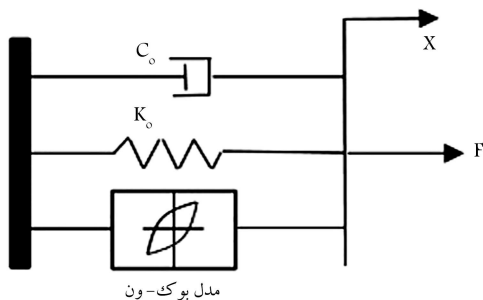
ترکیب‌های هر کدام از انواع سیال‌های مغناطیسی، متفاوت است و شامل مواد فرومغناطیس<sup>۱۸</sup> معلق در سیال پایه هستند. ذرات معلق باید در ابعاد بسیار کوچک، در حدود نانو باشند تا بتوانند در داخل سیال به حالت معلق باقی بمانند. در اثر اعمال میدان به هر کدام از سیالات ذکر شده، ذرات نانو در جهت میدان قطبیده می‌شوند. در نتیجه‌ی رخ دادن پدیده‌ی قطبیدگی، ذرات به حالت زنجیروار در امتداد هم قرار می‌گیرند و اجازه‌ی حرکت کردن به دیگر ذرات و همچنین به مولکول‌های سیال را نمی‌دهند. در نتیجه سیال حالت خمیری شکل به خود می‌گیرد.<sup>[۱۵]</sup> آرایشی



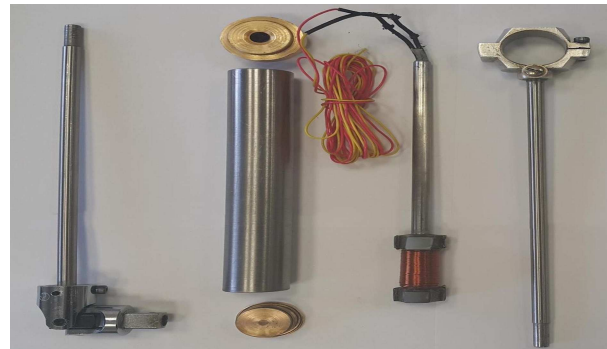
شکل ۵. نحوه‌ی اتصال میراگر به سازه.



شکل ۳. نمایی از حالت انفجاری میراگر مغناطیسی.



شکل ۶. مدل بوک - ون.



شکل ۴. قطعات میراگر و اتصالاتها.

با اتصال ذکرشده، میراگر به سازه، سیلندر به طبقه‌ی اول، و پیستون به طبقه‌ی دوم متصل می‌شود. در واقع، جابه‌جایی و سرعت سیلندر دقیقاً با جابه‌جایی و سرعت طبقه‌ی اول و جابه‌جایی و سرعت پیستون با جابه‌جایی و سرعت طبقه‌ی دوم یکسان هستند. پارامترهای دینامیکی مدل در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

### ۳. مدل‌سازی میراگر مغناطیسی و شناسایی پارامترهای آن

از آنجایی که میراگر هوشمند، یکی از ارکان اصلی سیستم کنترل سازه‌ی مورد بررسی است، برای طراحی سیستم کنترلی مذکور، داشتن یک مدل دقیق از آن به‌عنوان عملگر سیستم کاملاً ضروری است. تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه‌ی مدل‌سازی میراگرهای هوشمند انجام و مدل‌های ریاضی مختلفی نیز برای مشخص کردن آن‌ها ارائه شده است. مدل بوک - ون<sup>[۶]</sup>، یکی از پرکاربردترین و مؤثرترین مدل‌های مورد استفاده در زمینه‌ی میراگرهای هوشمند است. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مدل بوک - ون، از ۳ قسمت میرایی، سختی و هیستریزس تشکیل شده است.

#### ۱.۳. مدل بوک - ون

مدل بوک - ون به‌صورت گسترده‌ی برای مدل کردن سیستم‌های با پدیده‌ی هیستریزس استفاده می‌شود.<sup>[۱۰]</sup> نیروی میراگر در مدل بوک - ون، به‌صورت روابط ۴ و ۵ به دست می‌آید:

$$F = C_0 \dot{x} + k_0 x + az \quad (4)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (5)$$

است. نانوسیال‌ها نیز از ترکیب نانوذرات با روغن پایه در محیط اولتراسونیک و اضافه کردن پایدارساز سورفکتانت SDS با درصدهای وزنی ذکرشده ساخته شدند. سیم لوله‌ی عامل تولید میدان مغناطیسی، در میراگر مغناطیسی است. اگر از مرکز یک سیم‌لوله، یک هسته‌ی فلزی عبور داده شود، در آنجا میدان مغناطیسی به وجود می‌آید و هسته‌ی مذکور به مانند یک آهن‌ربا تشکیل دو قطب  $S$  و  $N$  می‌دهد (رابطه‌ی ۳):

$$B = \mu_m \mu_0 \frac{N}{L} I \quad (3)$$

که در آن،  $\mu_m$  ضریب ثابت تراوایی هسته  $(H/m)$ ،  $\mu_0$  ثابت گذردهی خلاء  $(F/m)$ ،  $N$  تعداد دور سیم‌لوله،  $L$  طول سیم‌لوله  $(m)$ ،  $I$  جریان  $(A)$  عبوری از سیم‌لوله، و  $B$  میدان مغناطیسی  $(T)$  هستند.

هسته‌ی مغناطیس استفاده شده در پژوهش حاضر، از جنس فولاد ST۳۷ است، طول سیم‌لوله  $0.3$  متر، تعداد دور سیم‌پیچ در هر لایه  $40$  دور و مجموعاً  $6$  لایه‌ی سیم‌پیچ استفاده شده و نیز سیم استفاده شده از نوع لاکبی با قطر  $0.6$  میلی‌متر بوده است.

