

بررسی تجربی و عددی عملکرد میراگر مغناطیسی کنترل پذیر در برابر ارتعاشات با فرکانس‌های مختلف

محمد اقتصاد
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه شیراز

روزبه اعیانی
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه شیراز

محمد مهدی ناصری مجرد
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
دانشگاه شیراز

علی تدینی نژاد
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه شیراز

ali.tadayoni.nezhad@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۸/۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۶/۳۰

چکیده

امروزه در صنایع مختلف مانند خودروسازی، ساختمان، سازه و هوافضا افزایش ضریب اطمینان و کاهش ارتعاشات ناشی از نوسانات کوچک و بزرگ از قبیل نوسانات وارده به یک خودرو یا ارتعاشات شدید زمین لرزه وارده به یک سازه، توجه بسیاری از متخصصین را به خود جلب نموده است. به عنوان نمونه، پارامترهای انتخابی برای یک سیستم تعلیق خودرو باید علاوه بر ایجاد راحتی سرنشینان، رانندگی مطمئن و کنترل پایدار وسیله نقلیه را در پی داشته باشند. در سیستم‌های تعلیق رایج، پارامترهای سختی و میرایی مقادیر ثابتی دارند که با انتخاب بهینه این پارامترها با توجه به نوع استفاده و کاربرد، می‌توان در یک محدوده کاری خاص و محدود، پاسخ ارتعاشی مناسبی را دریافت نمود. ولی با تغییر شرایط کاری، سیستم از حالت بهینه خارج می‌شود. محققان برای رفع این کمبود به استفاده از مواد هوشمندی مانند سیال شکل‌پذیر مغناطیسی روی آورده‌اند. این سیال در حضور میدان مغناطیسی تغییر قابل توجهی در لزجت می‌دهد و می‌تواند به این طریق ثابت میراگر را در عرض چند صدم ثانیه به میزان قابل توجهی تغییر دهد. میراگرهای حاوی این ماده که میراگرهای مغناطیسی کنترل‌پذیر نامیده می‌شوند، به کمک سیستم‌های کنترلی می‌توانند با بالاترین سرعت خود را با تغییرات وفق دهند. به منظور استفاده از این میراگر در سیستم‌های تعلیق به عنوان صافی‌های پایین‌گذر باید نحوه عملکرد آن در شرایط مختلف محیطی بررسی شود. در این پژوهش اثر تغییر فرکانس و میدان مغناطیسی به عنوان پارامترهای متغیر موثر در کنترل سیستم تعلیق بر پاسخ میراگر، مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. سیال شکل‌پذیر مغناطیسی و میراگر مغناطیسی‌ای که در این آزمایش‌ها مورد بررسی قرار گرفته برای اولین بار در ایران در دانشگاه شیراز طراحی و ساخته شده است.

واژگان کلیدی: سیال شکل‌پذیر مغناطیسی، میراگر مغناطیسی کنترل‌پذیر، ارتعاشات

۱. مقدمه

امروزه کاهش ارتعاشات ناشی از نوسانات با فرکانس و دامنه‌های متغیر از قبیل نوسانات وارده به یک خودرو یا زمین‌لرزه توجه بسیاری از متخصصین را به خود جلب نموده است. به عنوان نمونه کاربرد سیستم تعلیق برای یک خودرو افزایش ضریب اطمینان و آسایش بیشتر سرنشینان اتومبیل به همراه کنترل نوسانات و کنترل پایدار خودرو در سرعت‌های مختلف می‌باشد. امروزه سیستم‌های تعلیق غیرفعال^۱ به عنوان ساده‌ترین نوع، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع سیستم تعلیق، پارامترهای سختی و میرایی مقادیر ثابت و معینی بوده که با انتخاب بهینه این پارامترها می‌توان در یک محدوده کاری خاص، بهترین پاسخ ارتعاشی را دریافت. ولی با تغییر این پارامترها، سیستم از حالت بهینه خود خارج شده و دیگر نمی‌تواند پاسخ مناسبی را ارائه نماید. اینگونه سیستم‌ها با وجود سادگی، به دلیل محدود بودن دامنه فرکانسی مشکلاتی را با خود به همراه دارند. لذا سیستم‌های تعلیق فعال^۲ به منظور رفع مشکل دامنه فرکانسی محدود به کار گرفته شدند. در این نوع سیستم تعلیق، تعدادی جک سروهیدرولیک و یا سروپنوماتیک به صورت موازی با فنر و میراگر قرار دارند. در این حالت ارتعاشات خودرو با استفاده از حسگرهای مناسب، اندازه‌گیری شده و به سیستم کنترلی وارد می‌شود. این سیستم کنترلی پس از پردازش اطلاعات ورودی، پالس‌های کنترلی مناسبی را جهت ورود به شیرهای هیدرولیکی یا پنوماتیکی می‌فرستد و بدین ترتیب نیروی اعمالی این جک‌ها تحت کنترل در می‌آید. بدین وسیله، کنترل مناسبی بر روی وضعیت ارتعاشی خودرو صورت می‌گیرد. اما پیچیدگی این سیستم‌ها، میزان مصرف انرژی و بالا بودن هزینه ساخت و نگهداری، که در صنایع خودروسازی فاکتور بسیار مهمی است، محدودیت‌هایی را بر میزان مصرف این نوع سیستم تعلیق در صنایع خودروسازی اعمال کرده است. برای غلبه بر این مشکلات، سیستم‌های تعلیق نیمه‌فعال^۳ پیشنهاد شدند که با دامنه فرکانسی بالایی

