



## شبیه‌سازی و ارزیابی تجربی دسته موتور هیدرولیکی مگنتورئولوژیکال

رضا تیکانی<sup>1\*</sup>، سعید ضیائی‌راد<sup>2</sup>، محسن اصفهانیان<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

\* اصفهان، صندوق پستی 84156-83111، r\_tikani@cc.iut.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 اردیبهشت 1393

پذیرش: 07 تیر 1393

ارائه در سایت: 02 مهر 1393

کلید واژگان:

دسته موتور مگنتورئولوژیکال

سفتی دینامیکی

تغییر استهلاک

شبیه‌سازی ارتعاشی

## چکیده

یکی از معایب دسته موتورهای الاستومری ایده‌آل نبودن سفتی دینامیکی آنها می‌باشد. موتور در شرایط بارگذاری ضربه‌ای نیازمند نگرانداری سخت بوده تا از حرکات بیش از اندازه آن جلوگیری کند ولی در فرکانس‌های بالا که دامنه ارتعاشات پایین است، قرارگیری موتور بر روی نگرانداری‌هایی نرم باعث کاهش ارتعاشات انتقالی به بدنه خودرو می‌شود. در دسته موتورهای شبه فعال، با تغییر در پارامترهای سیستم سفتی و استهلاک هدف مورد نظر تحقق می‌یابد. با استفاده از سیال مگنتورئولوژیکال در دسته موتور شبه‌فعال، امکان تغییر در استهلاک سیستم با اعمال میدان مغناطیسی به وجود می‌آید. دسته موتور ارائه شده در این مقاله، دسته موتوری مگنتورئولوژیکال می‌باشد که قابلیت تغییر در میزان استهلاک سیستم را با روشن و خاموش نمودن جریان ورودی به سیم‌پیچ مغناطیسی فراهم می‌آورد. افت فشار سیال، ناشی از عبور آن از مجرای تحت میدان مغناطیسی، دسته موتور را از نظر دینامیکی سخت‌تر می‌کند. در این طرح کاربرد سیال مگنتورئولوژیکال برای ایجاد تغییر در خواص استهلاکی سیستم به خوبی نشان داده شده است. شبیه‌سازی ارتعاشی دسته موتور با در نظر گرفتن اثرات استهلاک سیال مگنتورئولوژیکال در حالت قرارگیری در میدان مغناطیسی صورت پذیرفته و نتایج حاصل با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه شده است.

## Simulation and experimental evaluation of a magneto-rheological hydraulic engine mount

Reza Tikani\*, Saeed Ziaei-Rad, Mohsen Esfahanian

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

\* P.O.B. 84156-83111 sfahan, Iran, r\_tikani@cc.iut.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 19 May 2014  
Accepted 28 June 2014  
Available Online 24 September 2014

## Keywords:

Magneto-Rheological Engine Mount  
Dynamic Stiffness  
Damping  
Vibration Simulation

## ABSTRACT

Hydraulic engine mounts are applied to the automotive applications to isolate the frame from the high frequency noise and vibration produced by the engine. It also designs to reduce the engine shake motions from the road distribution usually occurred at low frequencies. This implies that the stiffness and damping properties of the engine mount should be amplitude- and frequency-dependent. In the semi-active engine mounts this task will be done by changing the mount parameters such as stiffness and damping. Magneto-rheological fluids are used in the mounts to change their damping by applying the magnetic field. When the current is applied to the electromagnet and the magnetic field is present, the behavior of the magneto-rheological mount is changed by the magneto-rheological effects. In this paper, a prototype magneto-rheological mount was built and experimentally evaluated. Also, the mathematical model of the mount was developed to represent the dynamic behavior of the engine mount system. The model was numerically solved based on the prototype parameters and simulated in MATLAB. The experimental results were used to verify the model in predicting the mount characteristics.

## 1- مقدمه

انجام پژوهش بر روی دسته موتورها است [1].

با توجه به علاقه خریداران خودرو به خودروهایی با مصرف انرژی و آلودگی کمتر، تولیدکنندگان خودرو به سمت تولید خودروهای با وزن کم و قدرت بیشتر سوق پیدا کرده‌اند [1]. کاهش وزن و افزایش قدرت خودروها که اثر معکوس بر میزان ارتعاشات تولیدی دارد، از دیگر عوامل سرمایه‌گذاری در حوزه بهبود ویژگی‌های دینامیکی دسته موتورها است. انواع مختلفی از دسته موتورها، از دسته موتورهی الاستومری<sup>2</sup> تا دسته موتورهی هیدرولیکی<sup>3</sup>، به

سیستم مونتاژ موتور در وسایل نقلیه مانند خودروها و هواپیماها به طور معمول از موتور (منبع ارتعاشات) و تعدادی نگرانداری (دسته موتور<sup>1</sup>) تشکیل شده است. برای جداسازی نویز و ارتعاشات منتقل شده توسط موتور اخیراً از سیستم‌های مدرن مونتاژ استفاده می‌شود با این وجود همچنان تحقیقات در این زمینه ادامه دارد [1]. به حداقل رساندن نویز و ارتعاشات منتقل شده از موتور و دستیابی به راحتی بیش از پیش مسافران (که البته تابع هدف مشخصی برای تضمین این راحتی وجود ندارد [2])، از دلایل سرمایه‌گذاری و

2- Elastomeric Mount  
3- Hydraulic Engine Mount

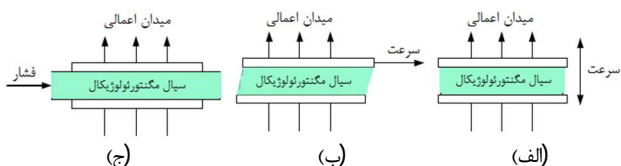
1- Engine Mounts

Please cite this article using:

R. Tikani, S. Ziaei-Rad, M. Esfahanian, Simulation and experimental evaluation of a magneto-rheological hydraulic engine mount, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 43-49, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

R. Tikani, S. Ziaei-Rad, M. Esfahanian, Simulation and experimental evaluation of a magneto-rheological hydraulic engine mount, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 43-49, 2014 (In Persian)



شکل 1 حالت‌های مختلف استفاده از سیالات مگنتورئولوژیکال (الف) حالت فشاری، (ب) حالت برشی، (ج) حالت جریان [9]

در سال 2007، بریگلی و همکارانش [12] یک جداکننده با سیال مگنتورئولوژیکال ساختند که از حالت‌های سه گانه سیال شامل برشی، جریان و فشردگی استفاده می‌شد. مدل ریاضی این جداکننده نیز استخراج شده و پارامترهای مورد نیاز با استفاده از آزمایش جایگزین شده‌اند. ارزانیور و گل‌نراقی [13]، با به کارگیری این سیال هوشمند، دسته موتوری شبه فعال برای کاهش ارتعاشات و نویز در موتورهای جابجایی متغیر طراحی و ساختند. نتایج حاصل از مدل ریاضی این دسته موتور با نتایج تجربی مقایسه شد. استهلاک مورد نیاز دسته موتور برای به صرفه بودن طراحی انجام گرفته از نظر اقتصادی، با استفاده از یک محفظه جدا حاوی این سیال هوشمند تأمین گردید که سفتی و استهلاک متغیر با میدان مغناطیسی را فراهم می‌آورد.

