

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در این مطالعه استفاده از نیروی الکترومغناطیسی در میراگر اصطکاکی مورد توجه قرار گرفته است و یک میراگر اصطکاکی قابل کنترل معرفی شده است. در این میراگر از تغییرات جریان الکتریکی برای تغییر نیروی عمود بر سطوح لغزش صفحات اصطکاکی استفاده گشته است. در این روش با استفاده از آهنرباهای الکتریکی قدرتمند که انرژی الکتریکی اندکی نیاز دارند و با کنترل شدت جریان عبوری، عملکرد میراگر اصطکاکی تحت اختیار قرار می‌گیرد. به این منظور با در نظر گرفتن رفتار مغناطیسی مواد و با استفاده از مدل‌سازی کامپیوتری، علاوه بر صحت‌سنجی نتایج تحلیلی، رفتار این آهنربای الکتریکی به صورت پارامتریک مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آزمایش‌ها رفتار مناسب و کنترل‌پذیری این میراگر را تأیید نمود. برای تغییر نیروی عمود بر سطح آهنرباهای الکتریکی، با استفاده از مدارهای الکترونیکی جریان عبوری از آنها از صفر تا ۱/۵ آمپر تغییر کرد و حداکثر نیروی تولید شده میراگر به حدود ۱۲۰۰ نیوتن رسید. توان الکتریکی مورد نیاز برای ایجاد حداکثر ظرفیت نیرویی ۸/۵ وات اندازه‌گیری شد. همچنین زمان پاسخگویی مولدهای نیرو به تغییرات جریان، حداکثر ۵۶ میلی‌ثانیه برای رسیدن به حداکثر ظرفیت و ۶۸ میلی‌ثانیه برای بازنشانی نیروی میراگر اندازه‌گیری شد. نتایج مطالعات این پژوهش نشان داد این نوع مولد نیرو توانایی به کارگیری در جهت کنترل نیمه‌فعال سازه‌ای را داراست. نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی الکترومگنت‌ها نشان داد که حداکثر تنش عمود بر سطحی که این نوع مولد نیرو می‌تواند ایجاد کند در حدود ۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.

واژگان کلیدی: کنترل نیمه‌فعال، آهنربای الکتریکی، میراگر اصطکاکی، نیروی مغناطیسی.

طراحی و ساخت نوع جدیدی از میراگرهای اصطکاکی متغیر با محرک الکترومغناطیسی

محمد قاسم وتر

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

عباس ملک‌حسینی (نویسنده مسئول)

دانشجوی دکتری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، a.malekhosseini@iiees.ac.ir

۱- مقدمه

روی ابداع و گسترش روش‌ها و تجهیزات کنترل سازه‌ای متمرکز گذشته است. همچنین در سه دهه گذشته تلاش‌های زیادی برای تبدیل رویکردهای مفهومی کنترل سازه‌ای به تکنولوژی‌های قابل استفاده و عملی در سازه‌ها صورت گرفته است. این موضوع روشن شده است که کنترل سازه‌ای یکی از نکات مهم و کلیدی در طراحی سازه‌های جدید و راهکاری مناسب برای بهسازی سازه‌ها در مقابل بار باد و زلزله است. با این وجود تا به امروز اکثر برنامه‌ها و استراتژی‌های موجود به استفاده از میراگر جرمی منفعل یا جداسازی ارتعاشات از پایه منجر شده است. در طی سالیان

ارتعاشات سازه‌ای که به وسیله زلزله یا باد یا دیگر عوامل ایجاد می‌گردد توسط روش‌های مختلفی قابل کنترل است. رویکرد مفهومی کنترل سازه‌ای شامل تغییرات در سختی اعضا، جرم سازه‌ای و میرایی برای مقابله با نیروها به صورت منفعل، نیمه‌فعال و فعال است. تا به امروز تعدادی از این روش‌های کنترل سازه‌ای با موفقیت استفاده شده‌اند و محققان در حال ارتقای روش‌هایی هستند تا امکان استفاده و دامنه کاربرد آنها را با بهبود عملکرد، افزایش دهند. در سال‌های اخیر به طور قابل ملاحظه‌ای تحقیقات محققین بر

گذشته تجهیزات مختلف کنترلی و الگوریتم‌های متعددی پیشنهاد شده است که هر کدام از آنها با توجه به عملکرد مورد نیاز و بخش مورد استفاده مزایای خود را دارا هستند.

سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال نمونه‌ای مجزا و در حال ظهور و با شباهت به سیستم‌های کنترلی فعال هستند. در این سیستم کنترلی انرژی خارجی مورد نیاز در مقایسه با انرژی که از سازه تحت کنترل قرار می‌گیرد بسیار کمتر است. اساساً سیستم کنترل نیمه‌فعال انرژی خارجی به سیستم سازه‌ای وارد نمی‌کند بنابراین باند خروجی پاسخ لرزه‌ای سازه به صورت تضمین شده‌ای مشخص می‌باشد [۱].

نیروی مقاوم یا تلف‌کننده انرژی به وسیله مکانیسم داخلی اعضای سیستم بر اساس بازخورد حسگرهای خارجی یا داخلی تعیین می‌گردد؛ بنابراین این سیستم مزایای سیستم‌های کنترلی منفعل و فعال را با یکدیگر ترکیب کرده است. مطالعات به صورت مشخصی نشان داده است که استفاده از تجهیزات و سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال، به طور قابل ملاحظه‌ای بهتر از سیستم‌های کنترلی منفعل در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها مؤثر بوده است و این سیستم توانایی و پتانسیل این را دارد که هم‌رده و یا حتی بهتر از سیستم‌های کنترلی فعال عمل کند [۲]. در ادامه به تعدادی از این روش‌ها اشاره شده است.

یکی از ایده‌های مؤثر برای کنترل نیمه‌فعال سازه‌ها استفاده از سیالات حساس به میدان مغناطیسی^۱ است. این سیالات موادی هستند که خصوصیات فیزیکی آنها حساس به میدان مغناطیسی عبوری از آنهاست. ذرات میکروسکوپی آهن یا دیگر مواد فرومغناطیس در درون سیال روغنی نفتی یا معدنی شناورند. هنگامی که این سیالات در درون میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند با توجه به شدت میدان ویسکوزیته آنها تغییر کرده و از فاز مایع به شبه جامد تغییر فرم می‌دهند. رابینو [۳] در سال ۱۹۴۸ اولین شخصی بود که از این ایده استفاده کرد و در ساخت کلاج هوشمند از آن استفاده نمود. بعدها استفاده از این نوع میراگر در کنترل سازه‌ها نیز مورد توجه فراوانی قرار گرفته است. به طور مثال نمونه بزرگ مقیاسی از این نوع میراگر توسط یانگ و همکاران [۴] به

ظرفیت ۲۰۰ کیلو نیوتون برای کنترل نیمه‌فعال سازه ساخته شد. اساس عملکرد میراگرهای ویسکوز با روزه متغیر^۲ عبور سیال از روزه کوچک موجود در محفظه میراگر است و هر چه روزه عبوری سیال کوچک‌تر باشد انرژی بیشتری برای عبور آن مورد نیاز خواهد بود. در صورتی که بتوان مساحت روزه را تغییر داد می‌توان مشخصات مکانیکی میراگر را عوض کرد. کاواشیما و همکاران [۵] و فنگ و شینوزوکا [۶] اولین کسانی بودند که با استفاده از تغییر قطر روزه عبوری سیال این نوع میراگر را معرفی نمودند و نشان دادند که پاسخ لرزه‌ای شتاب و جابه‌جایی سازه با این سیستم در مقابل استفاده از میراگر ویسکوز عادی حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. پس از آنها پتن [۷] در سال ۱۹۹۸ اولین کسی بود که در مقیاس واقعی این نوع میراگر را در پل واقع بر بزرگراه استفاده نمود و نشان داد که حداکثر تنش به وجود آمده در پل با وجود این میراگر حدود ۵۰ درصد کاهش و عمر مفید سازه ۵۰ سال افزایش خواهد یافت.

از دیگر تجهیزاتی که برای کنترل سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفت، استفاده از ویژگی غیر معمولی مواد پیزوالکتریک^۳ است که برخی سرامیک‌ها از خود بروز می‌دهند. با اعمال نیروی خارجی، دوقطبی‌های این سرامیک‌ها تحریک می‌شوند و میدان الکتریکی ایجاد می‌کنند. این خاصیت باعث تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی می‌شود. کرنش‌هایی که به علت اختلاف پتانسیل در این مواد به وجود می‌آید حداکثر به ۰/۱ درصد محدود می‌شود که تحت اثر بار این مقدار کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کند. به همین دلیل با استفاده از اهرم‌بندی تغییر شکل یا نیروی به وجود آمده را افزایش داده و از محرک‌های تقویت‌شده پیزوالکتریک استفاده می‌کنند. گائول و همکاران [۸]، گائول و بکر [۹] و پارادووارلا و همکاران [۱۰] از جمله محققینی هستند که از محرک‌های پیزوالکتریک در کنترل سازه‌ها بهره جستند.