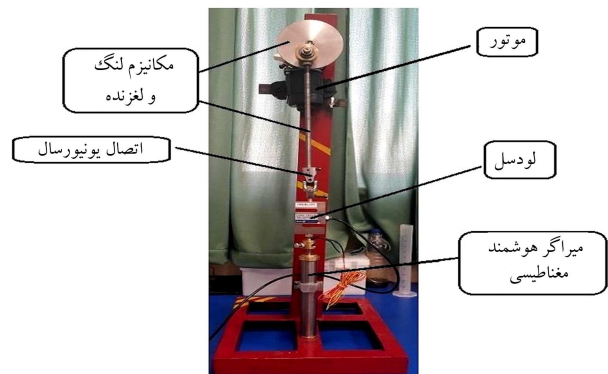
در میراگرهای مغناطیسی بنا به کاربرد، می‌توان انباره را در سیلندر تعبیه و یا از سیلندر حذف کرد. به‌عنوان مثال، در میراگرهای مغناطیسی که در سیستم تعلیق وسائط نقلیه استفاده می‌شوند، وجود انباره ضروری است. در میراگرهای سازه‌یی، معمولاً از انباره استفاده نمی‌شود. جنس سیلندر باید به گونه‌یی باشد که میدان مغناطیسی سیم‌پیچ را کامل کند. شکل ۳، یک نمای انفجاری از میراگر طراحی شده را نمایش می‌دهد. همچنین در شکل ۴، قطعات ساخته‌شده‌ی میراگر مشاهده می‌شود. شکل ۵، نحوه‌ی اتصال میراگر به سازه را نشان می‌دهد. اتصالات شامل دو عدد میله‌ی رابط، دو عدد بوش و صفحه، اتصال یونیورسال و یک عدد گیره است.

جدول ۳. نتایج شناسایی مدل بوک -ون برای درصدهای وزنی مختلف با استفاده از الگوریتم ژنتیک.

درصد وزنی	$n$	$\eta$	$c.a$	$c.b$	$k_s$	$\alpha_a$	$\alpha_b$	$\gamma$	$\beta$	$A$
		(1/s)	(N.s/m)	(N.s/m)	(N/m)	(N/m)	(N/m)	(m <sup>-2</sup> )	(m <sup>-2</sup> )	(m <sup>-2</sup> )
۱۰	۲	۸۹/۴۹۰	۱/۹۴۰	۰/۳۴۰	۱۰/۷۹۰	۲۳/۴۷۰	۱۲/۷۸۰	۱/۵۲۷	۸/۰۸۳	۰/۲۰۲
۲۰	۲	۴۰/۰۱۰	۱/۱۳۰	۴/۶۱۰	۲۰/۰۸۰	۱۰/۵۳۰	۲۳/۸۱۰	۷/۰۹۰	۹/۴۷۰	۰/۰۴۱
۳۰	۲	۵۷/۰۱۰	۰/۲۰۰	۱/۸۰۰	۱/۲۲۰	۸۰/۹۳۰	۱۶/۴۴۰	۲/۷۴۰	۷/۸۴۰	۰/۲۷۶
۴۰	۲	۷۶/۶۴۰	۲/۹۹۰	۱/۲۴۰	۶/۶۱۰	۴۱/۷۳۰	۹/۱۲۰	۵/۵۲۴	۸/۷۷۰	۰/۶۰۰

### ۳.۳. شناسایی متغیرهای مدل بوک - ون به کمک الگوریتم ژنتیک

پارامترهای مدل، شامل ضرایبی که در معادله های ۴ و ۵ معرفی شدند، با مقایسه ی نتایج آزمون و شبیه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک شناسایی می شوند. برای این منظور، مسئله ی شناسایی پارامترهای مدل بوک -ون در قالب یک مسئله ی بهینه سازی فرمول بندی و از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک نرم افزار متلب استفاده شده است. توابع معیار در مسئله ی مذکور، ریشه ی دوم میانگین مربعات تفاضل نیروی اندازه گیری شده ی میراگر و نیروی شبیه سازی شده برای ۴ جریان صفر، ۲، ۴ و ۶ آمپر هستند. این توابع با استفاده از روش ترکیب توابع معیار در قالب یک تابع هدف تک منظوره به صورت زیر تعریف می شوند:



شکل ۷. دستگاه آزمون میراگر هوشمند مغناطیسی.

$$PI = \sum_{i=1}^{i=2} \frac{rms(Test Force_i - Simulation Force_i)}{rms(Test Force_i - Simulation Force_i)}$$

که در آن،  $Test Force_i$  نیروی میراگر حاصل از آزمون به ازاء جریان  $i$ ام،  $Simulation Force_i$  نیروی میراگر حاصل از شبیه سازی به ازاء جریان  $i$ ام و علامت بار در مخرج کسر مشخص کننده ی مقدار میانگین توابع مذکور است که به منظور نرمال سازی توابع استفاده می شود. متغیرهای بهینه سازی نیز پارامترهای مدل بوک -ون هستند.

در جدول ۳، پارامترهای مدل بوک - ون برای سیال های با درصدهای وزنی مختلف که به روش مذکور محاسبه شده اند، ارائه شده است.