کارایی سیال مگنتورئولوژیکال ساخته شده در شرکت لرد<sup>2</sup>، توسط باربر و کارلسون [14] برای دو نوع دسته موتور مورد آزمایش قرار گرفت و در هر یک از حالت‌ها ویژگی‌های دینامیکی دسته موتور و سفتی دینامیکی آن نمایش داده شد. در این پژوهش هیچ‌گونه شبیه‌سازی ارتعاشی برای دسته موتور هیدرولیکی طراحی شده انجام نشده و تنها به ذکر نتایج تجربی بسنده شده است. در این طراحی با استفاده از حالت جریان سیال، با حذف محفظه جداساز، وظیفه این عضو یعنی تغییر ویژگی‌های دسته موتور متناسب با جابجایی وارده توسط کنترل مسیر تعبیه شده صورت گرفته است.

در مقاله حاضر، دسته موتور هیدرولیکی شبه‌فعال بر پایه سیال مگنتورئولوژیکال با استفاده از ایده ارائه شده توسط باربر و کارلسون [14] معرفی شده است، که با تغییر در جریان ورودی به سیم‌پیچ، سفتی دینامیکی دسته موتور تغییر می‌کند.

معادلات ارتعاشی حاکم بر مساله استخراج گردیده و در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی بر روی دسته موتور ساخته شده مقایسه شده است.

## 2- دسته موتور هیدرولیکی مگنتورئولوژیکال

دسته موتور مگنتورئولوژیکال طراحی شده، همانند دسته موتور هیدرولیکی معمولی از دو محفظه سیال تشکیل یافته است. محفظه بالایی از سمت بالا به لاستیک اصلی و محفظه پایینی از سمت پایین به دیافراگم لاستیکی منتهی می‌شوند. شکل 2، نمای انفجاری این دسته موتور را نشان می‌دهد. اجزای اصلی دسته موتور به ترتیب زیر در این شکل شماره‌گذاری شده‌اند:

- 1- لاستیک اصلی (بالایی)
- 2- دیافراگم لاستیکی
- 3- سیم‌پیچ مسی (پیچ مغناطیسی)
- 4- صفحات فلزی شامل مسیر اینرسی و شیر مگنتورئولوژیکال
- 5- مسیر اینرسی<sup>3</sup>
- 6- شیر مگنتورئولوژیکال
- 7- محفظه فلزی پایینی

صورت فعال و غیرفعال برای بهبود شرایط جداسازی ارتعاشات در وسایل نقلیه، و حتی موتورهای ثابت و موتورهای هواپیما در پژوهش‌های مختلف ارائه و مورد بررسی قرار گرفته‌اند [2].

وظایف دسته موتورها در خودروها به ترتیب شامل تحمل وزن موتور، جلوگیری از خرابی ناشی از شکست در نقاط اتصال موتور و جعبه‌دنده به بدنه، جداسازی ارتعاشات و کاهش دامنه ارتعاشات انتقال یافته به بدنه ناشی از نیروهای نابالانسی موتور، افزایش راحتی مسافران با کاهش ارتعاشات وارده از طرف موتور، جلوگیری از جابجایی نسبی زیاد بین موتور و بدنه و جلوگیری از حرکات جلو و عقب موتور در اثر اینرسی موتور هنگام شتاب‌گیری و ترمز کردن خودرو است [2].

دسته موتورهای هیدرولیکی از دیدگاه کنترل خصوصیات دینامیکی به سه دسته دسته موتورهای غیرفعال، شبه‌فعال و فعال تقسیم‌بندی می‌شوند [2،1]. اکثر پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه دسته موتورها بر روی دسته موتورهای غیرفعال تمرکز یافته است. البته با توجه به آن که اساس انواع دیگر، بر پایه این نوع دسته موتورها می‌باشد، این امر بدیهی است. مدل‌سازی‌های خطی و غیرخطی دسته موتورها، ارائه طراحی‌های جدید با کارایی بیشتر، مدل‌سازی اجزاء محدود دسته موتورها و بهینه‌سازی طراحی‌های صورت گرفته برای رسیدن به حداقل انتقال ارتعاشات و نویز بخش اعظمی از مقالات مربوط به دسته موتورهای غیرفعال را تشکیل می‌دهند [3-8]. یکی از دلایل اهمیت یافتن دسته موتورهای غیرفعال در آن است که با ایجاد تغییر در خصوصیات و ویژگی‌های آنها می‌توان دسته موتورهای شبه‌فعال را شبیه‌سازی و طراحی نمود. پژوهش‌های صورت گرفته در مورد دسته موتورهای شبه‌فعال بیشتر بر پایه تغییر در خصوصیات و ویژگی‌های دسته موتورهای غیر فعال خصوصاً سفتی و استهلاک و بررسی اثرات آنها بر روی رفتار دینامیکی دسته موتورهای شبه‌فعال بوده است. یکی از راه‌های ایجاد تغییر در خصوصیات دسته موتورهای غیرفعال، استفاده از سیالات هوشمند نظیر سیال مگنتورئولوژیکال<sup>1</sup> در آنها است. این سیالات سوسپانسیون‌های غیر همگن از ذرات میکرونی قطبی هستند، که در اثر اعمال یک میدان خارجی، ساختاری زنجیروار به وجود می‌آورند. زنجیره ایجاد شده از ذرات، موازی با جهت میدان بوده و عبور جریان سیال را محدود می‌کنند. سیالات مگنتورئولوژیکال از ذرات مخلوط شده آهن با ابعاد میکرون در سیال حامل (مانند آب، گلیکول و یا روغن‌های هیدروکربنی) تشکیل یافته‌اند و معمولاً در یکی از سه حالت نشان داده شده در شکل 1 در وسایل به کار گرفته می‌شوند [9].