میراگر جرمی تنظیم‌شده^۴ ابزاری است که شامل جرم، فنر و میراگر می‌باشد و برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه از آن استفاده می‌گردد. فرکانس نوسانی این نوع میراگر طوری تنظیم می‌شود که با فرکانس اصلی سازه یکی شود. با این کار هنگامی که سازه

از دیگر ایده‌هایی که مورد توجه محققین قرار گرفته است استفاده از جریان‌های گردابی^۶ و نیروهای الکترومگنتیک به وجود آمده است. اساس کار این نوع میراگرها بر استفاده از قانون فارادی استوار می‌باشد. بر این اساس هرگاه شار مغناطیسی گذرنده از یک رسانا تغییر کند جریان‌های الکتریکی و نیروهای متقابل الکترومگنتیک بین آنها به وجود می‌آید. این امر با ایجاد نیروهای متقابل در رسانا و منبع میدان مغناطیسی همراه خواهد بود. چنگ و اوه [۱۶] با استفاده از این ایده میراگر نیمه‌فعال با استفاده از تغییر جریان سیم‌لوله درون میدان مغناطیسی ابداع کردند. این سیم‌پیچ در داخل میدان مغناطیسی حاصل از آهنربای نئودیمیومی قرار داشت و به انتهای تیر کنسول متصل شده بود و تغییر جریان سیم‌لوله باعث تغییر شار مغناطیسی و ایجاد نیروهای رانشی-رپایشی می‌شد. همچنین در صورتی که تیر کنسول نوسان کند حرکت سیم‌لوله باعث القای جریان الکتریکی درون سیم‌لوله و تولید نیروی مخالف می‌شود. بدین صورت این چیدمان می‌تواند هم به صورت مولد نیرو با استفاده جریان الکتریکی به صورت فعال و هم به صورت مولد جریان و میرایی به صورت منفعل و نیمه‌فعال عمل کند. زو و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۱ با استفاده از اصلاح چیدمان صفحات رسانا و آهنرباها توانستند عملکرد این نوع میراگر را ۳ تا ۵ برابر بهبود دهند.

از دیگر ایده‌های مطرح شده دیگر در این زمینه ایده آگراوال و یانگ [۱۸] است. آنها پیشنهاد دادند با استفاده از اثر الکترومغناطیسی می‌توان نیروی عمودی بین صفحات اصطکاکی مورد لغزش را کنترل کرد. این نوع میراگر از دو صفحه فولادی که بین آنها لایه‌ای از ماده پوششی اصطکاکی قرار دارد، ساخته شده است. تمامی این سه قسمت درون میدان مغناطیسی حاصل از سیم‌لوله‌های پوششی قرار دارند. نتایج مدل‌سازی‌های عددی انجام گرفته با رکوردهای مختلف حوزه نزدیک نشان داد که این نوع میراگر توانایی کاهش قابل توجه پاسخ جابه‌جایی سازه‌های جداسازی شده از پایه را دارا می‌باشد. پس از این پیشنهاد در سال ۲۰۱۷ نیز امجدیان و آگراوال [۱۹] به ارائه جزئیات بیشتر از عملکرد این نوع میراگر پرداختند. برای اعمال نیروی عمود بر

اصلی شروع به نوسان می‌کند، جرم متصل شده با اختلاف فاز شروع به نوسان می‌کند و از آنجایی که این میراگر به سازه اصلی متصل است نیروی وارده به سازه اصلی باعث کاهش پاسخ نوسانی سازه اصلی می‌گردد. جرم نسبتاً زیاد و پهنای باند عملکردی اندک و حساسیت نسبت به فرکانس عملکرد باعث شد تا محققان علاوه بر استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه به استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده به صورت فعال و نیمه‌فعال بپردازند. هروات و همکاران [۱۱] در سال ۱۹۸۳ با استفاده از میراگر سیال لزج با روزه متغیر به تغییر میرایی این سیستم پرداخت و برای کاهش ارتعاشات ناشی از باد از آن استفاده نمود و نشان داد که میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال می‌تواند همانند نمونه فعال آن به کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه کمک کند. همچنین ناگراجایا [۱۲] و واراواراجان و ناگراجایا [۱۳] با استفاده از مکانیسم ابداعی خود و تغییر سختی، میراگر جرمی تنظیم شده با سختی متغیر را ساخت. مکانیسم پیشنهادی توانایی تنظیم سختی خود به صورت تمام‌وقت را داراست. او نشان داد که استفاده از این مکانیسم برای تغییر سختی میراگر جرمی تنظیم شده علاوه بر اینکه می‌تواند همانند نوع فعال این نوع میراگر مفید باشد، به توان بسیار اندکی برای عملکرد نیاز دارد.

از دیگر ایده‌های مطرح شده برای تغییر مشخصات سازه استفاده از جک‌های قدرتمند هیدرولیکی برای تغییر نیروی لغزش مابین صفحات اصطکاکی است. در این روش با اعمال نیروی عمودی به وسیله جک‌های قدرتمند سختی و مقاومت میراگر با کنترل فشار هیدرولیکی تغییر می‌یابد. انرژی مورد نیاز این میراگر توسط جمع‌کننده‌های هیدرولیکی^۵ فشار بالا تأمین می‌گردد تا کارکرد میراگر هنگام زلزله میسر گردد. کانان و همکاران [۱۴] در سال ۱۹۹۵ از این مکانیسم استفاده کردند و دستگاه کنترل لغزش مهاربند را طراحی نمودند. همچنین فنک و همکاران [۱۵] در سال ۱۹۹۳ از فشار هیدرولیکی در ساخت سیستم جداساز پایه قابل کنترل اصطکاکی استفاده نمودند و نشان دادند که جابه‌جایی باقیمانده نهایی و حداکثر و شتاب بیشینه آن با استفاده از این روش بهبود پیدا می‌کند.

الکتریکی یک مدار بسته بین خطوط فرضی میدان مغناطیسی ایجاد می‌گردد. به دلیل مقاومت اندک هسته در مقابل عبور میدان‌های مغناطیسی در مقابل هوا، تراکم شار گذرنده از هسته بسیار بالاتر از سایر قسمت‌ها می‌باشد. (B: شار مغناطیسی گذرنده از هسته، BF: شار مغناطیسی گریزنده، BL: شار مغناطیسی نشتی). هنگامی که فاصله هوایی موجود اندک باشد تقریباً تمامی شار گذرنده از هسته عبور می‌نماید.

با توجه به پیکره‌بندی مولد نیروی الکترومغناطیسی و صفحه متحرک زیرین مطابق شکل (۲) و مدار الکتریکی معادل آنها مطابق شکل (۳)، با در نظر گرفتن این مطلب که قطب‌های الکترومگنت و صفحه متحرک دارای پتانسیل مغناطیسی برابر در صفحات متقابل به هم هستند، نیروی جاذبه‌ای که بین فاصله هوایی میان الکترومگنت و صفحه متحرک به وجود می‌آید (F_{magnet}) برابر است با [۲۰]:

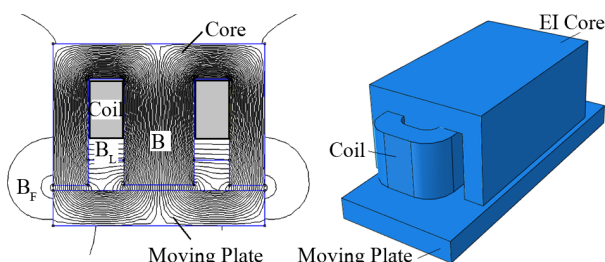
$$F_{magnet} \text{ (Newtons)} = \sum F_{airgap} = H_{airgap} \cdot \Phi_{airgap} \quad (1)$$

$$H_{airgap} \text{ (ampers / meter)} = \frac{M_{airgap}}{g} \quad (2)$$

$$\Phi_{airgap} \text{ (webers)} = \frac{M_{airgap}}{R_{airgap}} \quad (3)$$

که در رابطه بالا H_{airgap} نیروی محرک مغناطیسی در راستای فاصله هوایی، M_{airgap} نیروی محرک مغناطیسی فاصله هوایی، R_{airgap} مقاومت مغناطیسی فاصله هوایی، Φ_{airgap} شار مغناطیسی عبوری از فاصله هوایی و g مجموع فاصله‌های هوایی می‌باشد. با جایگذاری رابطه (۲) و رابطه (۳) در رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$F_{magnet} \text{ (newtons)} = \frac{M_{airgap}^2}{g \cdot R_{airgap}} \quad (4)$$



شکل (الف) نمایی از محرک نیرو و صفحه متحرک زیرین (ب) میدان مغناطیسی ایجاد شده در مقطع هسته

شکل (۱): میدان مغناطیسی به وجود آمده در هسته فلزی الکترومگنت.

سطح میراگر اصطکاکی آنها از سیم‌لوله‌های حامل جریان با هسته‌ای از جنس هوا استفاده کردند که به وسیله ماده پوششی اصطکاکی از صفحه لغزنده جدا شده بود. مطالعات تحلیلی و عددی انجام گرفته توسط این پژوهشگران نشان داد که نیروی عمودی تولیدی این نوع میراگر با ابعاد بیان شده بین ۹ تا ۳۲۹ نیوتون برای جریان‌های عبوری ۱ تا ۶ آمپر می‌باشد.

۲- معرفی عملکرد

روش‌های زیادی برای کنترل ارتعاشات سازه‌هایی که تحت حرکت لرزه‌ای زمین، اثر تندبادها و... قرار دارند وجود دارد که استفاده از میراگرهای اصطکاکی یکی از آنهاست. میراگر اصطکاکی بر پایه استهلاك انرژی به وسیله لغزش بین صفحات عمل می‌کند. این میراگرها به علت هزینه پایین و کارایی مناسب در دسته سیستم‌های کنترلی منفعل جایگاه خوبی دارند. چنانچه بتوان با روشی نیروی عمود بر سطح صفحات لغزشی را کنترل نمود، می‌توان نیروی میراگر و استهلاك انرژی آن را تعیین کرد و میراگر اصطکاکی منفعل را به یک میراگر نیمه‌فعال تبدیل نمود. در میراگر اصطکاکی متغیر معرفی شده تغییرات نیروی عمود بر سطح صفحات به وسیله الکترومگنت‌های تعبیه شده در آن صورت می‌گیرد. الکترومگنت استفاده شده در این نوع میراگر به صورت محرک تولیدکننده نیرو عمل می‌کند. عبور جریان الکتریکی از سیم‌لوله‌های آن باعث به وجود آمدن شار مغناطیسی می‌گردد که از هسته فلزی و فاصله اندک هوایی بین آنها عبور می‌کند. عملکرد متقابل بین صفحه متحرک الکترومگنت و شار عبوری از آن، باعث به وجود آمدن نیروی جاذبه بین دو قسمت آن می‌شود. در صورتی که میزان جریان عبوری از الکترومگنت‌ها را تغییر دهیم می‌توانیم نیروی لغزشی بین صفحات را کنترل کنیم.

