مقاله

مطالعهٔ ارتعاشات موتور و بررسی نقش دسته‌موتورها در بهبود عملکرد خودرو

علی مهرکیش
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشکدهٔ فنی و مهندسی
دانشگاه فردوسی مشهد
ali.mehrkish@yahoo.com

مسعود طهانی
استاد گروه مهندسی مکانیک
دانشکدهٔ فنی و مهندسی
دانشگاه فردوسی مشهد
m_tahani@yahoo.com

محمدمهدی رفیعی
دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک
دانشکدهٔ فنی و مهندسی
دانشگاه فردوسی مشهد
mohamadmahdi.rafiee@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۲۷

چکیده

اصولاً ویژگی‌هایی چون راحتی سرنشین، پایداری و کیفیت رانندگی از جمله شاخص‌های اساسی و مهم در عملکرد هر وسیلهٔ نقلیه محسوب می‌شوند. به‌همین دلیل، موضوعات مرتبط با دانش ارتعاشات مکانیکی و دینامیک خودرو از جمله مباحث مورد اهمیت در صنعت طراحی و ساخت خودرو به‌شمار می‌روند. به‌طور کلی دو منبع عمدهٔ تحریک که سبب پیدایش ارتعاشات نامطلوب می‌شوند، عبارت‌اند از نامیزانی[۱] موتور و تحریک ناشی از ناهمواری‌های جاده؛ تحریک‌هایی که مستقیماً به بدنهٔ خودرو وارد و از طریق دسته‌موتورها[۲] به خط انتقال قدرت منتقل می‌شوند. با توجه به اینکه منبع تولید قدرت، خود از جمله منابع تولید نوسانات و ارتعاشات است و می‌تواند سبب ایجاد خلل در عملکرد خودرو شود، تاکنون تحقیقات گسترده‌ای جهت بررسی دلائل بروز ارتعاشات موتور و روش‌های کاهش آن انجام شده است. این در حالی است که همچنان حوزه‌های بررسی‌نشدهٔ فراوانی در موضوع مدلسازی و جداسازی[۳] ارتعاشات وجود دارد. این مقاله برآمده از تحقیقات انجام‌شده پیرامون مبحث مهمی چون ارتعاشات موتور و روش‌های مهار و کنترل آن است. در این مقاله مطالعات انجام‌شده در زمینهٔ مدلسازی دسته‌موتور و ارتعاشات آن مرور و خلأ تحقیقاتی موجود جهت مطالعات آتی بیان شده است. همچنین با پژوهش در مدلسازی‌های انجام‌شده در مسیر مدلسازی ارتعاشی، ضمن بررسی مسیر توسعهٔ مدلسازی در دسته‌موتورهای ارتجاعی[۴]، هیدرولیکی[۵]، شبه‌فعال[۶] و فعال[۷]، الگوریتم مدلسازی دسته‌موتور نیز ارائه شده است.

واژگان کلیدی: نامیزانی موتور، ارتعاشات موتور، مدلسازی، جداسازی، دسته‌موتور، فعال، ارتجاعی، شبه‌فعال

۱. مقدمه

از جمله مشکلات اساسی در طراحی وسائل نقلیه، جداسازی ارتعاشات در اجزای موتور بوده است. طی سالیان گذشته توجه به ارتقای خواص عملکردی خودرو سبب شده است تا جداسازی ارتعاشات موتور به موضوع بسیار مهمی تبدیل

شود [۱]. امروزه دستیابی به ویژگی‌های ارتعاشی مناسب‌تر، ضرورت استفاده از دسته‌موتورهای فعال را دوچندان کرده است. همین امر نیز سبب شده است تا بیشتر مطالعات و پژوهش‌ها به موضوع دسته‌موتورهای فعال و شبه‌فعال و اصلاح ایرادها و بهبود عملکرد آنها معطوف شود. موضوعی که جنبه‌های گوناگونی چون مدلسازی‌های نو، آزمایش‌های متنوع و تحلیل‌های گوناگون روی دسته‌موتور فعال را به‌همراه داشته است.