از جمله پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه استفاده از سیالات مگنتورئولوژیکال در دسته موتورهای هیدرولیکی می‌توان به بررسی کارایی دسته موتور غیرفعال با بهره‌گیری از این نوع سیال (که با اعمال جریان، مسیر عبور سیال بین دو محفظه باز و بسته می‌شود)، اشاره کرد [10]. در این مقاله نشان داده شده است که سختی لاستیک، سطح مؤثر پیستون و سختی حجمی لاستیک تأثیر زیادی بر کارایی دسته موتور در این حالت دارد. در این پژوهش از حالت جریان سیال (شکل 1- ج) برای به کارگیری سیال استفاده شده است. چوبی و همکارانش [11] دسته موتور شبه فعال با سیال مگنتورئولوژیکال برای نصب بر روی خودروها ارائه دادند. از ویژگی مهم پژوهش آنها استفاده از مدل کامل خودرو برای بررسی عملکرد دسته موتور طراحی شده بود. الگوریتم مورد استفاده برای کنترل در این پژوهش بر مبنای کنترل اسکای‌هوک بود.

2- Lord Company  
3- Inertia track

1- Magneto-Rheological Fluid

عبور سیال از این مجرا سخت‌تر می‌شود. در نتیجه سیال مجبور به عبور از مسیر اینرسی شده و استهلاک سیستم زیاد می‌شود. در تحریک‌های ارتعاشی فرکانس بالا و دامنه کم، که برای جداسازی ارتعاشات داشتن سختی و استهلاک پایین مطلوب است، میدان مغناطیسی اعمالی حذف شده و شیر مگنتورئولوژیکال باز می‌گردد. در این حالت به علت مقاومت کمتر این مسیر برای عبور جریان سیال (به دلیل کوتاه‌تر بودن طول مسیر و سطح مقطع بیشتر آن)، سیال عمدتاً از آن عبور کرده و در نتیجه سفتی و استهلاک سیستم تقریباً مانند الاستومر اصلی دسته موتور شده و در مجموع سفتی دینامیکی دسته موتور نسبت به حالت قبل کمتر خواهد بود.

### 3- استخراج روابط حاکم بر مسأله

برای یافتن معادلات حاکم بر مسأله از روش باند گراف [15] استفاده شده است. شکل 4، مدل باند گراف دسته موتور مورد بحث را نشان می‌دهد.

با توجه به مدل باند گراف، معادلات حاکم بر مسأله به صورت روابط (1) - (5) حاصل می‌شود.

$$q_5 = V_{in} - V_0 \quad (1)$$

$$q_8 = A_p(V_{in} - V_0) - \frac{P_{10}}{I_{10}} - \frac{P_{16}}{I_{16}} \quad (2)$$

$$P_{10} = \frac{q_8}{C_8} - R_{11} \frac{P_{10}}{I_{10}} - \frac{q_{18}}{C_{18}} \quad (3)$$

$$P_{16} = \frac{q_8}{C_8} - R_{15} \frac{P_{16}}{I_{16}} - \frac{q_{18}}{C_{18}} \quad (4)$$

$$q_{18} = \frac{P_{10}}{I_{10}} + \frac{P_{16}}{I_{16}} \quad (5)$$

در روابط فوق  $q_5$  جابجایی نسبی بر روی دسته موتور،  $q_8$  تغییر حجم محفظه بالایی،  $q_{18}$  تغییر حجم محفظه پایینی،  $P_{10}$  انتگرال زمانی افت فشار درون مسیر اینرسی و  $P_{16}$  انتگرال زمانی افت فشار درون شیر مگنتورئولوژیکال است.

در حالت وجود میدان مغناطیسی معادله (4) به صورت رابطه (6) اصلاح می‌شود.

$$P_{16} = \frac{q_8}{C_8} - R_{15} \frac{P_{16}}{I_{16}} - \frac{q_{18}}{C_{18}} - \Delta P_{MR} \text{sign}(P_{16}) \quad (6)$$

که در آن  $\Delta P_{MR}$  افت فشار وابسته به میدان مغناطیسی اعمالی درون شیر مگنتورئولوژیکال می‌باشد. طبق مرجع [16]، افت فشار در شیر مگنتورئولوژیکال از رابطه (7) قابل محاسبه است.

$$\Delta P_{MR} = \frac{c\tau(H)L_v}{g} \quad (7)$$

در این رابطه  $L_v$  و  $g$  به ترتیب طول مسیر و اختلاف شعاع مسیر حلقوی را نشان می‌دهند. پارامتر  $c$  در رابطه (7) عدد ثابتی بین 2 تا 3، بسته به شرایط جریان حالت دائم می‌باشد که در این مطالعه با توجه به شرایط جریان کم مقدار 2 انتخاب شده است. تنش تسلیم سیال مگنتورئولوژیکال که تابعی از میدان مغناطیسی ( $H$ ) می‌باشد با  $\tau(H)$  در رابطه (7) نشان داده شده است.

این کمیت مطابق مرجع [14] از رابطه (8) قابل محاسبه است.

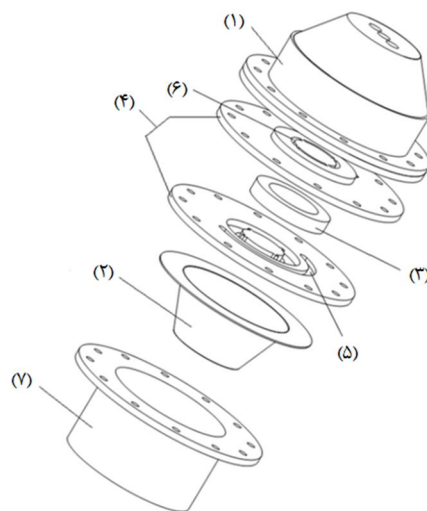
$$\tau(H) = C \cdot 2.717 \times 10^5 \cdot \Phi^{1.5239} \cdot \tanh(6.33 \times 10^{-6} \cdot H) \quad (8)$$

در این رابطه  $C$  عدد ثابت (1) برای سیال بر پایه روغن و  $1/16$  برای سیال بر پایه گلیکول است،  $\Phi$  درصد ذرات آهن را نشان می‌دهد و  $H$  میدان مغناطیسی بر حسب آمپر بر متر می‌باشد.