۳- مبانی نظری سیستم

۳-۱- رفتار ماندگار الکترومگنت

مطابق با شکل (۱) در صورتی که بین سیم‌لوله حامل جریان، یک هسته فلزی (به صورت E و I) قرار گیرد همانند مدارهای

می‌باشد. با این فرض $R_{core}=0$ خواهد شد. این فرض از آنجا ناشی می‌شود که جنس هسته الکترومگنت معمولاً از فولاد سیلیکونی است و برای این نوع فولاد خواهیم داشت [۲۱]:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 100 \approx 2000 \quad (5)$$

در رابطه (۵) μ_0 ثابت تراوایی مغناطیسی خلأ و μ ثابت تراوایی فولاد سیلیکونی می‌باشد. هنگامی که رابطه (۶) و رابطه (۹) را در رابطه (۴) جایگذاری کنیم نیروی محرک مغناطیسی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$R_{airgap} \text{ (ampers / meters)} = \frac{g}{\mu_0 \cdot A_{pole}} \quad (6)$$

$$M_{coil} = NI = B \left(\frac{L}{\mu} + \frac{g}{\mu_0} \right) \approx B \left(\frac{g}{\mu_0} \right) \quad (7)$$

$$B = \frac{NI\mu_0}{g} \quad (8)$$

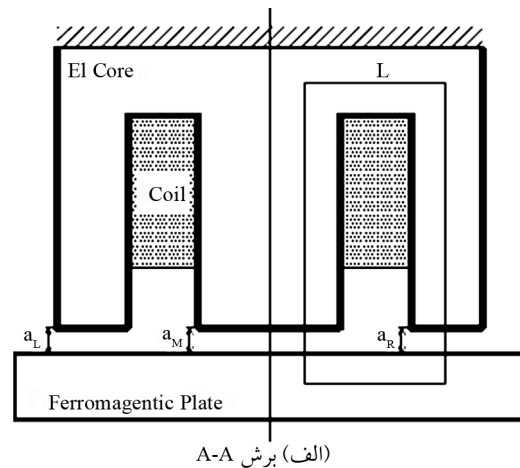
$$M_{airgap} = \frac{R_{airgap}}{R_{airgap} + R_{magnet}} M_{coil} \approx M_{coil} \quad (9)$$

$$F_{magnet} \text{ (newtons)} = \frac{\mu_0 \cdot (NI)^2 \cdot A_{pole}}{2 \cdot g^2} = \frac{B^2 \cdot A_{pole}}{2\mu_0} \quad (10)$$

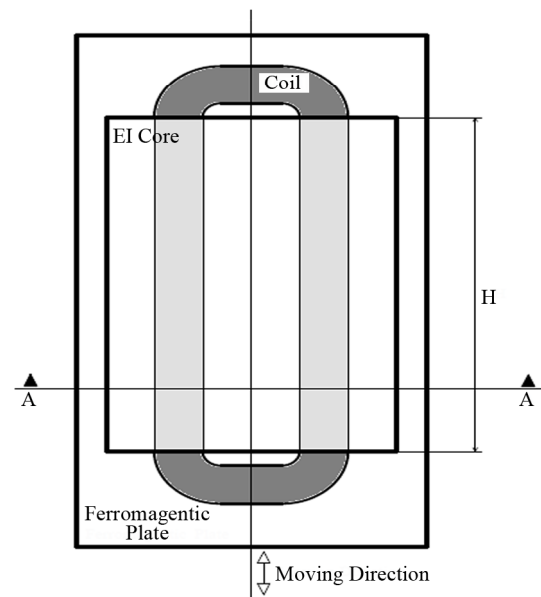
که در آنها L مجموع طول مسیر عبور میدان مغناطیسی در هسته و فاصله هوایی، N تعداد دور سیم‌لوله حول هسته فلزی، I شدت جریان عبوری، B چگالی شار مغناطیسی و A_{pole} مساحت قطب‌های الکترومگنت می‌باشد.

رابطه بالا نشان می‌دهد که نیروی محرک مغناطیسی بین الکترومگنت و صفحه متحرک زیرین به صورت تابع غیرخطی از تعداد دور سیم‌لوله، شدت جریان عبوری از سیم‌لوله، مساحت و فاصله هوایی بین قطب‌های الکترومگنت و صفحه متحرک است.

همان‌طور که مشخص است شدت میدان مغناطیسی تأثیر قابل توجهی در نیروی تولیدی محرک دارد. رابطه (۱۰) در شرایطی صادق است که میدان مغناطیسی به وجود آمده در هسته و فاصله هوایی بتواند به صورت کنترل شده تا هر مقداری افزایش پیدا کند. این اتفاق برای مواد فرومغناطیسی که در هسته استفاده می‌شوند، صادق نیست. در مواد فرومغناطیس بر خلاف مواد پارامغناطیس و

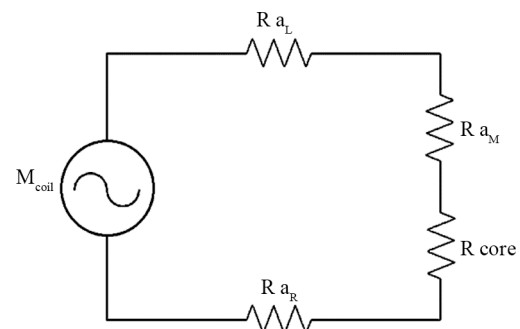


(الف) برش A-A



(ب) پلان

شکل (۲): بیکره‌بندی مولد نیروی الکترومغناطیسی و صفحه متحرک زیرین.



شکل (۳): مدار الکتریکی معادل میدان مغناطیسی در الکترومگنت.

برای محاسبه نیروی بین الکترومگنت و صفحه متحرک فرض می‌شود که مسیر عبور شار از هسته فلزی و صفحه متحرک زیرین دارای مقاومت مغناطیسی صفر (یعنی تراوایی مغناطیسی بی‌نهایت)

۲-۳- رفتار دینامیکی الکترومگنت

در صورتی که ولتاژ به سیم‌لوله به صورت پله‌ای اعمال گردد، جریان سیم‌لوله به صورت زیر تغییر می‌کند [۲۰]:

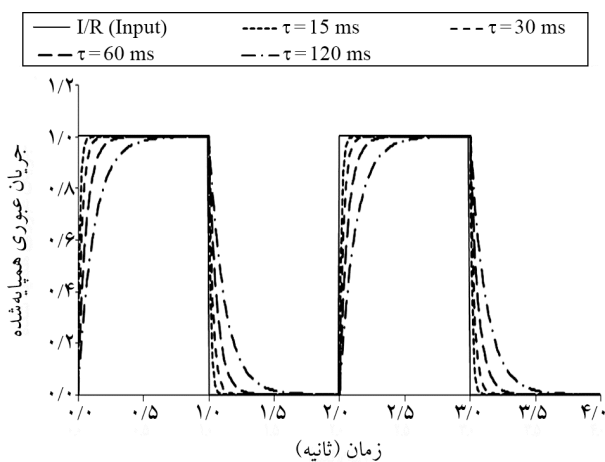
$$I = \frac{V}{R_{\text{coil}}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{coil}}}} \right) \quad (14)$$

که در آن V ولتاژ اعمالی، R_{coil} مقاومت الکتریکی سیم‌لوله و T_{coil} ثابت زمانی الکترومگنت می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_{\text{coil}} (s) = \frac{L_{\text{coil}}}{R_{\text{coil}}} \quad (15)$$

$$L_{\text{coil}} = \frac{1}{R_{\text{airgap}} + R_{\text{magnet}}} N^2 \approx \frac{1}{R_{\text{airgap}}} N^2 = \frac{\mu_0 N^2 A_{\text{pole}}}{g} \quad (16)$$

که در رابطه بالا L_{coil} ضریب خودالقایی الکترومگنت می‌باشد. روابط بالا نشان می‌دهد که جریان واقعی که سیم‌لوله الکترومگنت تجربه می‌کند به صورت مستقیم با ولتاژ اعمالی به آن رابطه دارد. ثابت زمانی که از روابط بالا به دست می‌آید بیان می‌کند که افزایش شار مغناطیسی و نیروی الکترومگنت با چه نرخ افزایش پیدا می‌کند. در صورتی که شدت جریان عبوری (که متناظر نیروی تولیدی الکترومگنت است) را در پاسخ به ولتاژ پله‌ای اعمالی است را ترسیم نماییم منحنی شکل (۵) حاصل می‌گردد. همان‌طور که مشخص است هرچه ثابت زمانی الکترومگنت کمتر باشد، جریان عبوری و متناظر آن نیروی به وجود آمده بین هسته و صفحه متحرک سریع‌تر به میزان حداکثر خود می‌رسد.

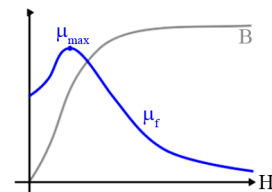


شکل (۵): منحنی تغییرات جریان به ولتاژ پله‌ای وارده.