### ۴.۳. نمودارهای عملکردی میراگر مغناطیسی

نمودارهای عملکردی میراگر مغناطیسی به عنوان شاخصه یی از عملکرد میراگر مغناطیسی محسوب می شود. با استفاده از دستگاه آزمون میراگر مغناطیسی، نیرو، جابه جایی و سرعت پیستون میراگر مغناطیسی برای نانوسیال های با ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی با جریان های مختلف اندازه گیری شده است. به منظور نمایش بهتر، نتایج نمودارهای برآزش داده شده ی جابه جایی - نیرو و سرعت - نیرو نیز ترسیم شده است. همچنین نتایج برای سیال با درصد وزنی ۲۰، در شکل های ۸ الی ۱۰ مشاهده می شود. شکل ۸، نمودار زمان - نیرو برای نانوسیال ۲۰٪ وزنی به دست آمده از آزمون برای ۴ ولتاژ ۰، ۲، ۴ و ۶ ولت را نشان می دهد. شکل ۹، نمودار برآزش داده شده ی جابه جایی - نیرو برای نانوسیال ۲۰٪ وزنی به دست آمده از آزمون برای ۴ ولتاژ ۰، ۲، ۴ و ۶ ولت را نشان می دهد. و شکل ۱۰، نمودار برآزش داده شده ی سرعت - نیرو برای نانوسیال ۲۰٪ وزنی به دست آمده از آزمون برای ۴ ولتاژ ۰، ۲، ۴ و ۶ ولت را نشان می دهد.

### ۲.۳. سیستم آزمون میراگر مغناطیسی

برای تعیین متغیرهای میراگر، یک سیستم آزمایش طراحی شده است، تا بتوان به کمک آن هم زمان جابه جایی پیستون و نیروی ناشی از میرایی را اندازه گیری کرد. دستگاه ساخته شده (شکل ۷) متشکل از موتور محرک به منظور ایجاد یک جابه جایی متناوب، اتصال لنگ و لغزنده به منظور تبدیل حرکت دورانی به خطی و یک لودسل کششی - فشاری برای اندازه گیری نیروی کششی - فشاری میراگر است.

برای اندازه گیری جابه جایی پیستون، از یک سیستم پردازش تصویر استفاده شده است. نرخ داده برداری دوربین استفاده شده، ۳۰ فریم بر ثانیه بوده است. همچنین موتور دستگاه آزمون میراگر در دور ثابت ۳۰ دور در دقیقه راه اندازی شد. به منظور اندازه گیری نیروی حاصل از میرایی، از لودسل استفاده شده است. لودسل مورد نظر ساخت شرکت زمیک و با ظرفیت ۲۵ کیلوگرم و از نوع S شکل کششی - فشاری بوده است.

## Archive of SID

لرزه) است.  $F_d$  نیروی میراگر مغناطیسی است که از مدل بوک - ون به دست می‌آید و با جای‌گذاری معادله‌های ۶ و ۷ در معادله‌ی ۴ نتیجه می‌شود (معادله‌ی ۱۰):

$$\mathbf{F}_d = (c_{\alpha a} + c_{\alpha b} u)(\dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\mathbf{x}}_1) + k_{\alpha}(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) + (\alpha_a + \alpha_b u)z \quad (10)$$

که در آن،  $\ddot{\mathbf{x}}_1$  و  $\ddot{\mathbf{x}}_2$  با جای‌گذاری معادله‌ی ۱۰ در معادلات ۸ و ۹، معادله‌های ۱۱ و ۱۲ به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{x}}_1 = & \frac{K_r}{M_1}(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) - \frac{K_1}{M_1}(\mathbf{x}_1 - \mathbf{U}) - \frac{C_1}{M_1}(\dot{\mathbf{x}}_1 - \dot{\mathbf{U}}) \\ & + \frac{C_r}{M_1}(\dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\mathbf{x}}_1) + \frac{1}{M_1}((c_{\alpha a} + c_{\alpha b} u)(\dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\mathbf{x}}_1)) \\ & + \frac{k_{\alpha}}{M_1}(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) + \frac{1}{M_1}((a_{\alpha} + a_{\alpha} u)z) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{x}}_2 = & -\frac{K_r}{M_2}(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) - \frac{C_r}{M_2}(\dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\mathbf{x}}_1) \\ & - \frac{1}{M_2}((c_{\alpha a} + c_{\alpha b} u)(\dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\mathbf{x}}_1)) \end{aligned} \quad (12)$$

باید توجه داشت که  $\dot{z}$  از رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید:

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{z}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{z}|z|^n + \mathbf{A}\dot{\mathbf{x}} \quad (13)$$

## ۵. طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ی نیمه‌فعال

در پژوهش حاضر، دو کنترل‌کننده‌ی قلاب آسمانی و تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر طراحی و بر روی میراگر مغناطیسی هوشمند پیاده‌سازی شده‌اند. کنترل‌کننده‌ی قلاب آسمانی، که در پژوهش حاضر استفاده شده است، از نوع پیوسته است که در ادامه توضیح داده شده است.

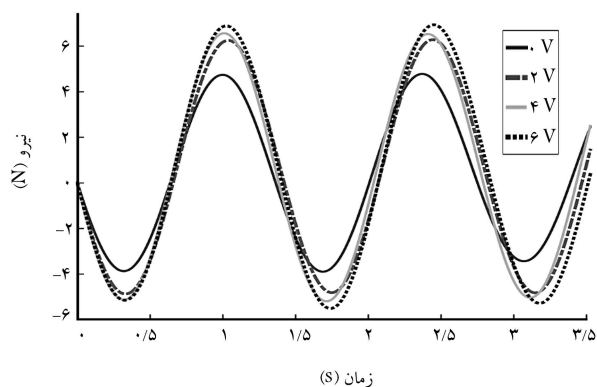
### ۱.۵. راهبرد کنترلی قلاب آسمانی

مدل قلاب آسمانی در واقع یک مدل فرضی است، که بیانگر یک راهبرد کنترلی نیمه‌فعال است (شکل ۱۱) و به دو گونه‌ی روشن - خاموش<sup>۲۱</sup> و پیوسته وجود دارد، که در هر دو مورد، ملاک حد بالا و حد پایین میرایی است و تفاوت در راهبرد کنترلی آن‌هاست. در مدل قلاب آسمانی روشن - خاموش، راهبرد کنترلی به این صورت است که اگر حاصل‌ضرب سرعت مطلق طبقه‌ی دوم در سرعت نسبی طبقات بزرگ‌تر یا مساوی صفر باشد، حد بالای میرایی برای ضریب میرایی متغیر در نظر گرفته می‌شود و اگر حاصل‌ضرب سرعت مطلق طبقه‌ی دوم در سرعت نسبی طبقات کوچک‌تر از صفر باشد، حد پایین میرایی برای ضریب میرایی متغیر در نظر گرفته می‌شود (رابطه‌ی ۱۴):