کار می‌کنند و مشکل مصرف انرژی بالا را نیز حل کردند. در این راستا ابتدا سیال شکل‌پذیر الکتریکی^۴ به عنوان یک ماده هوشمند در سیستم تعلیق نیمه‌فعال وارد بازار شد. این سیال با چگالی ۱-۲ گرم بر سانتیمتر مکعب ولتاژی در حدود ۲ تا ۵ کیلو ولت و جریانی حدود ۱-۱۰ میلی آمپر نیاز دارد و در صورت اعمال میدان الکتریکی، تنش برشی ۲-۵ کیلو پاسکال در آن ایجاد می‌شود. این سیستم هوشمند نیز به دلیل ولتاژ بالا چندان مورد استقبال خودروسازان قرار نگرفت. سپس سیال شکل‌پذیر مغناطیسی^۵ به عنوان نسل جدید مواد هوشمند در سیستم‌های تعلیق استفاده شد. این سیال به ولتاژ ۱۲-۲۵ ولت و جریان ۱-۲ آمپر نیاز دارد که در صورت اعمال میدان، تنش برشی ۵۰-۱۰۰ کیلو پاسکال در آن ایجاد می‌شود. در سالهای اخیر کاربرد میراگر مغناطیسی کنترل‌پذیر حاوی سیال شکل‌پذیر مغناطیسی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مزایای این میراگرها برای کاربران صنایع مختلف از جمله ماشین‌های سنگین و کامیون‌ها [۱]، سیستم روتور هلیکوپتر [۲-۴]، سیستم تعلیق اتومبیل [۵]، کاربردهای عمرانی [۶] و غیره به اثبات رسیده است.

۲. مدلسازی و نحوه بررسی و محاسبه رفتار میراگر مغناطیسی کنترل‌پذیر

مبانی نظری میراگر به دو قسمت مکانیک سیال غیرنیوتنی و مبانی الکتریکی و مغناطیسی میراگرهای کنترل‌پذیر تقسیم می‌شود.

۲-۱. مکانیک سیال غیرنیوتنی میراگرهای کنترل‌پذیر
فرض می‌شود که رفتار یک‌بعدی مواد شکل‌پذیر تحت تنش برشی ساده از مدل ویسکوپلاستیک ساده بینگهام که در آن تنش برشی اعمالی با $\tau_y(B_g)$ مقاومت تنش وابسته به جریان و $\dot{\gamma}$ تنش لزج غیروابسته به جریان، پیروی کند [۷].

$$\tau(B_g, \dot{\gamma}) = \tau_y(B_g) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

$$F = \Delta p \pi \frac{((D_p + t_g)^2 - D_r^2)}{4} \quad (6)$$

با فرض تراکم ناپذیری، Q با V_p سرعت پیستون مرتبط است:

$$Q = V_p (\pi/4) (D_p^2 - D_r^2) \quad (7)$$

بنابراین، نیروی دستگاه را می‌توان از سرعت پیستون، ابعاد دستگاه، و مشخصات سیال شکل‌پذیر و چگالی شار مغناطیسی درون مجرا به دست آورد.