۲. جایگاه دینامیک و ارتعاشات در صنعت خودرو

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، از جمله مباحث مطرح در صنعت خودروسازی - که سهم بسزایی در جلب رضایت مشتریان و افزایش کیفیت خودرو دارد - مسائل دینامیکی و ارتعاشی خودرو است. در یک نگاه کلی می‌توان این مسائل را به دو گروه عمده تقسیم‌بندی کرد: در گروه نخست، نقش و عملکرد اجزای اثرگذار بر ارتعاشات خودرو بررسی می‌شود. در گروه دوم اما، اهمیت مفصل‌ها و اتصالات مربوط به این قسمت‌ها در بدنه و شاسی[۸] مورد توجه قرار می‌گیرد. بحث نخست به بررسی ارتعاشی - دینامیکی و بحث دوم به تحلیل نیرویی - ارتعاشی و استحکام اجزا اختصاص دارد. بحث دسته‌موتور از جمله مباحثی است که به موضوع یکی از اجزای اثرگذار در حوزهٔ ارتعاشی خودرو می‌پردازد [۲]. طی سالیان گذشته، با تغییر دیدگاه در روند طراحی خودرو و توجه بیشتر به خودروهای سبک، با مصرف کمتر و راحتی نسبی بالاتر، موضوع نسبت وزن موتور به وزن بدنه اهمیت بیشتری پیدا کرده است. همچنین توسعهٔ صنعت خودرو زمینهٔ گرایش به استفاده از دسته‌موتورهای کارآمدتر را فراهم کرده است. به‌طور کلی، دسته‌موتورهای وسائل نقلیه در سه حوزه کاربری دارند [۳]:

۱. تحمل وزن موتور
۲. جذب ارتعاشات موتور
۳. جلوگیری از حرکت بیش از اندازهٔ موتور در اثر تحریک جاده، شتاب‌گیری یا ترمزگیری

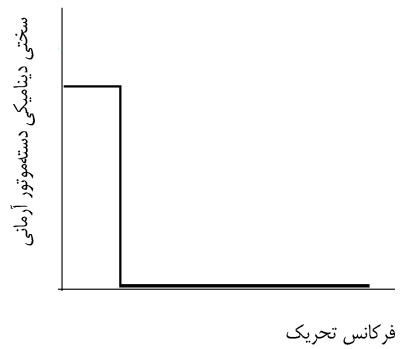
دسته‌موتورهای ارتجاعی و غیرفعال مورد اول را برآورده می‌کنند، اما در سایر موارد عملکرد چندان مطلوبی ندارند. لذا توجه پژوهشگران و صنعتگران به دسته‌موتورهایی با خواص دینامیکی وابسته به فرکانس و دامنه جلب شده است.

هرچند بسیاری از خودروسازان به‌دلیل تمایل به ساخت خودروهای سبک با سطح نویز و ارتعاشات کمتر، به دسته‌موتورهای هیدرولیکی روی آورده‌اند، اما این نوع از دسته‌موتورها نیز تمامی مشکلات را برطرف نمی‌کنند. لذا برای رفع گروه دیگری از مشکلات، روش‌های کنترل انطباقی ارتعاشات اعمال می‌شود؛ روش‌هایی که در دو گونهٔ فعال و شبه‌فعال عمل می‌کنند [۳].

۳. منابع تحریک

امروزه خودروسازان به دو گروه کلی ارتعاشات نامطلوب وارد بر خودرو توجه خاصی دارند. براساس همین دو گروه می‌توان شرایط بار اعمالی را از منظر سطح نویز و ارتعاشات به دو دسته تقسیم کرد [۲]: شرایطی که طی آن ارتعاشاتی با فرکانس کم و دامنهٔ زیاد به موتور اعمال می‌شود و معمولاً شرایط جاده، شتاب‌گیری سریع، ترمزهای ناگهانی و تعویض دنده از جمله عوامل ایجاد این نوع از ارتعاشات می‌باشند. فرکانس تحریک این منبع زیر ۳۰ هرتز و دامنهٔ آن بالای ۰/۳ میلی‌متر است. ارتعاشات دستهٔ دوم، که در حین روشن‌بودن خودرو همواره بر موتور اعمال می‌شوند، نوساناتی با فرکانس زیاد و دامنهٔ بسیار کم می‌باشند. میزان خروج از مرکزی[۹] موتور مهم‌ترین عامل ایجاد این دسته از ارتعاشات است و شامل فرکانس‌های ۲۵ تا ۲۰۰ هرتز، با دامنهٔ تحریک کمتر از ۰/۳ میلی‌متر، می‌باشد. در نتیجه خودرو برای رفع آسیب‌های ناشی از دو نوع ارتعاش فوق به دو نوع دسته‌موتور با عملکردهای متفاوت نیاز دارد: یکی با سختی و میرایی زیاد برای ارتعاشات دستهٔ اول، که معمولاً با نام جاذب ارتعاشات[۱۰] شناخته می‌شوند، و دیگری با سختی و میرایی کم برای ارتعاشات دستهٔ دوم که با نام