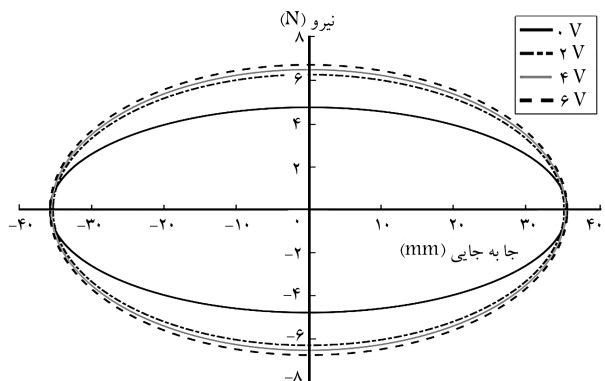
$$\begin{aligned} \dot{z}_t \times V_{rel} \geq 0 \quad C_s = High.state \\ \dot{z}_t \times V_{rel} < 0 \quad C_s = High.state \end{aligned} \quad (14)$$

که در آن،  $V_{rel}$  سرعت نسبی دو سر دمپر است که از رابطه‌ی ۱۵ به دست می‌آید:<sup>[۱]</sup>

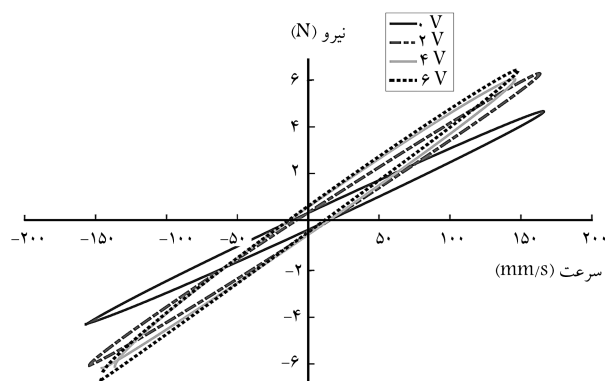
$$\mathbf{V}_{rel} = \dot{z}_t - \dot{z}_b \quad (15)$$



شکل ۸. نمودار زمان - نیرو برای نانوسیال ۲۰٪.



شکل ۹. نمودار برازش داده شده‌ی جابه‌جایی - نیرو برای نانوسیال ۲۰٪.



شکل ۱۰. نمودار برازش داده شده‌ی سرعت - نیرو برای نانوسیال ۲۰٪.

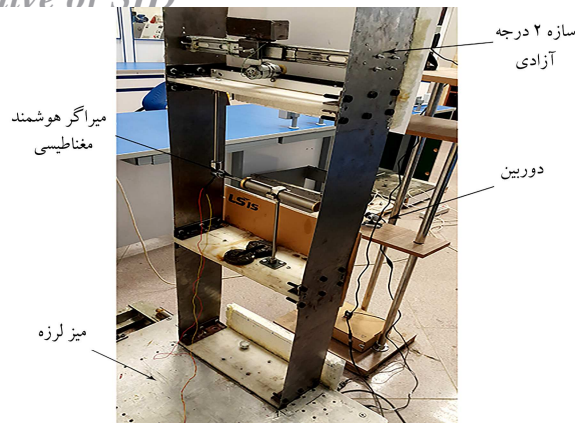
## ۴. معادله‌های سازه و میراگر مغناطیسی

برای سازه‌ی دو درجه‌آزادی با میراگر مغناطیسی، معادله‌های دینامیکی حرکت به صورت روابط ۸ و ۹ است:

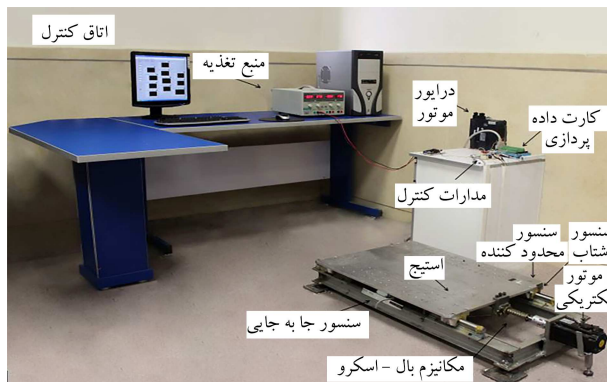
$$\begin{aligned} M_1 \ddot{\mathbf{x}}_1 = & K_r(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) - K_1(\mathbf{x}_1 - \mathbf{U}) \\ & - C_1(\dot{\mathbf{x}}_1 - \dot{\mathbf{U}}) + \mathbf{F}_d + C_r(\dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\mathbf{x}}_1) \end{aligned} \quad (8)$$

$$M_2 \ddot{\mathbf{x}}_2 = -K_r(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) - C_r(\dot{\mathbf{x}}_2 - \dot{\mathbf{x}}_1) - \mathbf{F}_d \quad (9)$$

که در آن‌ها،  $M_1$  جرم طبقه‌ی اول،  $M_2$  جرم طبقه‌ی دوم،  $K_1$  سختی طبقه‌ی اول،  $K_r$  سختی طبقه‌ی دوم،  $c_1$  میرایی طبقه‌ی اول،  $c_2$  میرایی طبقه‌ی دوم،  $x_1$  جابه‌جایی طبقه‌ی اول،  $x_2$  جابه‌جایی طبقه‌ی دوم و  $U$  جابه‌جایی پایه (جابه‌جایی میز



شکل ۱۲. سازه‌ی دو درجه آزادی و سیستم نیمه‌فعال بر روی میز لرزه.