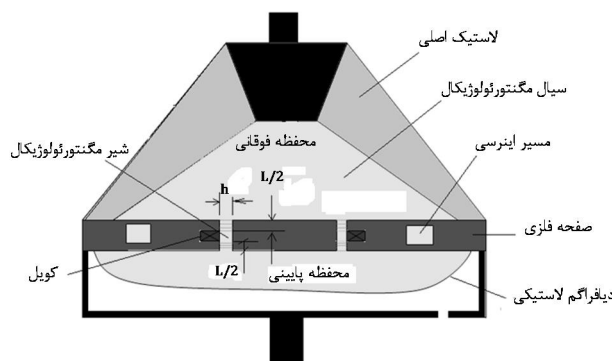
نیروی انتقال یافته به بدنه با فرض  $V_0 = 0$  از رابطه (9) قابل دستیابی است.

$$F_{in} = \frac{q_5}{C_5} + R_4 V_{in} + A_p \frac{q_8}{C_8} \quad (9)$$

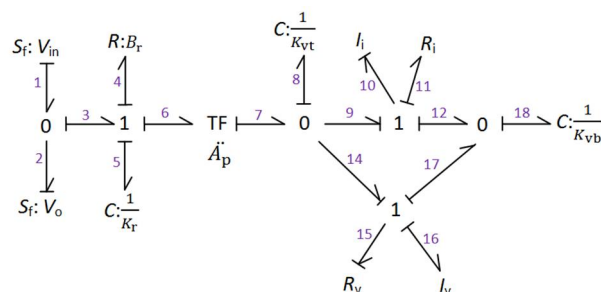
شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، برای سفتی دینامیکی (نسبت نیروی انتقال یافته به جابجایی موتور برابر  $(K^* = F_{in}/X_{in})$ ) و انتقال پذیر  $(T_d = V_{in}/V_0)$  در حالت خطی با تبدیل لاپلاس گیری از معادلات فوق به دست آمده است.



شکل 2 نمای انفجاری دسته موتور طراحی شده



شکل 3 شماتیک دسته موتور مگنتورئولوژیکال (طرح برگرفته شده از ایده مرجع [14])



شکل 4 مدل باند گراف دسته موتور مگنتورئولوژیکال

سیال مگنتورئولوژیکال از طریق دو مسیر متفاوت تعبیه شده در صفحه میانی بین محفظه‌ها نوسان می‌کند. مسیر اول (مسیر اینرسی در شکل 3) مسیر حلقوی باریک و طولی است که برای افزایش استهلاک دسته موتور در فرکانس‌های تحریک پایین و تحریک‌های ضربه‌ای به کار گرفته می‌شود. مسیر دوم (شیر مگنتورئولوژیکال در شکل 3) به شکل یک اریفیس می‌باشد که دارای سطح مقطع بیشتر و طول کمتری نسبت به مسیر اینرسی است. مقاومت این مسیر در برابر عبور سیال به وسیله میدان مغناطیسی قابل تنظیم است.

در تحریک‌های فرکانس پایین و ضربه‌ای (که دسته موتور نیازمند سختی و استهلاک بالایی است)، در اثر اعمال میدان مغناطیسی، سیال مگنتورئولوژیکال فعال شده و ذرات آهن موجود در آن به گونه‌ای جهت خود را نسبت به میدان اعمالی تنظیم می‌کنند که مسیر شیر مگنتورئولوژیکال تقریباً مسدود می‌شود. با افزایش شدت میدان مغناطیسی اعمالی، مسیر بیشتر مسدود شده و در نتیجه

اندازه‌گیری شده است.

سیال مگنتورئولوژیکال مهم‌ترین قسمت دسته موتور مگنتورئولوژیکال می‌باشد. این نوع سیال به صورت تجاری توسط شرکت‌هایی مانند شرکت لرد (در کشور آمریکا) تولید می‌شود. با توجه به عدم دسترسی به سیال‌های تجاری مگنتورئولوژیکال، برای ادامه کار از یک روش ساخت ساده، مطابق مرجع [18]، برای ساخت سیال مگنتورئولوژیکال استفاده شده است. ذرات پودر آهن کربونیل 10 میکرونی با خلوص 99/5% در مقداری روغن دارای ویسکوزیته نسبتاً پایین (روغن بهران دوخت 10)، مخلوط شدند. مشخصات روغن مورد استفاده در جدول 1 نشان داده شده است [19]. پیش از اضافه کردن پودر آهن به روغن هیدروکربنی، مقداری گریس پایه لیتیم به منظور پایدارتر کردن سیال مگنتورئولوژیکال و جلوگیری از رسوب زود هنگام ذرات پودر آهن، در روغن حل می‌شود. پس از انجام مراحل فوق، تا رسیدن به سیالی همگن، تکان دادن مخلوط ادامه می‌یابد. مقادیر وزنی ترکیبات مورد استفاده برای ساخت 100 میلی‌لیتر سیال مگنتورئولوژیکال در جدول 2 آورده شده است. طبق مرجع [18]، سیال مگنتورئولوژیکال ساخته شده، دارای خواصی شبیه سیال MRF-122-2ED می‌باشد [19]، ولی یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های سیال ساخته شده با محصول شرکت لرد، تفاوت در زمان رسوب ذرات آهن می‌باشد. در نمونه ساخته شده ذرات بعد از چند دقیقه رسوب می‌کنند و برای همگن نگه‌داشتن آن بایستی آن را در فواصل زمانی مشخصی تکان داد. پس از آماده‌سازی و مونتاژ دسته موتور، دسته موتور با سیال مگنتورئولوژیکال ساخته شده پر شده و تست‌ها بر روی آن انجام شد. (پرو کردن دسته موتور از سیال به صورت دستی صورت گرفته است اما این روش، مناسب‌ترین روش پر کردن سیال نیست، چرا که امکان نفوذ هوا درون دسته موتور به وجود می‌آید، آدیجونا [20] پیشنهاد کرده است برای جلوگیری از ورود حباب هوا به داخل دسته موتور، عملیات مونتاژ درون حوضچه‌ی پر از روغن انجام شود.)