۲-۲. مبانی الکتریکی و مغناطیسی میراگرهای کنترل‌پذیر

حجم کم سیال شکل‌پذیر بین دیواره سیلندر و قطب‌های مغناطیسی پیستون تشکیل یک پیوند در مدار مغناطیسی را می‌دهد. مدار مغناطیسی شامل پیستون و دیواره سیلندر نیز می‌باشد. این مدار مغناطیسی را می‌توان با استفاده از قانون آمپر تحلیل کرد.

$$\sum H_k l_k = Ni \quad (8)$$

که H_k شدت میدان مغناطیسی القا شده در K امین عضو مدار و l_k طول مؤثر آن عضو مدار است. N تعداد دور سیم و i جریان درون سیم است. واحد H دور×آمپر بر متر است. در میدان‌های مغناطیسی ضعیف رابطه میان شدت میدان مغناطیسی (H) و چگالی میدان مغناطیسی (B)، $B = \mu_r \mu_0 H$ است، که μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی هوا ($4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A) و μ_r نفوذپذیری نسبی ماده است. در آستانه میدان، H_c ماده از نظر مغناطیسی تقریباً اشباع شده، رابطه اشباع مغناطیسی [۹] به صورت زیر است.

$$M = B(H_c) - \mu_0 H_c \quad (9)$$

در تحلیل‌ها از رابطه زیر برای توصیف منحنی‌های مغناطیسی استفاده شده است [۱۰].

$$H(B) = \frac{H_c B}{M} + \frac{1}{2s} \times \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{H_0}{M} \right) \times \left(e^{\sinh^{-1}(s(B-M))} - e^{\sinh^{-1}(-sM)} \right) \quad (10)$$

که s شیب رابطه B-H است. B_c ، چگالی شار مغناطیسی برای هسته، و B_w چگالی شار مغناطیسی دیواره می‌باشد.

در این رابطه B_g چگالی شار مغناطیسی درون مجرای عبور سیال، η لزجت پلاستیک و $\dot{\gamma}$ نرخ تنش برشی است. در این مقاله فرض بر این است که تنش تسلیم با چگالی شار مغناطیسی بصورت $\tau_y = \alpha B$ ، که $\alpha \approx 80 \text{ kPa/T}$ و α ثابت ماده هستند، متناسب است. اگر در این سیال اثرات پساچاری شدن لزجت^۶ نیز در نظر گرفته شود مدل توانی هرشل بالکلی^۷ که با رابطه ۲ بیان می‌شود، مدل مناسبی برای سیال در شبیه‌سازی خواص وابسته به میدان مغناطیسی سیال می‌باشد [۱۱]:

$$\tau = \left(\tau_y (B_g) + k |\dot{\gamma}|^m \right) \text{sgn}(\dot{\gamma}) \quad (2)$$

که در این رابطه m و k پارامترهای سیال اند که دارای مقادیری مثبت هستند ($m, K > 0$). با مقایسه روابط ۱ و ۲ لزجت پلاستیک معادل مدل هرشل بالکلی عبارت است از:

$$\eta_e = K |\dot{\gamma}|^{\frac{1}{m}-1} \quad (3)$$

هنگامی که در مدل هرشل بالکلی مقدار $m = 1$ و $K = \eta$ در نظر گرفته شود این مدل به مدل بینگهام در معادله ۱ تبدیل می‌شود.

$$\Delta p \approx 2.1 \frac{\tau_y}{t_g} + \Delta p_N \quad (4)$$

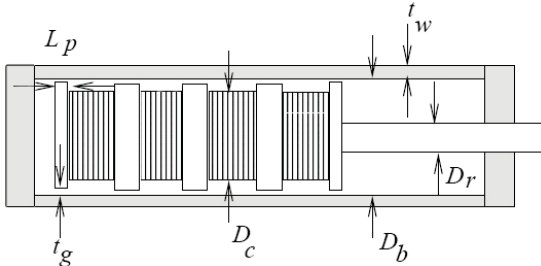
که در آن Δp افت فشار در طول پیستون نیز دارای مؤلفه‌های تسلیم و لزج [۷] است و Δp_N مؤلفه لزجت نیوتنی به طور تقریبی برابر است با:

$$\Delta p_N \approx \frac{12Q\eta(2N_s)L_p}{\pi(D_p + t_g)t_g^3} \quad (5)$$

در این رابطه N_s تعداد حلقه‌های سیم، Q نرخ جریان حجمی و D_p قطر پیستون است. ثابت ۲،۱ [۸] در معادله ۴ مقداری تجربی و در محدوده (۲،۰۷ تا ۳،۰۷) است و نشان‌دهنده طبیعت خاص سیال شکل‌پذیر و تمایل آن به تشکیل دادن لایه نازک روان‌کننده نزدیک به دیواره مجرا است. نیروی به وجود آمده درون دستگاه، F ، برابر با افت فشار در مساحت سطح مقطع پیستون است که به صورت زیر بیان می‌شود:

۳. طراحی میراگر

شکل ۱ نمایی از طرح یک میراگر مغناطیسی کنترل‌پذیر را نمایش می‌دهد. سیم‌پیچ‌ها، که وظیفه ایجاد شار مغناطیسی در درون پیستون‌هایی از جنس استیل کم‌کربن را بر عهده دارند، با استفاده از هاشورهایی با خطوط عمودی نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱. نمای طرح میراگر مغناطیسی کنترل‌پذیر

سیم‌پیچ‌ها در خلاف جهت یکدیگر پیچیده شده‌اند و شار مغناطیسی آنها تشکیل ۴ مدار مغناطیسی را می‌دهد. شار درون مدار مغناطیسی ابتدا به صورت محوری از درون هسته از جنس فولاد کم‌کربن با قطر D_c جریان می‌یابد و به دلیل نوع پیچش سیم‌پیچ‌ها به صورت شعاعی از قطب‌های پیستون به طول L_p خارج می‌شود، سپس از طریق مجرای به ضخامت t_g که در آن سیال شکل‌پذیر مغناطیسی جریان دارد عبور کرده و وارد دیواره سیلندر با ضخامت t_w می‌شود، دیواره سیلندر را به صورت محوری طی کرده و با عبور از مجرای عبوری سیال و قطب پیستون و رسیدن به هسته پیستون مدار را کامل می‌کند. میراگر مغناطیسی کنترل‌پذیر طراحی شده شامل پارامترهای فیزیکی مختلف است. این پارامترها عبارتند از D_b قطر داخلی پوسته، D_r قطر میله پیستون، t_w ضخامت دیواره پوسته، D_c قطر هسته، L_p طول قطب و t_g ضخامت مجرا. در شکل ۲ نیز نمونه آزمایشگاهی میراگر مغناطیسی کنترل‌پذیر نشان داده شده است. در جدول ۱ مشخصات میراگرهای ساخته شده آورده شده است.

$$\Phi_B = B_g A_g \quad (11)$$

$$B_c = \frac{\Phi_B}{A_c} \quad (12)$$

$$B_w = \frac{\Phi_B}{A_w} \quad (13)$$

که A_g ، A_c و A_w به ترتیب مساحت سطح مقطع‌های مجرا، هسته، و دیواره سیلندر هستند. چگالی شار برای هر عضو محاسبه می‌شود تا از عدم اشباع مغناطیسی اعضای سیستم اطمینان حاصل شود. با مشخص شدن B_g ، شار مغناطیسی و چگالی شار در هر عضو از طریق روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند. با استفاده از پارامترهای مغناطیسی (H_c ، M و S) برای فولاد کم‌کربن و سیال شکل‌پذیر مشخصه‌های مغناطیسی القاشده در هر عضو مدار مغناطیسی توسط رابطه ۱۰ قابل محاسبه است. با B_g و H به دست آمده برای هر مؤلفه مدار مغناطیسی، جریان مورد نیاز را می‌توان از معادله زیر به دست آورد.

$$i = \frac{1}{N} (2H_g t_g + H_c (l_c + l_p) + H_p (D_p + t_w) + H_w (l_c + l_p)) \quad (14)$$

N تعداد دورها در یک سیم‌پیچ، l_c طول هسته و l_p طول قطب‌ها است. مغناطیس القا شده درون مجرا، قطب، و هسته H_g ، H_p و H_c هستند. L ظرفیت سلف معادل مدار، R مقاومت، V ولتاژ و T ثابت زمانی مدار معادل می‌باشد که از روابط زیر قابل محاسبه هستند.

$$L = \frac{N_s N \Phi_B}{i} \quad (15)$$

$$R = r N \pi D_c N_s \quad (16)$$

$$V = i R \quad (17)$$

$$T = \frac{L}{R} \quad (18)$$

که r مقاومت بر واحد طول سیم مغناطیسی است. متغیرهای تعریف شده N_s تعداد هسته‌ها که برابر با تعداد سیم‌پیچ‌ها است، N_i تعداد لایه‌های پیچیده شده در هر سیم‌پیچ و قطر نامی سیم بودند.