مجزاساز[11] شناخته می‌شوند. پس ویژگی‌های یک دسته‌موتور آرمانی به شرایط دامنه و فرکانس تحریک بستگی دارد. یک دسته‌موتور ارتجاعی با مشخصه‌های خطی نمی‌تواند دو خاستهٔ فوق را برآورد. لذا می‌توان چنین نتیجه گرفت که یک دسته‌موتور آرمانی سیستمی است که میرایی و سختی غیرخطی، وابسته به شرایط دامنه و فرکانس تحریک، دارد. در نتیجه، سختی دینامیکی یک دسته‌موتور آرمانی باید تا حدودی از نمودار شکل ۱ تبعیت کند [۲].



شکل ۱. مشخصهٔ دینامیکی یک دسته‌موتور آرمانی [۲]

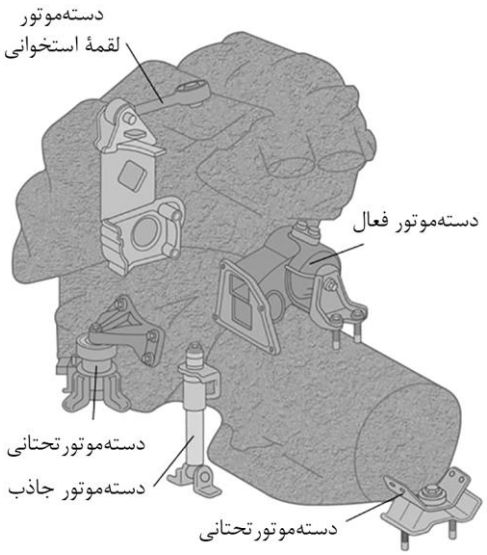
۴. مروری بر روند توسعهٔ دسته‌موتور

به‌طور کلی عملکرد اصلی دسته‌موتور در هر خودرو عبارت است از:

۱. جداسازی ارتعاشات موتور از بدنه

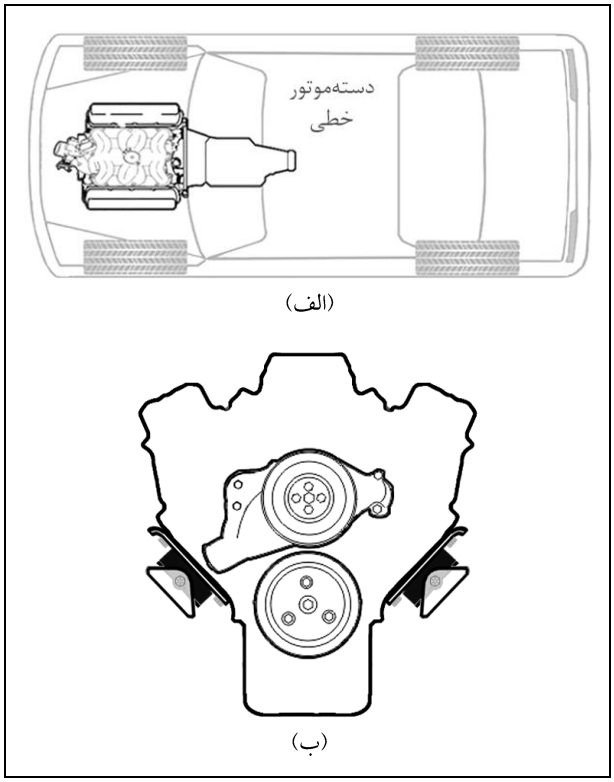
۲. جلوگیری از اعمال ضربه به موتور

در شکل ۲ نمایی از نحوهٔ اتصال موتور و شاسی به‌کمک انواع دسته‌موتورها نمایش داده شده است. معمولاً در خودروهای دیفرانسیل‌عقب[12] استفاده از دسته‌موتورهای ارتجاعی، که ساختار بسیار ساده‌ای دارند، رواج دارد. دلیل این امر نیز جانمایی موتور در مسیر انتقال قدرت و نحوهٔ چیدمان آن است (شکل ۳). این در حالی است که با گسترش خودروهای دیفرانسیل‌جلو[13] استفاده از موتورهایی که عمود بر مسیر انتقال قدرت قرار می‌گیرند رواج یافته و این خود سبب توجه به انواع توسعه‌یافتهٔ دسته‌موتور شده است (شکل ۴). اصولاً ارتعاشات ناشی از موتور به اجزای نگه‌دارندهٔ آن منتقل و سبب لرزش کل سازه می‌شود. برای کاهش این لرزش‌ها از اجزایی به نام دسته‌موتور استفاده می‌شود. همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، در طراحی دسته‌موتورها مهم‌ترین دغدغه ایجاد تعادل میان دو معیار متضادی است که در نتیجهٔ تحریک‌های گوناگون ارتعاشی به‌وجود می‌آیند.

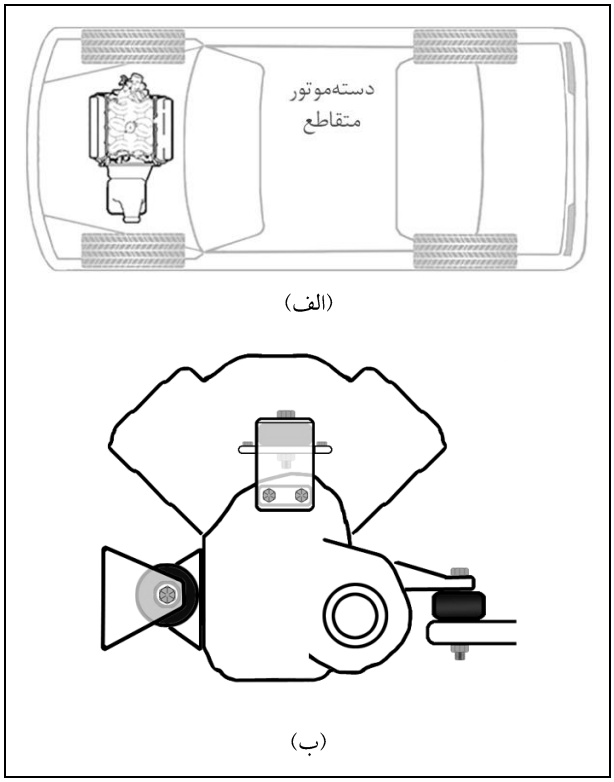


شکل ۲. اتصال موتور و شاسی به‌کمک انواع دسته‌موتور [۲]

قدیمی‌ترین نوع دسته‌موتورها، با نام دسته‌موتورهای ارتجاعی شناخته می‌شوند (شکل ۶). این دسته از نگه‌دارنده‌ها، در سال ۱۹۳۰ م، با هدف جداسازی ارتعاشات موتور از بدنه استفاده شدند. سختی و میرایی زیاد منجر به کاهش لرزش‌ها در فرکانس‌های پایین می‌شود، اما در فرکانس‌های بالا کارآیی خوبی ندارد [۲]. از مزایای این گروه از دسته‌موتورها می‌توان به قیمت مناسب، تعمیر و نگه‌داری آسان، مدل ریاضی ساده و ابعاد مناسب آنها اشاره کرد. اما برای ایجاد توازن میان معیارهای عنوان‌شده لازم است تا به انواع دیگر دسته‌موتورها رجوع نمود. دسته‌موتورهای هیدرولیکی به‌صورت رضایت‌بخشی این مشکل را برطرف نمی‌کنند، اما با این‌وجود میرایی را در فرکانس‌های کم افزایش می‌دهند و سبب کاهش جداسازی ارتعاشات در فرکانس‌های بالا می‌شوند.