برای تعیین مقادیر پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی ارتعاشی دسته موتور هیدرولیکی مگنتورئولوژیکال از روش تجربی، المان محدود و روابط تئوری استفاده شده است.

تنش برشی برای نرخ برش‌های متفاوت سیال مگنتورئولوژیکال ساخته شده در دمای محیط، توسط دستگاه ویسکومتر اندازه‌گیری شده است. شکل 6، نمودار تنش برشی سیال بر حسب نرخ برش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است شیب این نمودار معرف ویسکوزیته مطلق سیال می‌باشد. معادله خط منطبق شده بر نقاط (خط‌چین در شکل 6) به صورت  $\tau = 0.108 D$  است. ضریب همبستگی خط رسم شده برابر 0/997 می‌باشد که بسیار به یک نزدیک است. بنابراین طبق آزمایش ویسکوزیته مطلق سیال ساخته شده برابر 0/108 پاسکال ثانیه در دمای محیط (20 درجه سانتی‌گراد) است.

چگالی سیال نیز با استفاده از اندازه‌گیری حجم مشخصی از سیال صورت پذیرفته است. با توجه به اندازه‌گیری انجام شده چگالی سیال برابر 2648 کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد.

سختی لاستیک با کمک دستگاه اندازه‌گیری سختی شور A برابر 70 شور A به دست آمد. بر این اساس و طبق مرجع [21]، زاویه استهلاک معادل 11/7 درجه در نظر گرفته شد. ضریب فنری استاتیکی لاستیک با اندازه‌گیری جابجایی لاستیک تحت اعمال بار برابر 500 نیوتن بر میلیمتر برآورد شده است. بر اساس مرجع [22]، ضرایب مدل دو ثابت مونی-ریولین بر حسب سختی لاستیک برای تعیین خصوصیات لاستیک در نرم‌افزارهای المان محدود مطابق جدول 3 در نظر گرفته شده است.



شکل 5 دسته موتور مگنتورئولوژیکال ساخته شده

#### 4- تست ارتعاشی و مقایسه‌ی نتایج با شبیه‌سازی

دسته موتور ساخته شده در شکل 5 نشان داده شده است. لاستیک اصلی متشکل از یک قسمت کاملاً لاستیکی می‌باشد که یک حلقه فلزی (آهنی) محیط آن را احاطه کرده است و از قسمت بالا نیز به یک اتصال فلزی (آهنی) مخروطی شکل متصل شده است. حلقه فلزی به منظور افزایش استحکام قسمت لاستیکی در برابر بار وارد بر دسته موتور طراحی شده است. اتصال مخروطی شکل فلزی نیز جهت اتصال دسته موتور به موتور (یا وزنه‌ای که بر روی دسته موتور قرار می‌گیرد) تعبیه شده است. دسته موتور پس از مونتاژ، از سوراخ تعبیه شده در این قسمت توسط سیال مورد نظر پر می‌شود. انتخاب جنس لاستیک نیاز به توجه ویژه‌ای دارد. نظر به استفاده از روغن هیدروکربنی به عنوان پایه‌ی سیال مگنتورئولوژیکال، باید جنس لاستیک به گونه‌ای انتخاب شود که در مقابل روغن هیدروکربنی مقاومت بالایی داشته باشد تا سطح لاستیک در طول استفاده دچار خوردگی نشود [17]. از این رو لاستیک نیتریل بوتادین<sup>1</sup> به عنوان جنس لاستیک مورد انتخاب واقع شده است. سازگاری انواع جنس‌های لاستیک در برابر مواد مختلف در مرجع [17] تشریح شده است. لازم به ذکر است که کلیه قسمت‌های لاستیک اصلی (اعم از حلقه، اتصال فلزی و لاستیک) به صورت یکپارچه هستند، به گونه‌ای که پس از ساخت قالب تزریق لاستیک مورد نظر حلقه و اتصال فلزی در داخل قالب قرار گرفته و سپس لاستیک به داخل قالب تزریق شده است.

همان‌گونه که پیشتر نیز اشاره شد، سیال از طریق دو مسیر متمایز (مسیر اینرسی و شیر مگنتورئولوژیکال) بین محفظه‌های بالایی و پایینی دسته موتور، در نوسان است. بدین منظور دو صفحه فلزی (عضو شماره 4 در شکل 2) جهت تعبیه مسیر اینرسی و شیر مگنتورئولوژیکال در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، مکانی نیز درون این صفحات برای جاسازی سیم‌پیچ در اطراف شیر مگنتورئولوژیکال منظور شده است. سیم‌پیچ (عضو شماره 3 در شکل 2) با استفاده از سیم مسی، به شکل گرد با سطح مقطع مربعی پیچیده شده است. این سیم‌پیچ از 180 دور سیم تشکیل شده و سطح مقطع آن برابر  $10 \times 10$  میلی‌متر مربع است. سیم مورد استفاده دارای قطر 0/6 میلی‌متر و دارای عایق (به منظور جلوگیری از ایجاد اتصال کوتاه) می‌باشد. ضریب القائی سیم‌پیچ برابر 2/74 میلی‌هانری و مقاومت الکتریکی آن برابر 4 اهم

1- Nitrile Butadiene Rubber (NBR)

**جدول 4** پارامترهای دسته موتور ساخته شده

مقادیر	کمیت
$1/229 \times 10^7$	اینرسی سیال در مسیر اینرسی $(\frac{Ns^2}{m^5})$
$3/351 \times 10^8$	مقاومت سیال در مسیر اینرسی $(\frac{Ns}{m^5})$
$2/020 \times 10^5$	اینرسی سیال در شیر مگنتورئولوژیکال $(\frac{Ns^2}{m^5})$
$5/506 \times 10^6$	مقاومت سیال در شیر مگنتورئولوژیکال $(\frac{Ns}{m^5})$
$2/014 \times 10^{-3}$	سطح مؤثر لاستیک $(m^2)$
$2/11 \times 10^{10}$	سفتی حجمی محفظه فوقانی $(\frac{N}{m^3})$
$4/947 \times 10^5$	سفتی استاتیکی لاستیک $(\frac{N}{m})$

پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی ارتعاشی دسته موتور در جدول 4 آمده است. سفتی حجمی لاستیک از روش المان محدود و با اندازه‌گیری انرژی کرنشی ذخیره شده در لاستیک محاسبه شده است. سطح مؤثر لاستیک نیز با استفاده از روش المان محدود به دست آمده است. در این روش با اعمال جابجایی مشخص  $\Delta x$  و تعیین تغییر حجم محفظه سیال  $(\Delta V)$ ، سطح مؤثر لاستیک از رابطه  $A_p = \Delta V / \Delta x$  حاصل شده است.