دیامغناطیس افزایش شدت میدان مغناطیسی به صورت خطی باعث افزایش چگالی شار مغناطیسی نمی‌گردد. این دو پارامتر مطابق رابطه زیر به یکدیگر وابسته هستند [۲۰]:

$$B = \mu \times H \quad (11)$$

که در آن، H شدت میدان مغناطیسی می‌باشد. مطابق شکل (۴) در مواد فرومغناطیس ثابت تراوایی رابطه خطی با شدت میدان مغناطیسی ندارد. در نتیجه با افزایش شدت میدان مغناطیسی چگالی شار مغناطیسی به دلیل پدیده اشباع مغناطیسی در این مواد نمی‌تواند از مقدار مشخصی فراتر رود.



شکل (۴): منحنی مغناطیس‌شوندگی مواد فرومغناطیس و تراوایی مغناطیسی معادل.

با توجه به این نکته که جنس هسته مرکزی الکترومگنت معمولاً از فولاد سیلیکونی است، چگالی مغناطیسی حد اشباع هسته بین ۱/۶ تا ۲/۲ تسلا می‌باشد [۲۲]. چنانچه رابطه (۱۰) را که بیانگر میزان نیروی جاذبه بین الکترومگنت و صفحه متحرک آن بود را بر مساحت مشترک بین هسته و صفحه متحرک تقسیم کنیم، فشار مغناطیسی حاصل از نیروی الکترومگنت P_B به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P_B (Pa) = \frac{F_{\text{magnet}}}{A} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (12)$$

چنانچه چگالی مغناطیسی حد اشباع هسته را ۱/۶ تسلا در نظر بگیریم، خواهیم داشت:

$$P_B (Pa) = \frac{1.6^2}{2(4\pi \times 10^{-7})} = 1000 \text{KPa} \approx 10 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right) \quad (13)$$

رابطه (۱۳) بیان می‌کند که در صورت اشباع مغناطیسی هسته الکترومگنت تنش عمودی در حدود ۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در هسته و بین هسته الکترومگنت و صفحه متحرک به وجود می‌آید.

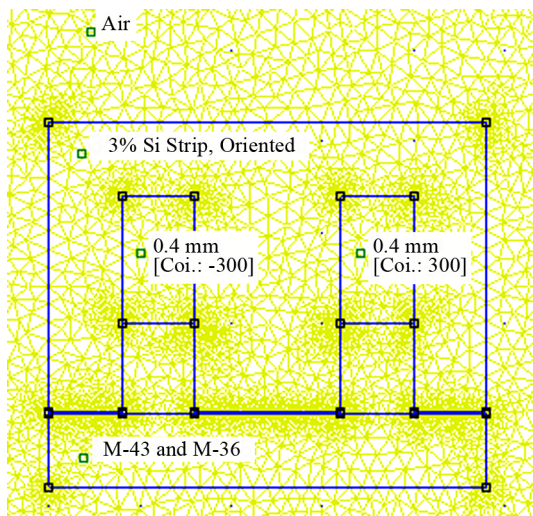
۴- تحلیل عددی رفتار الکترومگنت‌ها

برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات تحلیلی، از نرم‌افزار اجزای محدود FEMM استفاده شده است. از توانایی‌های این نرم‌افزار این است که توانایی حل هم‌زمان معادلات ماکسول که مربوط به پدیده‌های الکترومغناطیسی است را داراست. این نرم‌افزار یک برنامه متن‌باز برای حل مسائل فرکانس پایین الکترومغناطیسی است که توانایی مدل‌سازی و حل انواع مسائل دو بعدی و متقارن شعاعی را داراست. برنامه حاضر توانایی حل مسائل خطی و غیرخطی حوزه مغناطیس، مسائل خطی و غیرخطی هارمونیک در حوزه زمان، مسائل خطی الکترواستاتیک و مسائل حالت ماندگار سیلان گرمایی را داراست [۲۳]. همان‌طور که مشخص شد رفتار دینامیکی و نیروی ماندگار تولید شده توسط الکترومگنت به عوامل متعددی از جمله رفتار مصالح هسته در مقابل میدان مغناطیسی، مساحت قطبین الکترومگنت، تعداد دور سیم‌لوله مورد استفاده، حداکثر جریان عبوری از سیم‌لوله، فاصله هوایی بین هسته و صفحه متحرک و مقاومت الکتریکی سیم‌لوله وابسته است. از میان پارامترهای بیان شده تأثیر تعداد دور سیم‌لوله مورد استفاده، جریان عبوری از آن و فاصله هوایی بین هسته و صفحه متحرک بیش از سایر پارامترها می‌باشد. به همین دلیل در مدل‌سازی صورت گرفته تأثیر این پارامترها بر رفتار دینامیکی و نیروی ماندگار الکترومگنت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۶) منحنی B-H فولادهای مصرفی در هسته و صفحه متحرک آورده شده است.

خلاصه مشخصات اولیه الکترومگنت مورد بررسی در جدول (۱) آورده شده است. همچنین نحوه مش‌بندی و قرار گرفتن یکی از مدل‌های مورد مطالعه به همراه شرایط مرزی در شکل (۷) به نمایش درآمده است.

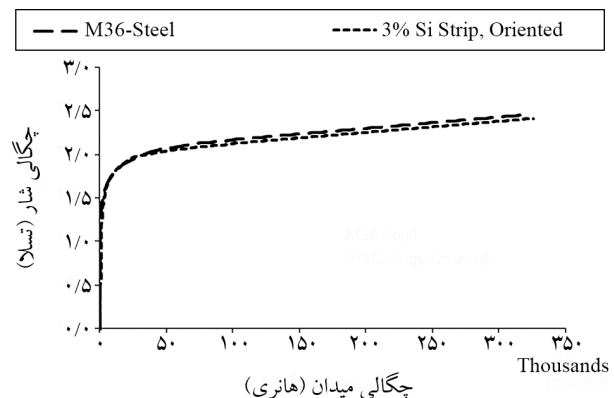
جدول (۱): مشخصات مدل پیشنهادی الکترومگنت.

B (mm)	L (mm)	A _{poles} (cm ²)	μ_0	$\mu_r(\text{Air})$	$\mu_r(\text{Steel core})$
۴۸	۶۲/۵	۲۰	$4\pi \times 10^{-7}$	۱	۱۰۰۰

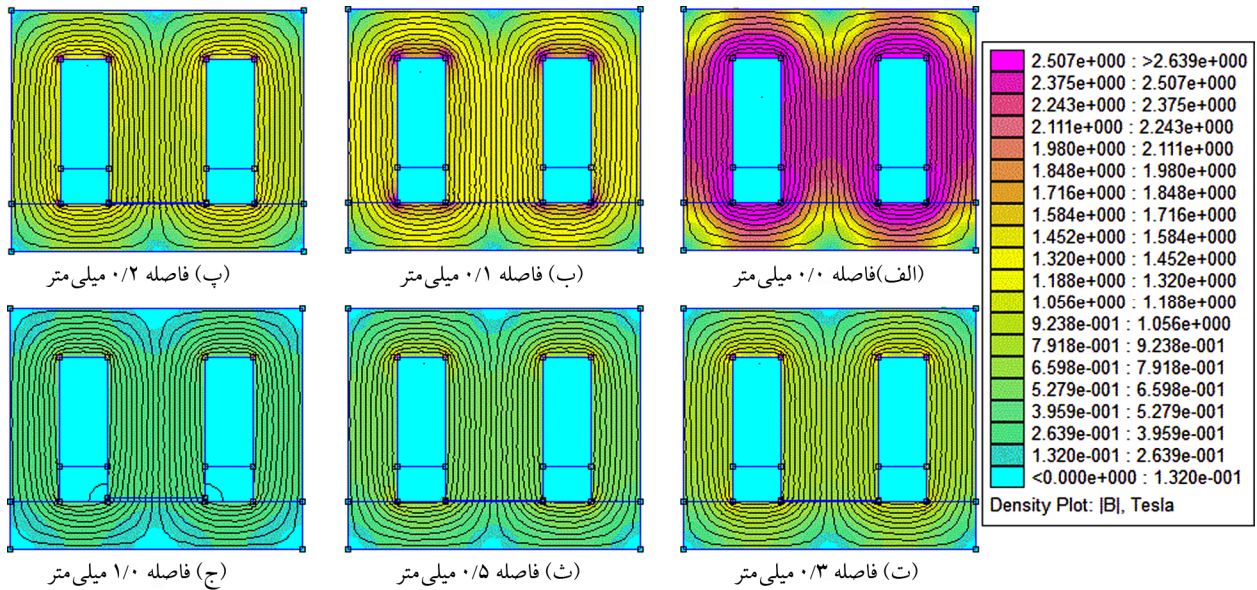


شکل (۷): نحوه مش‌بندی و شرایط مرزی نمونه‌های مورد بررسی.

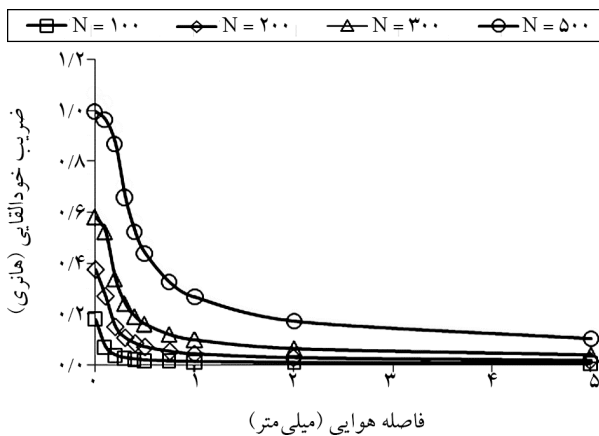
پس از مدل‌سازی عددی، با در نظر گرفتن فاصله هوایی متغیر بین الکترومگنت و صفحه متحرک، کانتورهای شدت شار مغناطیسی عبوری مطابق شکل (۸) حاصل شده است. همان‌طور که مشخص است فاصله هوایی بین هسته و صفحه متحرک تأثیر بسزایی در چگالی شار گذرنده از هسته دارد و با افزایش اندک فاصله هوایی به علت مقاومت مغناطیسی بالای هوا نسبت به مصالح هسته، چگالی شار گذرنده به‌سرعت افت پیدا می‌کند. همچنین در شکل (۹) چگالی شار گذرنده از الکترومگنت در طول مرز بین مصالح هسته و صفحه متحرک به نمایش درآمده است و تأثیر فاصله هوایی به‌خوبی مشخص می‌باشد. همان‌طور که قبلاً بیان شد چگالی شار مغناطیسی گذرنده از هسته به‌صورت توان دوم با نیروی ایجاد شده بین هسته و صفحه متحرک دارد.