شکل ۳. الف) اتصال موتور به شاسی در مسیر انتقال قدرت
ب) اتصال دسته‌موتور در مسیر انتقال قدرت

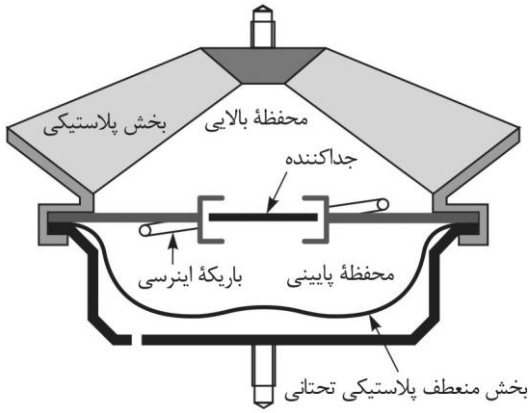


شکل ٤. الف) اتصال موتور به شاسی عمود بر مسیر انتقال قدرت
ب) اتصال دسته‌موتور عمود بر مسیر انتقال قدرت

شکل ۶. انواع دسته‌موتورهای ارتجاعی

از دیگر مشکلات این نوع از دسته‌موتورها می‌توان به قیمت بالا، پیچیدگی طراحی و قابلیت اطمینان پایین آنها اشاره کرد. با این‌وجود، امروزه همچنان انواع گوناگون دسته‌موتورهای هیدرولیکی در حال توسعه‌اند. در شکل ۷ ساختار کلی و قسمت‌های گوناگون یک دسته‌موتور هیدرولیکی نمایش داده شده است. پیش‌بینی رفتار این

سیستم در بازهٔ فرکانس و دامنهٔ تحریک استاندارد، به‌دلیل عملکرد غیرخطی آن، از اهمیت بسیاری برخوردار است و تاکنون مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است. فعالیت روی این نمونه از اوائل دههٔ ۹۰ م با مدل خطی سیستم در شرایط تحریک با فرکانس پایین آغاز شد [۵].



شکل ۷. نمایی از اجزای اصلی دسته‌موتورهای هیدرولیکی

از انواع دیگر دسته‌موتورها می‌توان به دسته‌موتورهای شبه‌فعال (نیمه‌فعال) اشاره کرد؛ دسته‌موتورهایی که برای رفع کاستی‌ها و بهبود عملکرد دسته‌موتورهای غیرفعال[۱۴] معرفی شده‌اند. در این گروه از دسته‌موتورها یک یا چند پارامتر تحت کنترل قرار می‌گیرد. در اغلب موارد ایدهٔ اولیهٔ سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال براساس جذب انرژی ارتعاشی سیستم از طریق تغییر در خواص دینامیکی، همچون میرایی یا سختی، بنا شده است [۲].

در مسیر انجام مطالعات دربارهٔ دسته‌موتورهای فعال و شبه‌فعال، برای نخستین‌بار مدل دسته‌موتوری با سیالات الکتریکی[۱۵] توسط ویلیامز و همکارانش، در سال ۱۹۹۳ م، بیان شد [۶]. چندی بعد، هانگ و همکارانش نیز یک دسته‌موتور سیال الکتریکی با توانایی تحمل باری معادل ۷۰ کیلوگرم را معرفی کردند [۷]. در سال ۲۰۰۰ م، کارلسن و همکارانش سیالات مغناطیسی[۱۶] و کاربردهای آنها در جذب ارتعاشات را معرفی و آنها را با سیالات الکتریکی مقایسه نمودند [۸]. در سال ۲۰۰۳ م، بودندیسل موفق به اختراع گونه‌ای جدید از دسته‌موتورهای الکترومغناطیسی[۱۷] شد [۹]؛ وسیله‌ای که در آن سیال در مسیری حلقوی بین مخزن و اتاقک پمپ در جریان بود. در ادامه وحدتی و احمدیان طراحی مفهومی جدیدی از دسته‌موتورهای هیدرولیکی نیمه‌فعال را، براساس مدلسازی و محاسبات ریاضی، معرفی کردند [۱۰]. همچنین فومنی و همکارانش به جاسازی سیم‌هایی همراه با آلیاژ حافظه‌دار در کنار فنر پلاستیکی دسته‌موتور، جهت ایجاد انعطاف در آن، اقدام نمودند [۱۱]. آنها به‌کمک جابه‌جایی بین مقدار بیشینه و کمینهٔ انعطاف در محفظهٔ بالایی[۱۸] موفق به ایجاد تغییر در خواص دینامیکی دسته‌موتور شدند.