برای محاسبه اینرسی سیال و استهلاک سیال از روابط تئوری کمک گرفته شده است. اینرسی ایجاد شده در اثر حرکت سیال درون مسیر اینرسی با استفاده از قوانین مکانیک سیالات به صورت رابطه (10) محاسبه می‌شود [23].

$$I_f = \frac{\rho L}{A} \quad (10)$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی سیال،  $L$  طول مسیر و  $A$  سطح مقطع عبور سیال است.

معادله افت فشار خطی در اثر استهلاک سیال، به صورت رابطه (11) است [23].

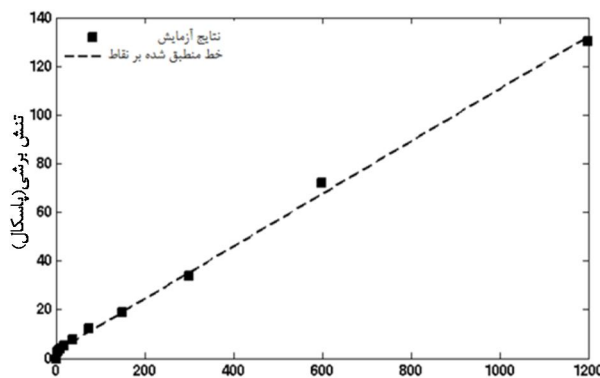
$$\Delta P = R_f Q \quad (11)$$

در این رابطه  $R_f$  برای سطح مقطع حلقوی از رابطه (12) بدست می‌آید.

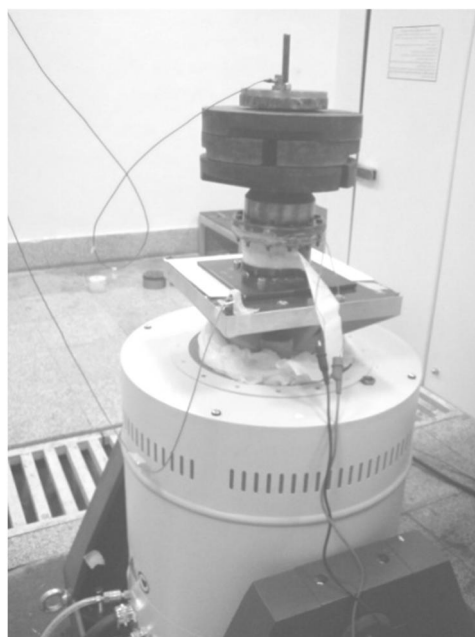
$$R_f = \frac{8\mu L}{\pi d g^3 \left(1 - \frac{d}{a}\right)} \quad (12)$$

در این روابط  $d$  قطر مسیر و  $g$  اختلاف شعاع دو سطح مسیر حلقوی است. برای تست دسته موتور از لرزاننده نشان داده شده در شکل 7 استفاده شده است. با استفاده از این تجهیز تنها امکان اندازه‌گیری شتاب در دو نقطه یعنی روی وزنه‌ها و پایه میسر می‌باشد و امکان تعیین تجربی نیروی انتقال یافته به بدنه توسط سنسورهای نیرو وجود ندارد. شکل 7، دسته موتور مونتاژ شده بر روی لرزاننده را نشان می‌دهد. داده‌برداری توسط دو شتاب‌سنج که یکی بر روی پایه و دیگری بر روی وزنه  $32/5$  کیلوگرمی قرار داده شده، انجام شده است.

برای بررسی کارایی دسته موتور نسبت این دو شتاب در نمودارهای رسم شده در ادامه آورده شده است و با مدل‌سازی ارتعاشی مقایسه شده است. شکل 8، نسبت شتاب وزنه به شتاب پایه را در حالت اعمال ارتعاشات سینوسی با دامنه 1 میلی‌متر در گستره فرکانسی 5 تا 40 هرتز نشان می‌دهد. در این حالت دسته موتور خالی از سیال است. به عبارتی نتیجه مانند حالت دسته موتور با الاستومر ساده است. با توجه به این شکل و طبق رابطه‌ی سفتی دینامیکی لاستیک بر حسب سفتی استاتیکی آن [24]، سفتی دینامیکی لاستیک با در نظر گرفتن ضریب تصحیح  $1/6$  برابر با 800 نیوتن بر میلی‌متر نتیجه می‌شود. در شکل 9، نسبت شتاب وزنه به شتاب پایه، در حالت اعمال ارتعاشات سینوسی با دامنه 1 میلی‌متر در گستره فرکانسی 5 تا 40 هرتز، برای دسته موتور پر شده از سیال مگنتورئولوژیکال بدون اعمال جریان نشان داده شده است.



شکل 6 نمودار تنش برشی سیال مگنتورئولوژیکال بر حسب نرخ برش



شکل 7 دسته موتور قرار گرفته بر روی لرزاننده

جدول 1 مشخصات فیزیکی - شیمیایی روغن مورد استفاده برای ساخت سیال مگنتورئولوژیکال [19]

ویسکوزیته در 100 درجه سلسیوس	2 cSt
شاخص ویسکوزیته	105
چگالی در 15 درجه سلسیوس	900 kg/m <sup>3</sup>

جدول 2 مقادیر وزنی ترکیبات مورد استفاده برای ساخت سیال مگنتورئولوژیکال [18]

مقدار وزنی	ترکیبات
150 گرم	پودر آهن
55 گرم	روغن پایه هیدروکربنی
5 گرم	گریس

جدول 3 ضرایب مدل دو ثابت مونی-ریولین بر اساس سختی لاستیک [21]

سختی شور A	مدول الاستیسیته یانگ $(N/mm^2)$	مدول برشی $(N/mm^2)$	$C_{10} (N/mm^2)$	$C_{01} (N/mm^2)$
40	1/381	0/452	0/181	0/045
50	2/397	0/755	0/302	0/076
60	4/268	1/185	0/474	0/118
70	7/289	1/839	0/736	0/184

از جدول 4 استفاده شده است. در شبیه‌سازی دوم، سفتی حجمی کاهش یافته در اثر وجود حباب‌های هوا درون سیال در نتایج لحاظ شده است. این اثر در مراجع دیگر نیز مورد توجه قرار گرفته است [20.5]. مقدار سفتی حجمی در این حالت برابر  $5.5e9 \text{ N/m}^5$  در نظر گرفته شده است. نسبت انتقال‌پذیری برای حالت اعمال جریان 3 آمپر در شکل 10 ترسیم شده است. در این حالت در واقع، مسیر شیر مگنتورئولوژیکال بسته شده و تنها راه عبور سیال بین دو محفظه مسیر اینرسی خواهد بود.