شکل (۶): منحنی B-H با در نظر گرفتن اثر اشباع برای مواد مورد استفاده در ساخت الکترومگنت‌ها [۲۲].



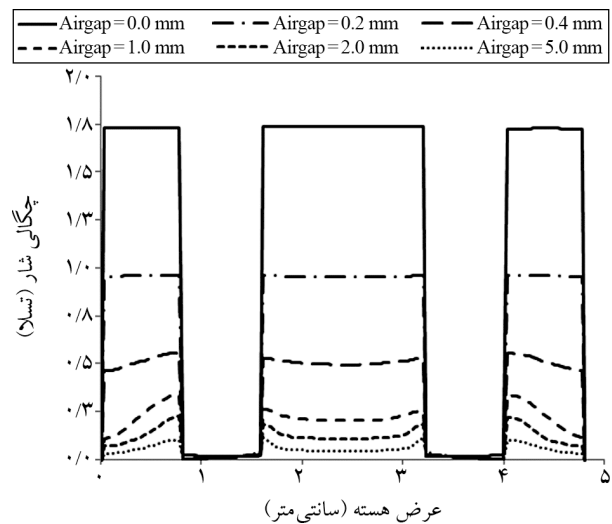
شکل (۸): چگالی شار مغناطیسی و خطوط میدان مغناطیسی در فواصل مختلف هوایی.



شکل (۱۰): ضریب خود القایی الکترومگنت در تعداد دور مختلف سیم‌لوله.

کاهش و در نتیجه سرعت پاسخ‌گویی الکترومگنت افزایش می‌یابد. در صورتی که مقاومت الکتریکی سیم‌لوله را مقدار ثابت $R=6\Omega$ فرض کنیم، ثابت زمانی الکترومگنت مطابق منحنی شکل (۱۱) به دست می‌آید.

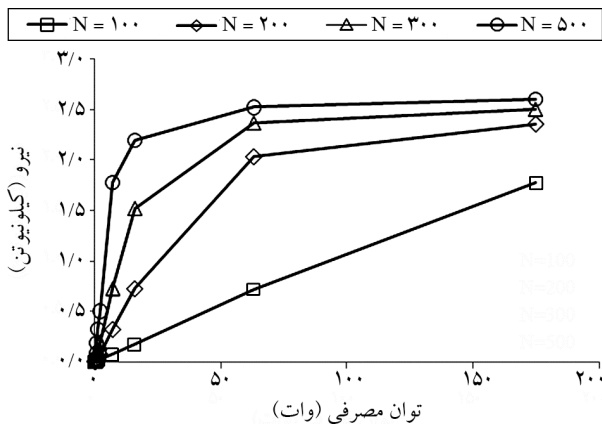
همچنین در منحنی شکل (۱۲) نیروی جاذبه بین هسته و صفحه متحرک الکترومگنت با تغییرات فاصله هوایی و تعداد دور سیم‌لوله هسته آورده شده است. همان‌طور که واضح است هرچه تعداد دور سیم‌لوله بیشتر باشد به دلیل اینکه نیروی جاذبه بین صفحه متحرک و هسته الکترومگنت با مربع حاصل ضرب تعداد دور سیم‌لوله و شدت جریان عبوری $(N.I)^2$ رابطه دارد،



شکل (۹): چگالی شار مغناطیسی با در نظر گرفتن اثر اشباع مواد.

در منحنی شکل (۱۰) ضریب خودالقایی الکترومگنت در تعداد دور مختلف سیم‌لوله و فاصله هوایی مختلف آورده شده است. همان‌طور که مشخص است کاهش فاصله هوایی باعث افزایش توانی ضریب خودالقایی گشته است. اما در نواحی با نزدیک صفر به دلیل پدیده اشباع هسته، سیر افزایشی آن متوقف گشته و تقریباً ثابت می‌گردد.

همان‌طور که قبلاً بیان شد ثابت زمانی الکترومگنت τ با نسبت ضریب خودالقایی به مقاومت الکتریکی سیم‌لوله (L/R) بستگی دارد و هرچه ضریب خودالقایی کمتر باشد ثابت زمانی



شکل (۱۳): میزان نیروی عمودی ایجاد شده توسط الکترومگنت با توجه به توان الکتریکی مورد نیاز در فاصله هوایی ۰/۲ میلی‌متر.

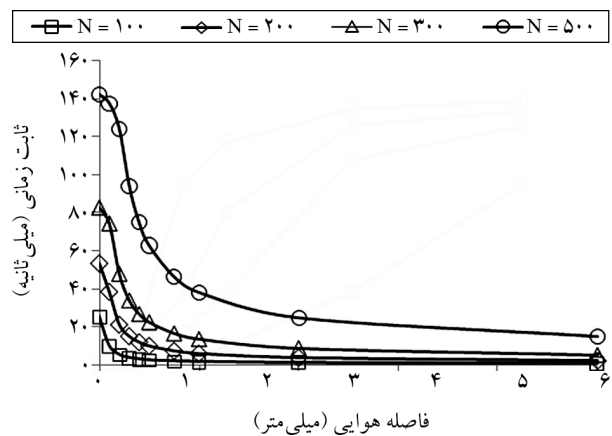
در طراحی این الکترومگنت‌ها موارد مختلفی را باید در نظر گرفت. اولین مسئله انتخاب هندسه مناسب آنهاست. با توجه به شکل هسته‌های رایج EI، هندسه مستطیلی و بسته بودن کامل مدار مغناطیسی، در این میراگر از این نوع هسته استفاده شده است. مسئله بعدی حداکثر نیروی تولیدی قابل انتظار الکترومگنت‌هاست. همان‌طور که به آن اشاره شد حداکثر تنش تولیدی آنها بسته به شدت میدان مغناطیسی برابر ۱۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. پس برای رسیدن به نیروی عمود بر سطح هدف ۲۰۰ کیلوگرم برای هر الکترومگنت به مساحتی حدود ۲۰ سانتی‌متر مربع نیاز است. مورد دیگری که باید در طراحی بهینه در نظر گرفت یکنواختی مسیر عبور شار مغناطیسی از درون هسته می‌باشد. این مسئله به معنی برابر بودن مجموع فواصل C و B با فاصله F در شکل (۱۴) که شماتیکی از هسته‌های EI است، می‌باشد. در جدول (۲) پارامترهای ابعادی هسته EI انتخاب شده آورده شده است.

از آنجا که الکترومگنت‌های میراگر به صورت تمام‌وقت توسط مدار کنترلی تحت تغییرات جریان ورودی هستند و شار مغناطیسی مدام در حال تغییر است، توجه به جریان‌های گردابی

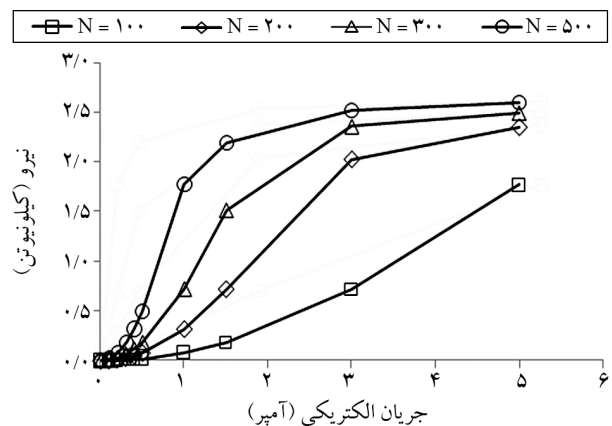
جدول (۲): مشخصات هندسی هسته الکترومگنت‌ها.

پارامتر	A=J	I	G	F	B,C	D,E	H,K
ابعاد (میلی‌متر)	۴۸	۲۴	۳۲	۱۶	۸	۸	۸

نیروی الکترومگنت افزایش می‌یابد و در شدت جریان ثابت هرچه تعداد دور سیم‌لوله افزایش پیدا کند، نیروی جاذبه الکترومگنت بیشتر می‌شود و در جریان کمتری هسته به محدوده اشباع مغناطیسی می‌رسد و به نیروی آستانه خود نزدیک می‌شود. همچنین مطابق شکل (۱۳) که بیانگر میزان نیروی عمودی تولید شده الکترومگنت با توجه به توان الکتریکی آن است، هرچه تعداد دور سیم‌لوله کمتر باشد جریان بیشتری برای رسیدن به نیروی آستانه مورد نیاز است.



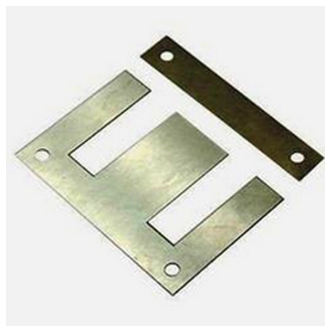
شکل (۱۱): ثابت زمانی سیم‌لوله با توجه به فاصله هوایی و تعداد دور سیم‌لوله ($R=6\Omega$).



شکل (۱۲): میزان نیروی عمودی ایجاد شده توسط الکترومگنت با توجه به شدت جریان عبوری از سیم‌لوله در فاصله هوایی ۰/۲ میلی‌متر.