سانتی‌متر در دقیقه عمل کشش میراگر را انجام دهد. شکل (۳.ب) نشان‌دهنده دستگاه سروهیدرولیک Instron 8800 در آزمایشگاه سروهیدرولیک شرکت آزمایش و تحقیقات قطعات و مجموعه‌های خودرو (ایتراک) است که توانایی اعمال نیرو با فرکانس‌ها و دامنه‌های متغیر را دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۳. الف) دستگاه کشش با سرعت ثابت، ب) دستگاه سروهیدرولیک

۵. نتایج و تحلیل‌ها

آزمون‌های سرعت ثابت در سرعت‌های ۱ و ۵ سانتی‌متر بر دقیقه با جریان‌های مختلف انجام شد. نمودارهای آزمون با



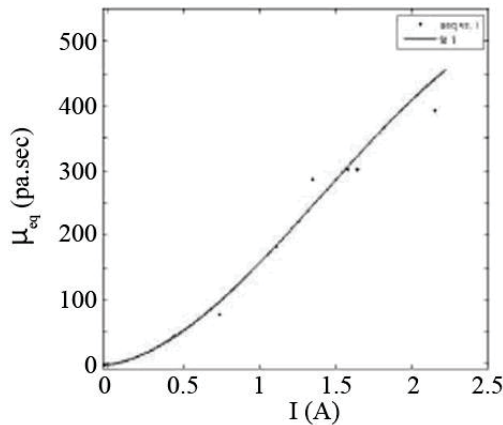
شکل ۲. نمونه آزمایشگاهی میراگر مغناطیسی کنترل‌پذیر

جدول ۱. مشخصات میراگرهای ساخته شده

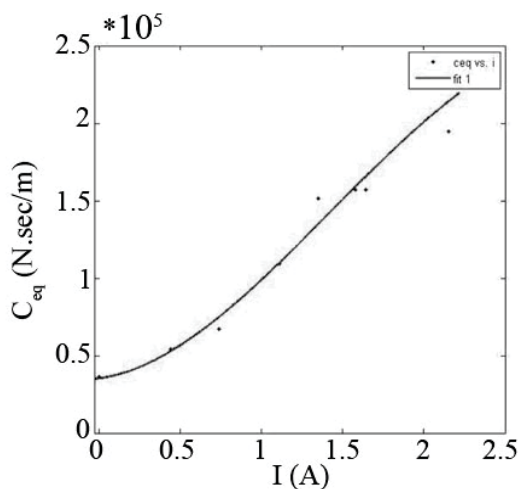
پارامتر	میراگر ۱	میراگر ۲
قطر داخلی پوسته	۲۸ میلی‌متر	۲۷٫۵ میلی‌متر
قطر میله پیستون	۱۹ میلی‌متر	۲۰ میلی‌متر
ضخامت دیواره پوسته	۳ میلی‌متر	۳ میلی‌متر
قطر هسته	۲۴ میلی‌متر	۲۶ میلی‌متر
طول قطب	۸۰ میلی‌متر	۶۵ میلی‌متر
ضخامت مجرا	۱٫۲ میلی‌متر	۰٫۴ میلی‌متر
تعداد سیم‌پیچ	۴	۴
تعداد پیستون	۵	۵

۴. آزمایش‌ها

آزمایش‌ها به دو گروه استاتیک و دینامیک تقسیم می‌شوند. آزمون‌های استاتیک به صورت کشش با سرعت پایین و ثابت برای جریان‌های مختلف برای به دست آوردن C_{eq} و μ_{eq} انجام شد. حالت دینامیک به منظور تهیه نمودارهای حداکثر نیرو حداکثر سرعت و نیرو جابه‌جایی با استفاده از دستگاه سروهیدرولیک و به صورت چرخه‌های کشش و فشار با فرکانس‌های متغیر به میراگر اعمال شد و این چرخه برای جریان‌های متفاوتی تکرار شد. شکل (۳.الف) دستگاه کشش ثابت Instron در آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز را نمایش می‌دهد. این دستگاه قادر است با حداکثر سرعت ۵