اختلاف‌های موجود در نتایج تئوری و تجربی را می‌توان در موارد زیر

تقسیم‌بندی نمود:

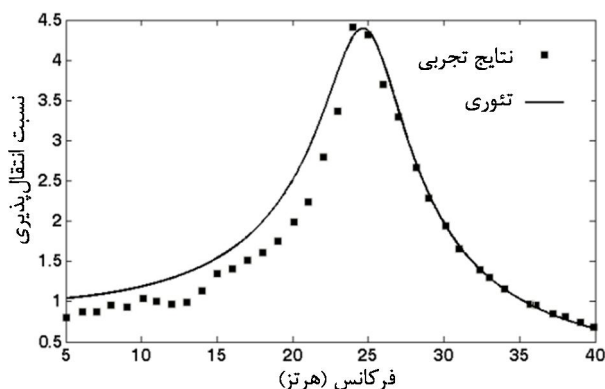
الف) عدم در دسترس بودن سیال تجاری مگنتورئولوژیکال با خواص مکانیکی و سیالاتی مناسب. با توجه به عدم وجود شرکت‌های متنوع تولید کننده این محصول، سیال مگنتورئولوژیکال با استفاده از دستورالعمل ارائه شده در مرجع [18] ساخته شده است. ویژگی‌های سیال‌های تجاری از جمله همگن بودن سیال برای مدت طولانی از تفاوت‌های بارز سیال ساخته شده با سیالات تجاری است.

ب) حباب‌های هوای موجود درون محفظه‌های سیال ناشی از پر کردن دستی دسته موتور و همچنین تکان دادن سیال ساخته شده‌ی مگنتورئولوژیکال برای همگن ماندن. وجود حباب هوا درون محفظه‌ها، با فرض عدم تراکم‌پذیری سیال همگام نمی‌باشد و در واقع باعث کاهش سفتی حجمی لاستیک خواهد شد. در تعدادی از پژوهش‌های انجام شده با استفاده از نتایج تجربی، اثرات این پدیده در شبیه‌سازی‌ها دخالت داده شده است [20.5].

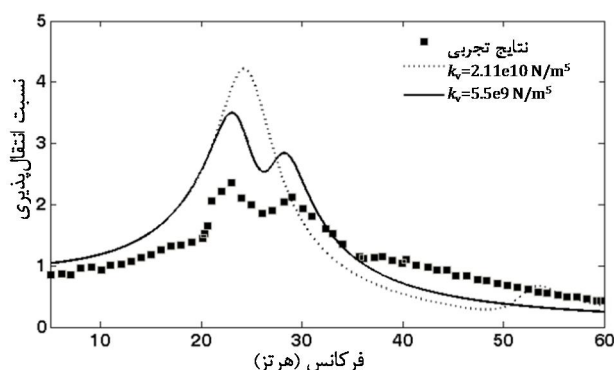
سفتی دینامیکی دسته موتور در حالت‌های مختلف، بر اساس شبیه‌سازی عددی در شکل 11 نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، دسته موتور در حالت روشن در فرکانس‌های پایین استهلاک زیادی را ایجاد می‌کند. در حالی که در حالت خاموش استهلاک زیاد در فرکانس‌های پایین رخ نمی‌دهد. البته برای استفاده از دسته موتور در موارد عملی، فرکانس فاق دسته موتور (فرکانسی که در آن سفتی دینامیکی کمینه است) در حالت خاموش بایستی به گونه‌ای طراحی شود که در انتهای گستره‌ی کاری موتور قرار داده شود تا بهترین حالت جداسازی ارتعاشات در بازه کاری موتور به وجود آید و از ایجاد تشدید ناشی از فرکانس قله در منحنی سفتی دینامیکی جلوگیری به عمل آید.

## 5- نتیجه‌گیری

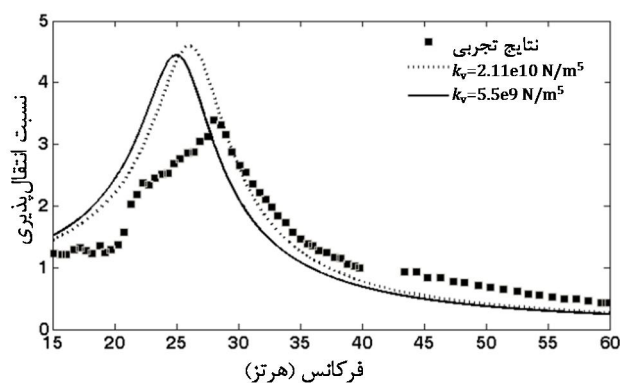
در این مقاله به بررسی دسته موتور هیدرولیکی شبه‌فعال مگنتورئولوژیکال پرداخته شد. در این دسته موتور از خاصیت تغییر در استهلاک سیال مگنتورئولوژیکال تحت میدان مغناطیسی، برای ایجاد تغییر در سفتی دینامیکی دسته موتور استفاده شد. روابط حاکم بر مساله استخراج گردید و نتایج حاصل از مدل ارتعاشی با نتایج تجربی برای دو حالت میدان مغناطیسی فعال و غیرفعال مورد مقایسه قرار گرفت. در حالت عدم اعمال میدان مغناطیسی که در تحریک‌های ارتعاشی فرکانس بالا و دامنه کم کاربرد دارد، شیر مگنتورئولوژیکال باز می‌گردد. در این حالت به علت مقاومت کمتر این مسیر برای عبور جریان سیال، سیال عمدتاً از آن عبور کرده و در نتیجه سختی و استهلاک سیستم تقریباً مانند الاستومر اصلی دسته موتور گردید. در حالت اعمال میدان مغناطیسی که در تحریک‌های فرکانس پایین و ضربه‌ای (که دسته موتور نیازمند سختی و استهلاک بالایی می‌باشد) کاربرد دارد، سیال مگنتورئولوژیکال فعال شده و عبور سیال از مجرای تحت میدان مغناطیسی سخت‌تر می‌گردد. در نتیجه سیال مجبور به عبور از مسیر اینرسی