شکل ۱۳. میز لرزه و اتاق کنترل.

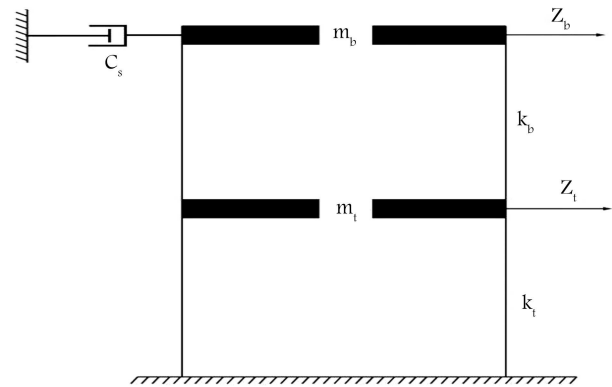
در جلوی سازه نصب شده است. شکل ۱۲، سازه‌ی مجهز به سیستم نیمه‌فعال و سامانه‌ی پردازش تصویر را بر روی میز شبیه‌ساز زلزله نشان می‌دهد. همچنین، در شکل ۱۳، میز شبیه‌ساز لرزه به همراه اجزاء اتاق کنترل مشاهده می‌شود.

## ۲.۵. پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ها و تحلیل نتایج آزمون

کنترل‌کننده‌ها بر روی سیستم نیمه‌فعال پیاده‌سازی و عملکرد آن‌ها در آزمون میز لرزه بررسی شده است. زلزله‌ی مورد شبیه‌سازی که ویراست مقیاس‌شده‌ی زلزله‌ی چالغانان است، از پایه به سازه اعمال شد.

نتایج آزمون برای ۴ حالت، شامل: سازه‌ی بدون هیچ سیستم کنترلی، سازه با میراگر غیرفعال (میراگر با جریان سیم‌پیچ صفر)، سازه با کنترل‌کننده‌ی قلاب آسمانی، و سازه با کنترل‌کننده‌ی PID به‌دست آمده است، که در شکل‌های ۱۴ الی ۱۷ مشاهده می‌شوند. در پایان هر آزمون، مقدار مجذور مجموع مربعات پاسخ‌های جابه‌جایی طبقات، سرعت طبقات، شتاب طبقات و جابه‌جایی نسبی طبقات محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده‌اند. جابه‌جایی نسبی طبقات به‌عنوان معیار تسلیم‌المان‌های سازه‌ی و شتاب طبقات به‌عنوان عوامل مؤثر در میزان برش پایه و همچنین راحتی ساکنان در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به نتایج گزارش شده در جدول ۴ مشاهده می‌شود که میراگر غیرفعال مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی جابه‌جایی طبقه‌ی اول را به میزان ۱۲٪ و مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی جابه‌جایی طبقه‌ی دوم را به میزان ۱۹٪ کاهش داده است. همچنین میراگر مذکور، مقدار مجذور میانگین مربعات شتاب طبقه‌ی اول را به میزان ۲۲٪ و مقدار مجذور میانگین مربعات شتاب طبقه‌ی دوم را به میزان ۲۷٪ کاهش داده



شکل ۱۱. مدل قلاب آسمانی.

که در آن،  $\dot{z}_b$  سرعت مطلق طبقه‌ی اول و  $\dot{z}_t$  سرعت مطلق طبقه‌ی دوم است. در مدل قلاب آسمانی پیوسته، راهبرد کنترلی به این صورت است که اگر حاصل ضرب سرعت مطلق طبقه‌ی دوم در سرعت نسبی طبقات کوچک‌تر از صفر باشد، حد پایین میرایی برای ضریب میرایی متغیر در نظر گرفته می‌شود و اگر حاصل ضرب سرعت مطلق طبقه‌ی دوم در سرعت نسبی طبقات بزرگ‌تر و یا مساوی صفر باشد، مقدار آلفا در نظر گرفته می‌شود (رابطه‌ی ۱۶):

$$\begin{aligned} \dot{z}_b \times V_{rel} &\geq 0 \quad C_s = a \\ \dot{z}_b \times V_{rel} &< 0 \quad C_s = Low.state \\ \alpha &= \max[Low.state, \min\{g \times \dot{z}_b, High.state\}] \end{aligned} \quad (16)$$

کنترل‌کننده‌ی تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر در هر لحظه تفاضل خروجی جابه‌جایی طبقه‌ی دوم و مقدار مطلوب (جابه‌جایی صفر) را به‌عنوان خطای کنترلی دریافت و ورودی کنترلی را براساس میزان خطا محاسبه می‌کند. کنترل‌کننده‌ی تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر از ۳ قسمت تناسبی<sup>۲۲</sup>، انتگرال‌گیر<sup>۲۳</sup> و مشتق‌گیر<sup>۲۴</sup> تشکیل شده است که هر کدام از آن‌ها سیگنال خطا را به‌عنوان ورودی در نظر می‌گیرد و عملیاتی را روی آن انجام می‌دهند و در نهایت خروجی آن‌ها با هم جمع می‌شود. خروجی مجموعه‌ی مذکور، که همان خروجی کنترلی است، پی‌اچ‌دی (PID) است، برای اصلاح خطا به سیستم فرستاده می‌شود. خروجی کنترلی کنترل‌کننده‌ی تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر به‌صورت رابطه‌ی ۱۷ است:<sup>[۱۶]</sup>