(الف)



(ب)

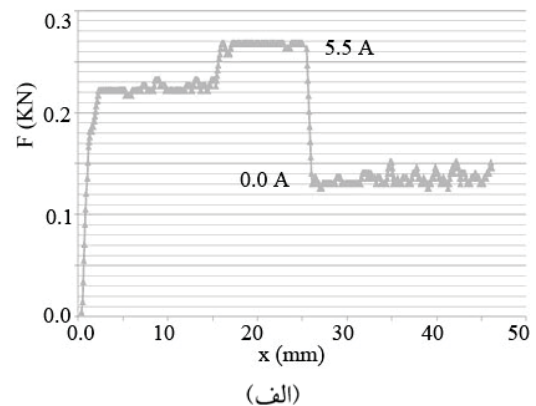
شکل ۵. نمودار μ_{eq} (الف) نمودار C_{eq} (ب)

آزمون‌های با فرکانس‌های مختلف و با جریان‌های صفر و ۳ آمپر با دستگاه سرو هیدرولیک انجام شدند. در شکل (الف) نمودار نیرو جابه‌جایی برای جریان‌های صفر و ۳ آمپر و فرکانس‌های مختلف رسم شده است. شکل (ب) نمودار حداکثر نیرو - حداکثر سرعت را برای جریان‌های صفر و ۳ آمپر نشان می‌دهد.

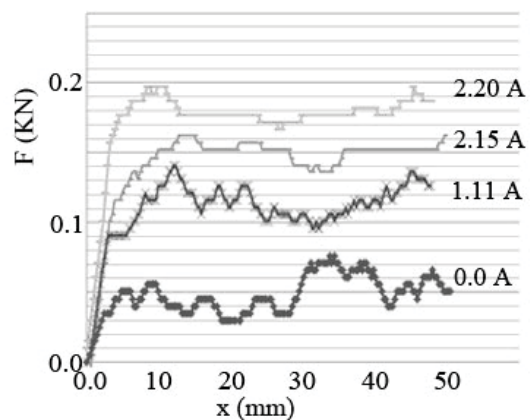
۶. نتیجه‌گیری

به منظور بررسی رفتار میراگر مغناطیسی کنترل‌پذیر دو میراگر طراحی و ساخته شد که در تعداد دورهای سیم‌ها و نیز اندازه مجرای عبوری سیال با یکدیگر متفاوت بودند. این میراگرها تحت کشش ثابت و ارتعاش سینوسی در

دستگاه سرعت ثابت در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده اند. در شکل (الف) نمودار نیرو جابه‌جایی با جریان ۵،۵ آمپر و سرعت ۱ سانتی‌متر بر دقیقه مشاهده می‌شود. به منظور مشاهده واکنش میراگر نسبت به قطع جریان، در میانه آزمایش جریان صفر شد. در شکل (ب) نمودار نیرو جابه‌جایی برای جریان‌های مختلف با سرعت ۵ سانتی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است.



(الف)



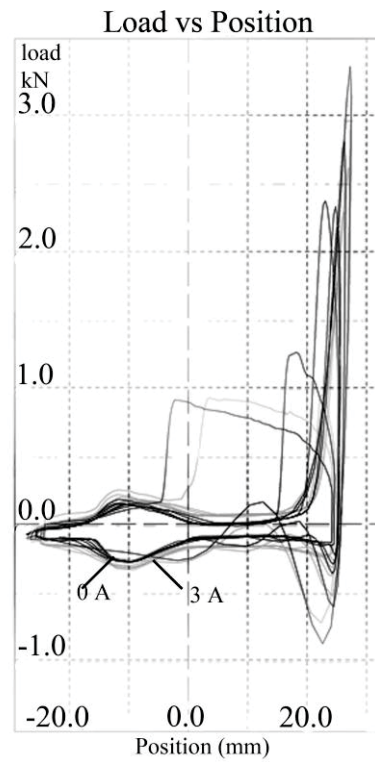
(ب)

شکل ۴. الف) نمودار نیرو جابه‌جایی با جریان ۵،۵ آمپر که در میان آزمایش جریان صفر شد (ب) نمودار نیرو جابه‌جایی برای جریان‌های مختلف