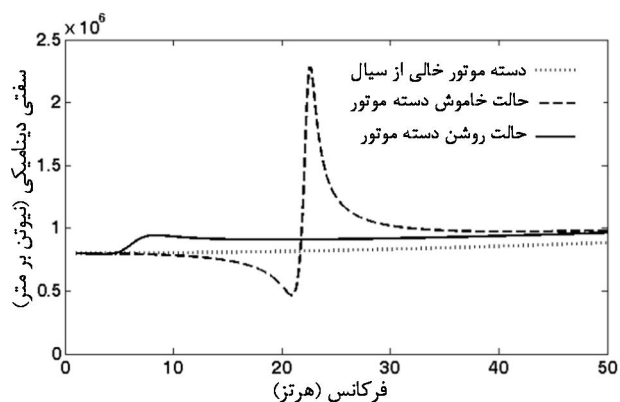
شکل 8 نسبت شتاب وزنه به شتاب پایه برای دسته موتور خالی از سیال



شکل 9 نسبت شتاب وزنه به شتاب پایه برای دسته موتور بدون اعمال جریان



شکل 10 نسبت شتاب وزنه به شتاب پایه برای دسته موتور در حالت اعمال جریان 3 آمپر



شکل 11 سفتی دینامیکی دسته موتور در حالت‌های مختلف

در این شکل نتایج تجربی با دو شبیه‌سازی مقایسه شده است، در شبیه‌سازی اول بدون توجه به تغییر سفتی حجمی در اثر وجود حباب‌های هوا درون سیال، نمودار انتقال‌پذیری رسم شده است. در این حالت مقدار سفتی حجمی

شده و استهلاک سیستم زیاد می‌شود. در این حالت سفتی دینامیکی دسته موتور نسبت به حالت قبل بیشتر خواهد بود.

## 6- مراجع

- [12] M. Brigley, Y. T. Choi, N. M. Wereley, S. B. Choi, Magnetorheological Isolators Using Multiple Fluid Modes, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 18, pp. 1143-1148, 2007.
- [13] S. Arzanpour, M. F. Golnaraghi, A Novel Semi-active Magnetorheological Bushing Design for Variable Displacement Engines, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 19, pp. 989-1003, 2008.
- [14] D. E. Barber, J. D. Carlson, Performance characteristics of prototype MR engine mounts containing glycol MRfluids, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 15, pp. 1509-1516, 2010.
- [15] M. Amalendu, and A. K. Samantaray, *Bond graph in modeling, simulation and fault identification*, IK International Pvt Ltd, 2006
- [16] J. D. Carlson, D. M. Catanzarite, K. A. S. Clair, Commercial magneto-rheological fluid devices, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 10, pp. 2857-2865, 1996.
- [17] D. R. Kalivoda, *Vibration, Shock and Motion Control Products in Lord Catalogue*, 2000
- [18] J. D. Carlson, *Do-It- Yourself Magnetorheological Fluid*, Lord Corporation, 2004.
- [19] Accessed 05/18/2014; [http://www.behranoil.com/behran\\_new/fa/Default.asp](http://www.behranoil.com/behran_new/fa/Default.asp).
- [20] H. Adiguna, M. Tiwari, R. Singh, H. E. Tseng, D. Hrovat, Transient response of a hydraulic engine mount, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 268, No. 2, pp. 217-248, 2003.
- [21] Y. Q. Zhang, W. B. Shangguan, A novel approach for lower frequency performance design of hydraulic engine mounts, *Computers and Structures*, Vol. 84, No. 8-9, pp. 572-584, 2006.
- [22] P. Altidis, B. Warner, *Analyzing hyperelastic materials with some practical considerations*, Midwest ANSYS users group, 2005.
- [23] R. L. Wood, K. L. Lawrence, *Modeling and Simulation of Dynamic Systems*: Prentice Hall, 1997.
- [24] J. J. Kim, H. Y. Kim, Shape design of an engine mount by a method of parameter optimization, *Computers and Structures*, Vol. 65, No. 5, pp. 72, 731-5, 1997.
- [1] Y. Yu, S. M. Peelamedu, N. G. Naganathan, R. V. Dukupati, Automotive Vehicle Engine Mounting Systems: A Survey, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 123, pp. 186-194, 2001.
- [2] G. N. Jazar, F. Golnaraghi, Engine Mounts for Automotive Applications: A Survey, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 34, No. 5, pp. 363-379, 2002.
- [3] J. Christopherson, G. N. Jazar, Dynamic behavior comparison of passive hydraulic engine mounts. Part 2: Finite element analysis, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 290, No. 3, pp. 1071-1090, 2006.
- [4] M. F. Golnaraghi, G. N. Jazar, Development and analysis of a simplified nonlinear model of a hydraulic engine mount, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 7, No. 4, pp. 495-526, 2001.
- [5] G. Kim, R. Singh, Nonlinear Analysis of Automotive Hydraulic Engine Mount, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme*, Vol. 115, No. 3, pp. 482-487, 1993.
- [6] R. Singh, G. Kim, P. Ravindra, Linear analysis of automotive hydro-mechanical mount with emphasis on decoupler characteristics, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 158, No. 2, pp. 219-243, 1992.
- [7] R. Tikani, N. Vahdati, S. Ziaei-Rad, M. Esfahanian, A new hydraulic engine mount design without the peak frequency, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 17, No. 11, pp. 1644-1656, 2011.
- [8] N. Vahdati, Double-notch single-pumper fluid mounts, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 285, No. 3, pp. 697-710, 2005.
- [9] M. R. Jolly, J. W. Bender, J. D. Carlson, Properties and applications of commercial magnetorheological fluids, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, No. 1, pp. 5-13, 1999.
- [10] M. Ahmadian, Y. K. Ahn, Performance Analysis of Magneto-Rheological Mounts, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, No. 3, pp. 248-256, 1999.
- [11] S. B. Choi, H. H. Lee, H. J. Song, J. S. Park, Vibration Control of a Passenger Car Using MR Engine Mounts, *Smart Structures and Materials*, Vol. Proceedings of SPIE Vol. 4701, 2002.