۵- نتایج آزمایشگاهی رفتار میراگر

در میراگر اصطکاکی مطرح شده می‌توان گفت که الکترومگنت‌های مولد نیرو مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کنند؛ بنابراین عملکرد درست این قطعات از اهمیت بسزایی برخوردار است.



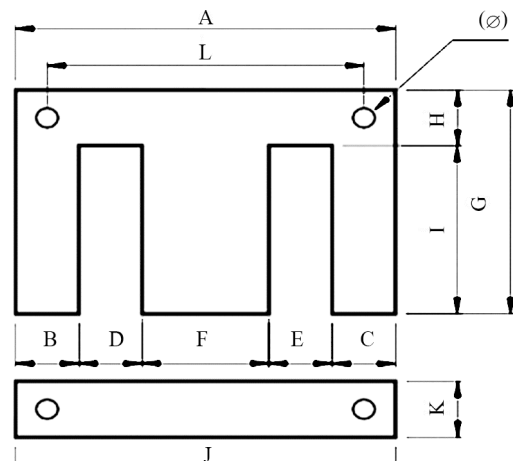
شکل (۱۵): نمونه هسته EI استفاده شده در هسته الکترومگنت.

به شدت کاهش می‌یابد و نیروی الکترومگنت‌ها شدیداً افت می‌کند. علت امر نیز تراوایی مغناطیسی بسیار ناچیز فاصله هوایی نسبت به فولاد سیلیکونی هسته است. به همین دلیل فاصله هوایی بین این قسمت‌ها حذف شد تا بتوان به حداکثر نیروی تولیدی آنها دست یافت.

مورد آخری که باید به آن پرداخت تعداد و قطر سیم‌لوله استفاده شده می‌باشد. هرچه تعداد دور سیم‌لوله افزایش یابد میدان مغناطیسی و نیروی تولیدی الکترومگنت در جریان ثابت افزایش پیدا می‌کند. از طرفی هرچه قطر سیم‌لوله افزایش پیدا کند علاوه بر اینکه تعداد دور کمتری می‌توان در فضای اندک هسته جای داد، مقاومت سیم‌لوله کاهش و به همان میزان ثابت زمانی الکترومگنت افزایش می‌یابد. با استفاده از این اطلاعات تعداد دور سیم‌لوله ۳۰۰ دور و قطر آن ۰/۴ میلی‌متر انتخاب شد و در فضای خالی هسته جای گرفت و با دقت با رزین پر شد تا هم عایق الکتریکی باشد و علاوه بر محافظت سیم‌ها از لرزش آنها حین کار نیز جلوگیری کند. همچنین مطابق شکل (۱۶) که نمایی از الکترومگنت‌های ساخته شده است، روی سطح بالایی و جانبی آنها ورق‌های آلومینیومی چسبانده شد تا از تداخلات مغناطیسی هسته و تشکیل مسیرهای فرار مغناطیسی جلوگیری به عمل آید. با رعایت موارد فوق مشخصات سیم‌لوله الکترومگنت‌های ساخته شده به صورت جدول (۳) است.

جدول (۳): مشخصات سیم‌لوله الکترومگنت‌ها.

A (cm ²)	T (turn)	d _{wire} (mm)	R (Ω)
۲۰	۳۰۰	۰/۴	۳/۵



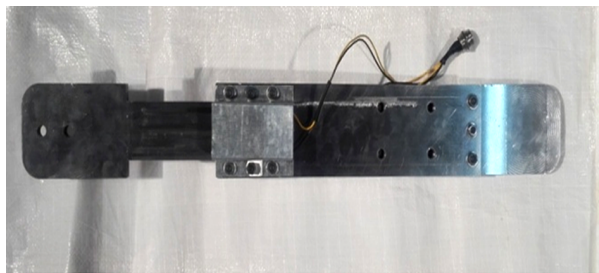
شکل (۱۴): پارامترهای هندسی هسته EI الکترومگنت‌ها.

از اهمیت خاصی برخوردار می‌شود. هنگامی که یک رسانا در یک میدان مغناطیسی خارجی حرکت، در اثر پدیده القای الکترومغناطیسی طبق قانون القای فارادی، نیروی محرکه الکتریکی (EMF) در رسانا تولید می‌شود. از آنجایی که رسانا ایده‌آل نیست، مقداری مقاومت الکتریکی دارد. نیروی محرکه الکتریکی، باعث پدید آمدن جریان‌های پراکنده گردشی در رسانا می‌شود. این جریان‌ها، میدان مغناطیسی پدید می‌آورند که با تغییرات میدان مغناطیسی اولیه مخالفت می‌کند و از سوی دیگر، انرژی را در مقاومت رسانا به شکل گرما تلف می‌کنند. جریان‌های گردابی، باعث اتلاف مقاومتی و در نتیجه، تولید گرما می‌شوند. جریان‌های گردابی در این وسایل با انتخاب مواد هسته مغناطیسی به حداقل می‌رسند که رسانایی الکتریکی کمی دارد یا از لایه‌لایه کردن استفاده می‌کنند. جریان نمی‌تواند از شکاف عایق بین لایه‌ها عبور کند. بارها در مرزهای لایه جمع می‌شوند و میدان‌های الکتریکی را تولید می‌کنند که با هر تجمع دیگر بار مقابله می‌کنند و جریان‌ها گردابی را متوقف می‌کنند. به همین دلیل هسته الکترومگنت‌های تشکیل دهنده میراگر از چیدمان تعداد زیادی ورق‌های به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر از فولاد سیلیکونی تشکیل شده است. در شکل (۱۵) یکی از این ورق‌ها به نمایش درآمده است.

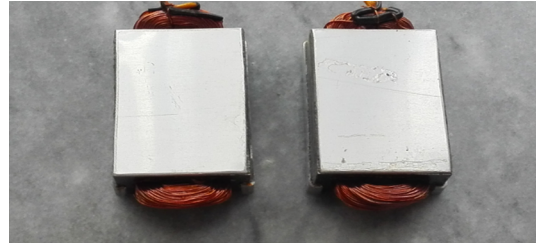
مسئله بعدی که باید به آن توجه خاص نمود فاصله بین قسمت‌های متحرک E و I در الکترومگنت‌ها می‌باشد. نتایج قبلی نشان داد که با افزایش فاصله بین این قسمت‌ها، میدان مغناطیسی

پس از برشکاری و سوراخ کاری قطعات، تمامی ورق‌ها مخصوصاً زبانه متحرک میانی به وسیله سنگ مغناطیسی تماماً مسطح شدند تا حرکت آنها به آسانی صورت پذیرد. پس از ساخت این قطعات درپوشی از جنس ورق گالوانیزه فولادی ساخته شد و قطعات طوری بر روی یکدیگر سوار شدند که فنرهای پیش فشرده ساز از پشت با نیروی اندکی الکترومگنت‌ها را به زبانه متحرک بچسبانند. در شکل (۱۹) نمایی از میراگر تکمیل شده آورده شده است.

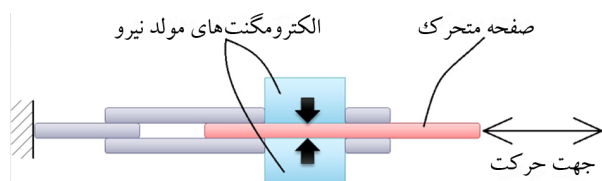
اعمال بار به صورت رفت و برگشتی مطابق شکل (۲۰) به صفحات ابتدایی و انتهایی فیور به صورت محوری بوده است. مطابق جدول (۴) که نحوه اعمال بار به میراگر است، بارگذاری در هر جریان عبوری، به تعداد چهار سیکل انجام شده است تا تأثیر جریان گذرنده از سیم‌لوله‌های الکترومگنت‌ها روشن گردد.



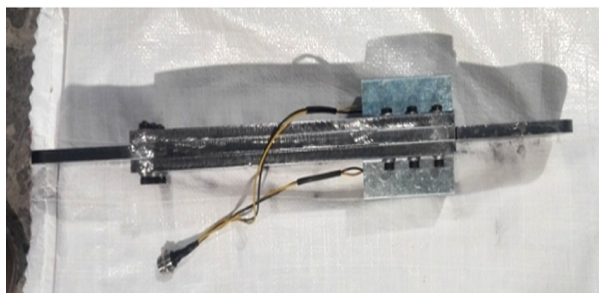
مکانیسم عملکردی میراگر در شکل (۱۷) و قطعات تشکیل دهنده بدنه اصلی میراگر در شکل (۱۸) به نمایش در آمده است.



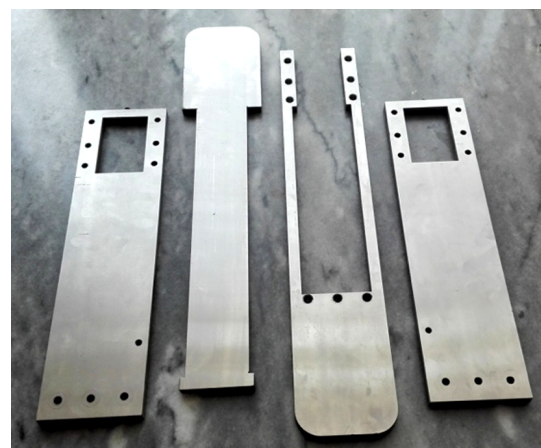
شکل (۱۶): نمایی از الکترومگنت‌های ساخته شده و فنرهای پیش فشرده ساز.