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (17)$$

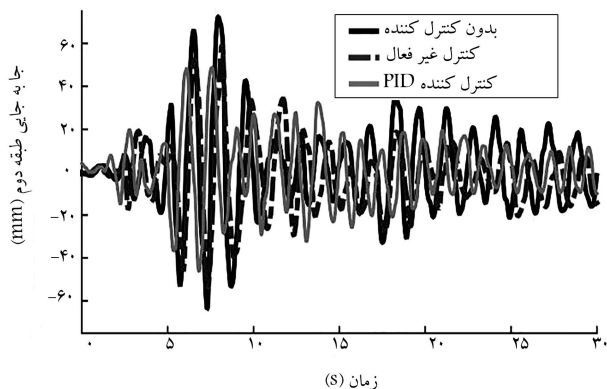
که در آن،  $K_p$ ،  $K_I$  و  $K_D$  به ترتیب ضرایب تناسبی، انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر کنترل‌کننده‌ی تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر هستند. پارامترهای کنترل‌کننده‌ی تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر با استفاده از نرم‌افزار متلب و براساس معیار فزاینده ۲۰٪ و خطای حالت ماندگار ۱٪ تنظیم شده‌اند.  $e(t)$  نیز سیگنال خطاست.

معادله‌های فضای حالت غیرخطی ۱۵ الی ۱۹ در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی می‌شود، سپس به کمک بلوک PID و تعیین سیگنال خطا، ضرایب بهینه‌ی PID به کمک الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شوند. پس از به‌دست آمدن ضرایب PID، به کمک نرم‌افزار لیبویو عمل پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ی تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر و کنترل‌کننده‌ی قلاب سفقی انجام می‌شود.

برای پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ها از نرم‌افزار لیبویو استفاده شده است. سیستم حسگر نیز یک سامانه‌ی پردازش تصویر مجهز به دو دوربین جداگانه است که

جدول ۴. مقدار مجذور میانگین ریشه ( $rms$ ) سازه تحت زلزله‌ی چالفانت.

حالت	جابه‌جایی طبقه‌ی		سرعت طبقه‌ی		جابه‌جایی طبقه‌ی		
	اول ( $mm$ )	دوم ( $mm$ )	اول ( $mm/s$ )	دوم ( $mm/s$ )	اول ( $mm$ )	دوم ( $mm$ )	
بدون کنترل	۱۲,۵۹۶۳	۱۸,۸۸۷۱	۲,۴۸۶۶	۲,۳۴۷۶	۷,۶۳۲۷	۱,۲۶۲۳	
کنترل غیرفعال	۱۰,۹۴۲۰	۱۵,۲۰۷۳	۲,۶۶۱۱	۱,۸۵۵۰	۵,۸۶۳۵	۰,۹۱۲۹	
کنترل قلاب آسمانی	۱۱,۷۹۸۰	۱۴,۶۶۶۸	۲,۵۲۳۷	۱,۷۹۱۸	۵,۴۱۸۳	۰,۷۸۹۴	
کنترل PID	۱۰,۲۲۸۵	۱۳,۸۷۹۰	۲,۴۳۹۴	۱,۷۲۶۹	۵,۱۸۴۴	۰,۸۳۹۶	

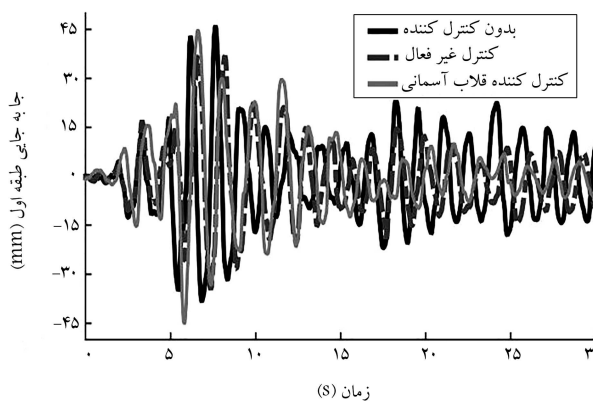


شکل ۱۷. نمودار جابه‌جایی طبقه‌ی دوم سازه با ورودی زلزله‌ی چالفانت.

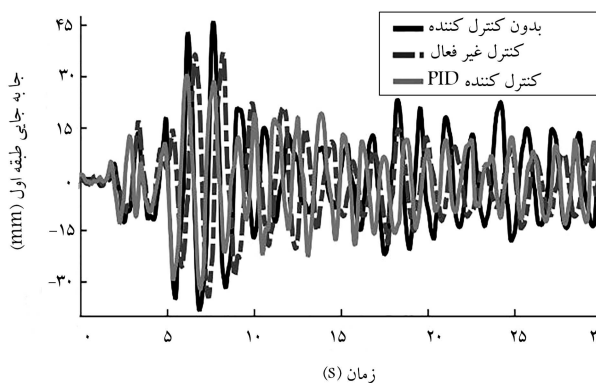
است. علاوه بر این، میراگر غیرفعال نیز مقدار مجذور میانگین مربعات جابه‌جایی نسبی طبقات را به میزان ۲۳٪ کاهش داده است.

راهبرد کنترلی قلاب آسمانی، مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی جابه‌جایی طبقه‌ی اول را به میزان ۱۳٪ و مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی جابه‌جایی طبقه‌ی دوم را به میزان ۲۲٪ کاهش داده است. همچنین راهبرد کنترلی مذکور، مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی شتاب طبقه‌ی اول را به میزان ۲۶٪ و مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی شتاب طبقه‌ی دوم را به میزان ۳۷٪ کاهش داده است. علاوه بر این، راهبرد کنترلی قلاب آسمانی، مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقات را به میزان ۲۵٪ کاهش داده است.