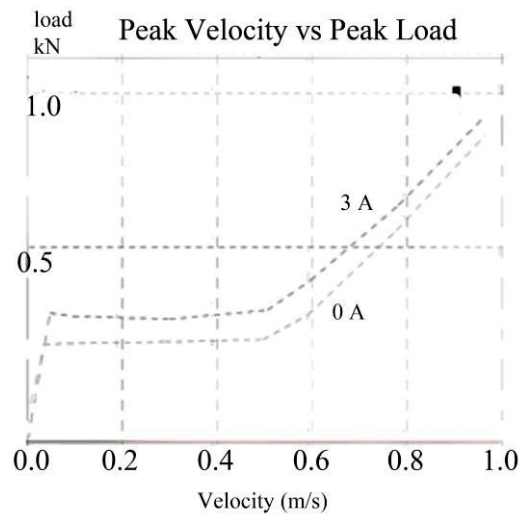
پس از تحلیل عددی نتایج حاصل از آزمون کشش سرعت ثابت با استفاده از روابط ذکر شده در بند ۲ مقادیر C_{eq} و μ_{eq} بر حسب جریان‌های مختلف محاسبه شد. نتایج در شکل ۵ نشان داده شده اند.

قابل توجهی ثابت میراگر، تنش برشی سیال و همچنین نیروهای سینوسی وارده با فرکانس‌های مختلف را تغییر دهد. این میراگر که از سیال شکل‌پذیر مغناطیسی در آن استفاده شده می‌تواند در سیستم‌های تعلیق و جداساز ارتعاش و ضربه استفاده شود.

فرکانس‌های مختلف و جریان‌های الکتریکی متفاوت، مورد آزمایش قرار گرفتند. پس از آزمودن میراگرها، پارامترهای مختلف میراگر از جمله ثابت میراگر و تنش برشی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد که میراگر کنترل‌پذیر مغناطیسی می‌تواند در بازه



(الف)



(ب)

شکل ۶. الف) نمودار نیرو جابه‌جایی، ب) نمودار حداکثر نیرو - حداکثر جابه‌جایی

- [1] Gordaninejad, F., S.P. Kelso. "Fail-safe magnetorheological fluid dampers for off-highway, high payload vehicles." *Journal of intelligent materials, systems and structures*, vol.11, (2000):395-406.
- [2] Kamat, G.M., N. M. Wereley and M. R. Jolly. "Characterization of magnetorheological helicopter lag damper." *Journal of American Helicopter Soc.*, vol.44, (1999):234-48.
- [3] Gandhi, F., K.W. Wang and L. Xia. "Magnetorheological fluid damper feedback linearization control for helicopter rotor application." *Journal of Smart Materials and Structures*, vol.10, (2001):96-103.
- [4] Zhao, C., Y.T. Choi and N.M. Wereley. "Semi-active damping of ground resonance in helicopters using magnetorheological dampers." *Journal of American Helicopter Soc.*, vol.49, (2004):468-82.
- [5] Choi, Y.T., T.M. Wereley and Y.S. Jeon. "Semi-active vibration isolation using magnetorheological isolators." *Proc. SPIE Smart Structures and Materials: Damping and Isolation 4697*, (2002):284-91.
- [6] Chen, Z.Q., X.Y. Wang, J.M. Ko, Y.Q. Ni, B.F. Spencer, Jr. and G. Yang. "MR damping system on Dongting Lake cable-stayed bridge." *Proc. SPIE 5057*, (2003):239-235.
- [7] Gavin, H.P. "The effect of particle concentration inhomogeneities on the steady flow of electro- and magneto-rheological materials." *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol.71, (1997):165-182.
- [8] Spencer, B.F., Jr., G. Yang, J.D. Carlson and M.K. Sain. "Smart dampers for seismic protection of structures: A full-scale study." *Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, June 28-July 1, 1998.
- [9] Cheng, D. K. *Field and Wave Electromagnetics*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1989.
- [10] Gavin H., J. Hoagg and M. Dobossy. "Optimal design of MR dampers." *Proc. U.S.- Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Regions*, Seattle WA, ed. K. Kawashima, B.F. Spencer, and Y. Suzuki, pp.225-236, 2001.
- [11] Beaulne, M., E. Mitsoulis. "Creeping motion of a sphere in tubes filled with Herschel-Bulkley fluids." *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, vol.72, (1997):55-71.

-
1. passive
 2. active
 3. semi active
 4. electrorheological fluid
 5. magnetorheological fluid
 6. post-yield viscosity
 7. Herschel-Bulkley