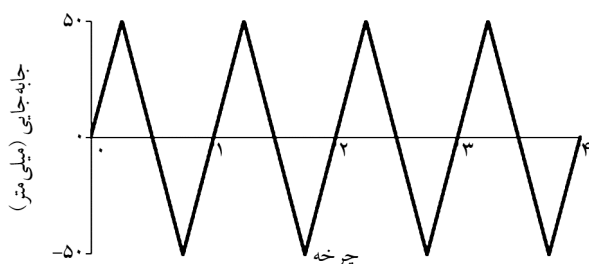
شکل (۱۷): مکانیسم عملکرد میراگر.



شکل (۱۹): نمونه میراگر تکمیل شده.



شکل (۱۸): قطعات تشکیل دهنده بدنه اصلی میراگر.



شکل (۲۰): پروتکل بارگذاری.

در صورتی که حداکثر نیروی به دست آمده از هر چرخه را به ازای جریان‌های مختلف ترسیم کنیم شکل (۲۳) حاصل می‌شود. همان‌طور که مشخص است در جریان صفر که میراگر شبیه به یک میراگر منفعل اصطکاکی عمل می‌کند حداکثر مقاومتی که ایجاد می‌شود در حدود ۱۵۰ نیوتون است که حاصل نیروی عمود بر سطح ناشی از فنرهای پیش فشرده‌ساز می‌باشد.



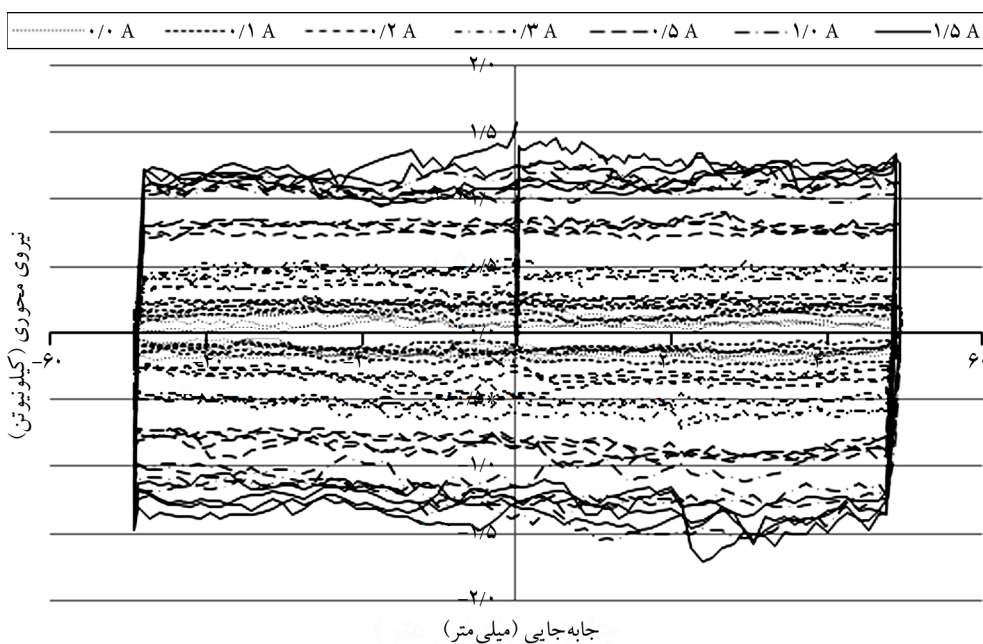
شکل (۲۱): میراگر حین آزمایش.

جدول (۴): نحوه اعمال بار به میراگر.

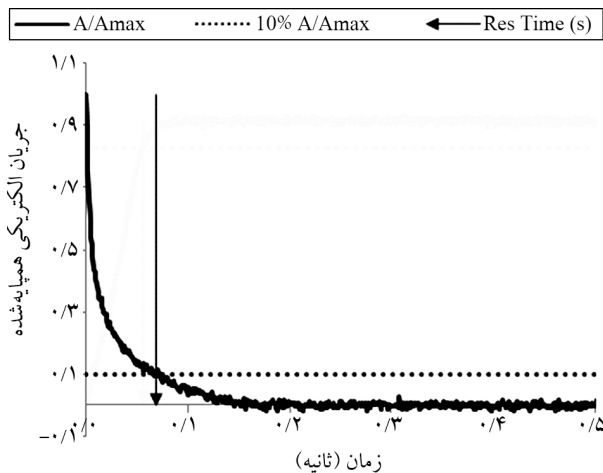
دامنه جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر	
تعداد سیکل	جریان الکتریکی عبوری (A)
۴	۰/۰
۴	۰/۱
۴	۰/۲
۴	۰/۳
۴	۰/۵
۴	۱/۰
۴	۱/۵

در شکل (۲۱) میراگر در حین آزمایش به نمایش درآمده است.

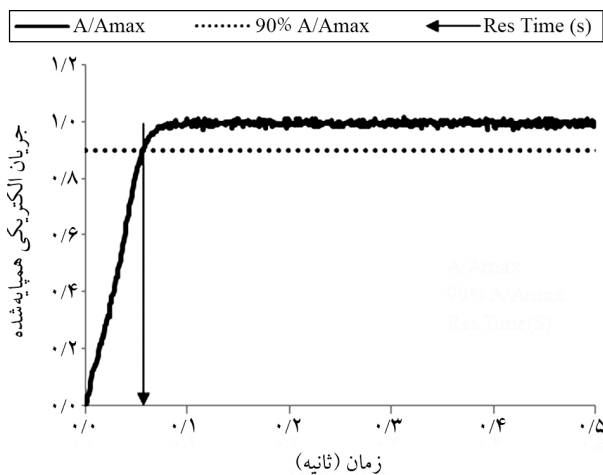
منحنی چرخه‌ای نیرو- تغییر مکان به دست آمده میراگر تحت اثر جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر و جریان‌های الکتریکی ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ آمپر در شکل (۲۲) به نمایش درآمده است. با توجه به منحنی چرخه‌ای نیرو- تغییر مکان به دست آمده میراگر، رفتار اصطکاکی کاملاً مشهود است. همان‌طور که انتظار می‌رفت هنگامی که جریان الکتریکی گذرنده از سیم‌لوله الکترومگنت افزایش پیدا می‌کند حداکثر نیروی میراگر که متأثر از نیروی عمود بر سطح الکترومگنت‌هاست نیز افزایش پیدا می‌کند.



شکل (۲۲): نمودار چرخه‌ای میراگر در جریان‌های مختلف در دامنه حداکثر ۵۰ میلی‌متر.



شکل (۲۵): پاسخ زمانی میراگر هنگام قطع جریان.

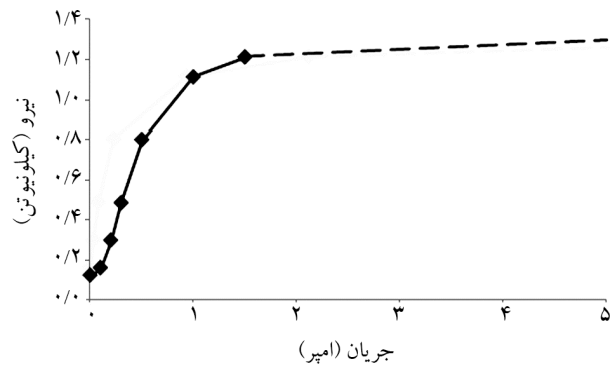


شکل (۲۶): پاسخ زمانی میراگر هنگام اعمال جریان.

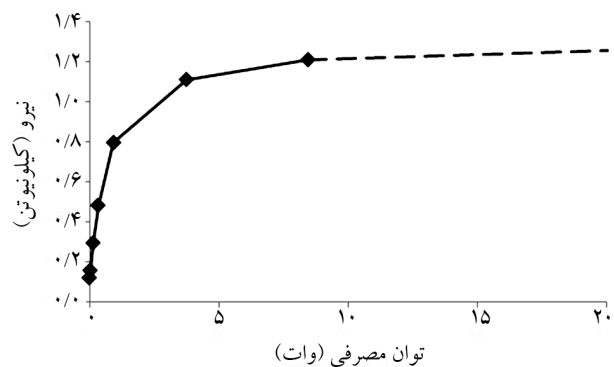
جریان از ۱۰۰ درصد به ۱۰ درصد جریان حداکثر را زمان خاموش شدن میراگر در نظر بگیریم زمان روشن شدن میراگر برابر ۵۶ میلی ثانیه و زمان خاموش شدن آن برابر ۶۸ میلی ثانیه به دست آمد.

۶- نتیجه گیری

هدف از این پژوهش معرفی نوع جدیدی از میراگرهای اصطکاکی متغیر بود که برای تأمین و تغییر نیروی عمود بر سطوح اصطکاکی از مولد نیروی الکترومغناطیسی استفاده می کنند. بدین منظور روابط حاکم بر رفتار این مولد مورد توجه قرار گرفت و روابط حاکم بر آن استخراج شد. پس از آن با در نظر گرفتن رفتار مغناطیسی مواد، با استفاده از مدل سازی کامپیوتری علاوه بر



شکل (۲۳): حداکثر نیروی میراگر در جریان های مختلف عبوری.



شکل (۲۴): توان مصرفی در حداکثر نیروی تولیدی میراگر.

در ادامه هر چه جریان عبوری میراگر افزایش پیدا می کند نیروی حداکثر تحمل شده افزایش می یابد؛ اما از جریان ۰/۸ آمپر به بعد دلیل غیرخطی بودن رفتار مغناطیسی مصالح فولادی هسته و کاهش سرعت افزایش شار مغناطیسی عبوری از هسته، سرعت رشد نیرو کاهش می یابد. در شکل (۲۴) نیز حداکثر نیروی تحمل شده میراگر بر حسب توان مصرفی الکترومگنت ترسیم شده است. به دلیل وابستگی توان الکتریکی با توان دوم جریان عبوری، سرعت رشد نیرو در توان های پایین تر بسیار بیشتر از سرعت رشد نیرو در توان های بالاتر است.