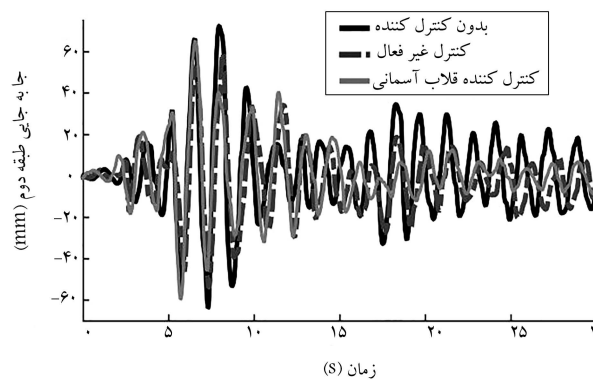
کنترل‌کننده‌ی تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر، مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی جابه‌جایی طبقه‌ی اول را به میزان ۱۸٪ و مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی جابه‌جایی طبقه‌ی دوم را به میزان ۲۶٪ کاهش داده است. همچنین کنترل‌کننده‌ی مذکور، مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی شتاب طبقه‌ی اول را به میزان ۲۷٪ و مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی شتاب طبقه‌ی دوم را به میزان ۳۳٪ کاهش داده است. علاوه بر این، با به‌کارگیری کنترل‌کننده‌ی تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر، مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی جابه‌جایی نسبی طبقات به میزان ۳۲٪ کاهش یافته است. کاهش شتاب به علت مؤثر بودن آن در برش پایه (برش پایه، نیروی برشی است که به پایه‌ی هر ساختمان وارد می‌شود، که مقدار آن برابر با مجموع حاصل‌ضرب جرم هر طبقه در شتاب آن است) حائز اهمیت است. راهبرد کنترلی قلاب آسمانی، مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی برش پایه را به میزان ۳۰٪ و کنترل‌کننده‌ی تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر، مقدار مجذور میانگین ریشه‌ی برش پایه را به میزان ۳۲٪ کاهش داده است. همچنین برای مقایسه‌ی بهتر عملکرد کنترل‌کننده‌های مختلف، پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب طبقه‌ی دوم در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌شوند.



شکل ۱۴. نمودار شتاب - زمان زلزله‌ی مقیاس شده‌ی چالفانت.



شکل ۱۵. نمودار جابه‌جایی طبقه‌ی اول سازه با ورودی زلزله‌ی چالفانت.



شکل ۱۶. نمودار جابه‌جایی طبقه‌ی اول سازه با ورودی زلزله‌ی چالفانت.



در مجموع می توان نتیجه گیری کرد که هر دو راهبرد کنترلی بر کاهش شتاب طبقات و در نتیجه کاهش برش پایه و کاهش جابه جایی نسبی طبقات مؤثر بوده اند. این میزان کاهش تقریباً با عملکرد کنترل کننده مدل قلاب آسمانی برابری می کند. لیکن از آنجایی که مدل قلاب آسمانی، یک مدل مینا و ایده آل است و به علت حلقه باز بودن، حساسیت آن به تغییر پارامترهای مدل و اغتشاش زیاد است، امکان استفاده عملی از آن در سیستم های واقعی وجود ندارد<sup>[۱۹]</sup> این امر حاکی از عملکرد موفق کنترل کننده تناسبی - مشتق گیر - انتگرال گیر در مقایسه با کنترل کننده مینا و ایده آل قلاب آسمانی است.

## ۶. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، به طراحی، ساخت و پیاده سازی یک سیستم نیمه فعال سازه ای از نوع میراگر هوشمند نانومغناطیسی توجه شده است. برای این منظور، یک میراگر نانومغناطیسی جدید با تمرکز ویژه بر میرایی پایه و پروفیل اریفس های دمپر طراحی و ساخته شد. همچنین، پارامترهای میراگر هوشمند با استفاده از نتایج آزمون بر پایه مدل بوک - ون شناسایی شدند. در ادامه، دو کنترل کننده ایده آل قلاب آسمانی و تناسبی - مشتق گیر - انتگرال گیر طراحی و بر روی میراگر پیاده سازی شدند. در خاتمه، عملکرد کنترل کننده های مذکور در یک آزمون میز لرزه مقایسه شدند. نتایج آزمون نشان می دهد که در اثر استفاده از کنترل کننده تناسبی - مشتق گیر - انتگرال گیر، شتاب انتقالی به طبقات و جابه جایی نسبی طبقات حدود ۳۰٪ کاهش می یابد، که این میزان کاهش با کاهش ناشی از استفاده از کنترل کننده قلاب آسمانی برابری می کند. با توجه به مقاوم بودن نسبی کنترل کننده حلقه بسته تناسبی - مشتق گیر - انتگرال گیر در برابر تغییر پارامترهای مدل و اغتشاش، این امر حاکی از موفقیت کنترل کننده تناسبی - مشتق گیر - انتگرال گیر و سیستم کنترل نیمه فعال پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده ایده آل قلاب آسمانی در کنترل ارتعاش های انتقالی به سازه های آزمایشگاهی مورد مطالعه است.

## پانویس ها

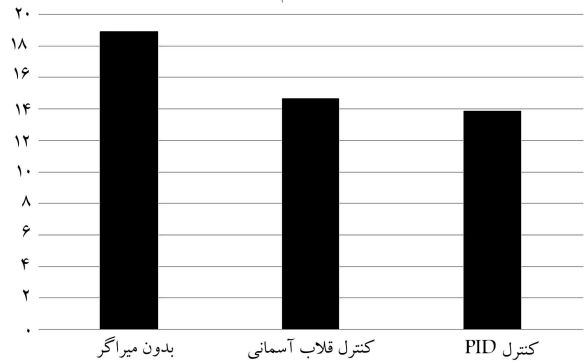
1. passive control
2. semi-active control
3. hybrid control
4. active control
5. base isolation
6. tuned mass damper
7. friction damper
8. added damping and stiffness damper
9. tuned liquid column damper
10. sensors
11. active mass damper
12. active tendons
13. magneto-rheological
14. Sutong
15. Russky
16. Bingham
17. base damping
18. ferromagnetic
19. rheological properties
20. Bouc-Wen model
21. on-off

22. proportional
23. integral
24. derivative

## منابع (References)

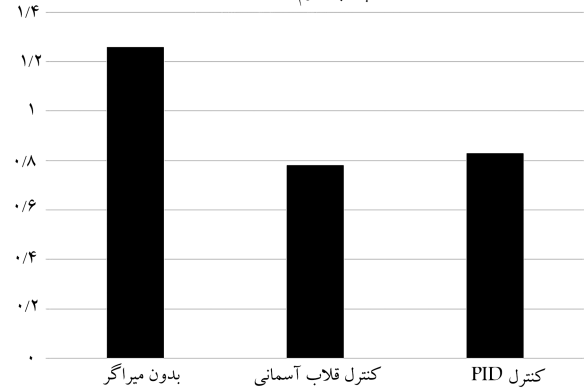
1. Casciati, F., Magonette, G. and Marazzi, F. "Technology of semiactive devices and applications in vibration mitigation", 1<sup>st</sup> ed., Wiley, England (Feb., 2006).
2. Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K. and et al. "Structural control: Past, present and future", *ASCE, J. Eng. Mech.*, **123**(9), pp. 897-971 (Jan., 1997).
3. Symans, M.D. and Constantinou, M.C. "Semi-active control systems for seismic protection of structures: A state-of-the-art review", *Eng. Struct.*, **21**(6), pp. 469-487 (1999).
4. Spencer Jr, B.F. and Nagarajaiah, S. "State of the art of structural control", **129**(7), pp. 845-856 (2003).
5. Spencer Jr, B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D. "Phenomenological model of a magnetorheological damper",

شکل ۱۸. مقایسه ی پاسخ جابه جایی طبقه دوم (mm)



شکل ۱۸. مقایسه ی پاسخ جابه جایی طبقه ی دوم سازه در حالت های مختلف.

شکل ۱۹. مقایسه ی پاسخ شتاب طبقه دوم (mm/s<sup>2</sup>)



شکل ۱۹. مقایسه ی پاسخ شتاب طبقه ی دوم سازه در حالت های مختلف.

ASCE, *Journal of Engineering Mechanics*, **15**, pp. 220-243 (1996).

6. Weber, F. and Distl, H. "Amplitude and frequency independent cable damping of sutong bridge and russky bridge by magnetorheological dampers", *Structural Control and Health Monitoring*, **22**(2), pp. 237-254 (2015).
7. J. Enriquez-Zarate, G. Silva-Navarro, and A. Cabrera-Amado A. "Semiactive vibration control in a three-story building-like structure using a magnetorheological damper", *Dynamics of Civil Structures*, 2, J. Caicedo and S. Pakzad, Eds., ed: Springer International Publishing, pp. 475-483 (2015).
8. Chen, J., Yuan, C., Li, J. and Xu, Q. "Semi-active fuzzy control of edgewise vibrations in wind turbine blades under extreme wind", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **147**, pp. 251-261 (2015).
9. Caterino, N. "Semi-active control of a wind turbine via magnetorheological dampers", *Journal of Sound and Vibration*, **345**, pp. 1-17 (2015).
10. F. Weber, S. Bhowmik, and J. Hogsberg "Extended neural network-based scheme for real-time force tracking with magnetorheological dampers", *Structural control and health monitoring*, **21**(2), pp. 225-247 (2014).
11. Uz, M.E. and Hadi, M.N.S. "Optimal design of semi active control for adjacent buildings connected by MR damper based on integrated fuzzy logic and multi-objective genetic algorithm", *Engineering Structures*, **69**, pp. 135-148 (2014).
12. Kong, L., Chin, J.-H., Li, Y., Lu, Y. and et al. "Targeted suppression of vibration in deep hole drilling using magneto-rheological fluid damper", *Journal of Materials Processing Technology*, **214**(11), pp. 2617-2626 (2014).
13. Heo, G., Kim, C. and Lee, C. "Experimental test of asymmetrical cable-stayed bridges using MR-damper for vibration control", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **57**, pp. 78-85 (2014).
14. Seong, M.S., Choi, S.B. and Sung, K.-G. "Control strategies for vehicle suspension system featuring magnetorheological (MR) damper", *Structural Control and Health Monitoring*, **6**, pp. 56-75 (2004).
15. Butz, T. and Stryk, O.V. "Modelling and simulation of electro- and magnetorheological fluid dampers", *ZAMM: Journal of Applied Mathematics and Mechanics: Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*, **82**(1), pp. 3-20 (Jan., 2002).
16. Dyke, S.J., Spencer, Jr, B.F., Sain, M.K. and et al. "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", *Smart Materials and Structures*, **5**(5), pp. 565-575 (1996).
17. Zhu, W.Q., Luo, M. and Dong, L. "Semi-active control of wind excited building structures using MR/ER dampers", *Probabilistic Engineering Mechanics*, **19**(3), pp. 279-285 (2004).
18. Ogata, K. and Yang, Y. "Modern control engineering", Pearson (1970).
19. Cha, Y.-J., Agrawal, A. K., Phillips, B.M. and et al. "Direct performance-based design with 200 kN MR dampers using multi-objective cost effective optimization for steel MRFs", *Engineering Structures*, **71**, pp. 60-72 (2014).