در کنترل نیمه فعال لرزه ای توجه به زمان پاسخگویی میراگر یکی از پارامترهای مهم عملکردی می باشد که در کارکرد مناسب میراگر و همچنین انتخاب الگوریتم کنترلی متناسب بسیار با اهمیت است. زمان پاسخگویی میراگر در پاسخ به اعمال و قطع ولتاژ به صورت پله ای در شکل های (۲۵) و (۲۶) آورده شده است. در صورتی که زمان معادل رسیدن جریان از صفر درصد به ۹۰ درصد جریان حداکثر را زمان روشن شدن میراگر و زمان معادل رسیدن

3. Rabinow, J. (1948) The magnetic fluid clutch. *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, **67**(2), 1308-1315.
4. Yang, G., Spencer, B., Carlson, J., and Sain, M. (2002) Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*, **24**(3), 309-323.
5. Kawashima, K., Unjoh, S., and Shimizu, H. (1992) Earthquake response control of highway bridges by variable damper. 311-317.
6. Feng, Q. and Shinozuka, M. (1990) Use of a variable damper for hybrid control of bridge response under earthquake.
7. Patten, W. (1998) The I-135 Walnut Creek Bridge: An Intelligent Highway Bridge via Semi-active Structural Control. 427-436.
8. Gaul, L. Albrecht, H., and Wirtzner, J. (2004) Semi-active friction damping of large space truss structures. *Shock and Vibration*, **11**(3-4), 173-186.
9. Gaul, L. and Becker, J. (2014) Reduction of structural vibrations by passive and semiactively controlled friction dampers. *Shock and Vibration*, vol. 2014, Article ID 870564, 7 pages, <https://doi.org/10.1155/2014/870564>.
10. Pardo-Varela, J. and Llera, J. (2015) A Semi-active piezoelectric friction damper. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **44**(3), 333-354.
11. Hrovat, D., Barak, P., and Rabins, M. (1983) Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control. *Journal of Engineering Mechanics*, **109**(3), 691-70.
12. Nagarajaiah, S. (2000) Structural vibration damper with continuously variable stiffness. US Patent 6,098,969, 2000.
13. Varadarajan, N. and Nagarajaiah, S. (2004) Wind response control of building with variable stiffness tuned mass damper using empirical mode decomposition/Hilbert transform. *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(4), 451-458.
14. Kannan, S., Uras, H.M. and Aktan, H.M. (1995) Active control of building seismic response by energy dissipation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **24**(5), 747-759.

صحت‌سنجی نتایج تحلیلی، رفتار الکترومگنت به صورت پارامتریک مورد بررسی قرار گرفت و آزمایش‌های صورت گرفته رفتار میراگر را مورد تأیید قرار داد. اهم نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- مولد نیروی الکترومغناطیسی توان به کارگیری در میراگرهای اصطکاکی را دارد.
- استفاده از فاصله هوایی بین مولد نیرو و صفحه متحرک (برای قرار دادن لنت یا پد اصطکاکی) شدیداً نیروی مولد را کاهش می‌دهد بنابراین حذف فاصله هوایی باعث حداکثر شدن نیروی تولیدی مولدها می‌گردد.
- حداکثر نیروی تولیدی میراگر اصطکاکی با دو مولد نیرو و مساحت قطب ۲۰ سانتی‌متر مربع برای هر مولد نیرو، برابر ۱۲۰۰ نیوتن اندازه‌گیری شد.
- مولد نیروی مغناطیسی توان ایجاد تنش حداکثر ۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع را داراست.
- زمان پاسخگویی مولدهای نیروی میراگر به تغییرات جریان، حداکثر ۵۶ میلی‌ثانیه برای رسیدن به حداکثر ظرفیت و ۶۸ میلی‌ثانیه برای بازنشانی نیروی میراگر اندازه‌گیری شد.
- این نوع میراگر با مولد نیروی الکترومغناطیسی کاملاً بومی است و امکانات ساخت آن کاملاً در کشور فراهم است.
- با توجه به مطالب بیان شده مزایایی همچون: مکانیسم ساده، قیمت مناسب، رفتار دقیق، زمان پاسخ‌گویی اندک و قابل پیش‌بینی، کنترل نسبتاً ساده، انرژی مورد نیاز اندک، پایداری رفتار نسبت به زمان و بومی بودن می‌تواند استفاده از این نوع مولد نیرو را در میراگرهای اصطکاکی ایده‌آل نماید.

مراجع

1. Hunt, S.J. (2002) Semi-active smart-dampers and resettable actuators for multi-level seismic hazard mitigation of steel moment resisting frames.
2. Dyke, S., Spencer Jr, B., Sain, M., and Carlson, J. (1996) Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction. *Smart Materials and Structures*, **5**(5), p. 565.

15. Feng, M.Q., Shinozuka, M., and Fujii, S. (1993) Friction-controllable sliding isolation system. *Journal of Engineering Mechanics*, **119**(9), 1845-1864.
16. Cheng, T.-H. and Oh, I.-K. (2009) Coil-based electromagnetic damper and actuator for vibration suppression of cantilever beams. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **20**(18), 2237-2247.
17. Zuo, L., Chen, X., and Nayfeh, S. (2011) Design and analysis of a new type of electromagnetic damper with increased energy density. *Journal of Vibration and Acoustics*, **133**(4), 041006.
18. Agrawal, A. and Yang, J. (2000) A semi-active electromagnetic friction damper for response control of structures. *Advanced Technology in Structural Engineering*, 1-8.
19. Amjadian, M. and Agrawal, A.K. (2017) Vibration control using a variable coil-based friction damper. pp. 101642J-101642J-11.
20. Griffiths, D.J. and College, R. (1999) *Introduction to Electrodynamics*. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
21. Pauly, D.E. (1996) Power Supply Magnetics Part I: Selecting Transformer/Inductor Core Material. *Powerconversion and Intelligent Motion-English Edition*, **22**(1), 23-34.
22. Laughton, M. and Warne, D. (2003) *Electrical Engineer's Reference Book*. Newnes.
23. Meeker, D. (2015) *Finite Element Method Magnetics. FEMM*, **4.2**.

واژه‌نامه

- | | |
|---------------------------------|------------------------------------|
| Magnetorheological Flui | ۱- سیالات حساس به میدان مغناطیسی |
| Viscous Variable-Orifice Damper | ۲- میراگرهای ویسکوز با روزنه متغیر |
| Piezoelectric Materials | ۳- مواد پیزوالکتریک |
| Tuned Mass Damper | ۴- میراگر جرمی تنظیم شده |
| Hydraulic Accumulator | ۵- جمع کننده‌های هیدرولیکی |
| Eddy Current | ۶- جریان‌های گردابی |
| Permeability | ۷- تراوایی مغناطیسی |

Designing and Manufacturing a New Type of Variable Friction Dampers with Electromagnetic Actuator

Mohammad Ghasem Vetr¹ and Abbas Malekhosseini^{2*}

1. Assistant Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
2. Ph.D. Candidate, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran,
*Corresponding Author, email: a.malekhosseini@iiees.ac.ir

Structural vibrations caused by earthquakes, wind or other factors can be controlled by various methods. The conceptual approach of structural control includes changes in member stiffness, structural mass and damping to deal with forces passively, semi-actively and actively. Until today, a number of these structural control methods have been successfully used and researchers are promoting methods to increase their applicability and scope by improving performance.

In recent years, researches have significantly been focused on the development and expansion of structural control methods and equipment. Also, in the last three decades, many efforts have been made to transform the conceptual approaches of structural control into usable and practical technologies in structures. It has been clarified that the structural control is one of the important and key points in the design of new structures and a suitable solution for improving structures against wind and earthquake loads. However, until today, most of the existing programs and strategies have led to the use of passive mass dampers or isolation of vibrations from the base. Over the past years, various control equipment and algorithms have been proposed, each of which has its own advantages according to the required performance and the part used.

Semi-active control systems are a separate and emerging example, similar to active control systems. In this control system, the required external energy is much less compared to the energy controlled by the structure. Basically, the semi-active control system does not introduce external energy into the structural system, so the output band of the structure's seismic response is guaranteed [1].

The resistive force or energy dissipation is determined by the internal mechanism of the system members based on the feedback of external or internal sensors. Therefore, this system has combined the advantages of passive and active control systems. Studies have clearly shown that the use of semi-active control equipment and systems has been significantly better than passive control systems in reducing the seismic response of structures, and this system has the ability and potential of this has the ability to perform at the same level or even better than active control systems [2].

In this study, the use of electromagnetic force in the friction damper has been considered and a controllable friction damper has been introduced. In this damper, electric current changes are used to change the force perpendicular to the sliding surfaces of the friction plates. In this method, by using powerful electric magnets that require little electrical energy and by controlling the intensity of the passing current, the function of the friction damper is controlled. For this purpose, taking into account the magnetic behavior of the material and using computer modeling, in addition to validating the analytical results, the behavior of this electromagnet was analyzed parametrically and the test results confirmed the proper behavior and controllability of this damper. To change the force perpendicular to the surface of the electromagnets, using electronic circuits, the current passing through them was changed from zero to 1.5 amps, and the maximum force produced by the damper reached about 1200 N. The electric power needed to create the maximum power capacity was measured to be 8.5 watts. Also, the response time of power generators to current changes was measured to be maximum 56 milliseconds to reach the maximum capacity and 68 milliseconds to reset the damper force. The results of this study showed that this type of power

generator has the ability to be used in the direction of semi-active structural control. The analytical and experimental results of electromagnets showed that the maximum tension perpendicular to the surface that this type of power generator can create is around 10 kg/cm [22].

Keywords: Semi-active control, Electric magnet, Friction damper, Magnetic force.