شایم و مارگولیس دسته‌موتورهای کنترل‌شدهٔ تعادلی[۱۹] را برای جذب ارتعاشات موتور اجسام پرنده، که از دسته‌موتورهای معمول نرم‌تر است، گسترش دادند [۱۲]. وضعیت تعادل دسته‌موتور می‌تواند به‌وسیلهٔ فشردن یا تخلیهٔ هوا در آن، توسط سوپاپ‌های کنترلی، حاصل شود. آنها با در نظر گرفتن آثار ترمودینامیک و ویژگی انتقال حرارت هوا، منطق کنترل سوپاپ و معادلهٔ حرکت، مدل شبیه‌سازی الکترومغناطیس محاسباتی[۲۰] را بهبود بخشیدند.

در بررسی دیگری که توسط شوئا و همکارانش انجام شد، یک دسته‌موتور مغناطیسی[۲۱] با مواد ترکیبی همراه با سیالات مغناطیسی معرفی شد. برای کنترل ارتعاشات نیز یک تیر ارتجاعی تحت بار خارجی به‌کار گرفته شد [۱۳]. در ادامه، براساس عدد بینگهام[۲۲] ابعاد مناسب دسته‌موتور مغناطیسی طراحی و ساخته شد. پس از تعیین آزمایشگاهی نیروی میرایی وابسته به میدان مغناطیسی، ساختار سیستم شامل تیر ارتجاعی و جسم صلب مرتعش مدل شد و معادلهٔ حرکت حاکم استخراج و به‌صورت مدل کنترلی فضای حالت نمایش داده شد. در سال ۲۰۰۹ م، لـی و همکارش نمونه‌ای جدید از دسته‌موتورهای فعال[۲۳] را مورد مطالعه قرار دادند [۱۴]. این بررسی به دسته‌موتورهای الکترومغناطیسی فعال و غیرفعالی اشاره می‌کند که کنترل روبه جلو دارند. این پژوهشگران از دو حسگر بهره بردند:

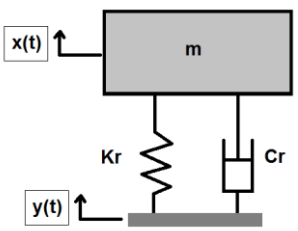
یکی جهت اندازه‌گیری نیروی انتقالی به دسته‌موتورهای فعال و دیگری جهت نمایش موقعیت آن. از همین‌رو، این دسته‌موتور به‌عنوان یک کنترل‌کنندهٔ متأثر از مکان عمل می‌کند. نتایج به‌دست آمده از نمونهٔ اولیه نشان داد که رفتار دسته‌موتورهای فعال در شرایط دینامیکی محدودهٔ فرکانس موردنظر، دقیق است. همچنین الگوریتم تخمین ارتعاشات با بازدهٔ بالا سیگنال‌های پاد ارتعاش[۲۴] را برای جذب ارتعاشات جستجو می‌کند و دسته‌موتورهای فعال نمونه، به‌خوبی نیروی ارتعاشات موتور را جذب می‌کند.

در سال ۲۰۱۰ م، گروه دیگری از محققان دسته‌موتور هیدرولیکی جدید شبه‌فعالی با باریکهٔ اینرسی قابل کنترل را مطرح کردند [۱۵]. آنها با اشاره به این نکته که بسیاری از محققان به جابه‌جایی دسته‌موتورها در کاهش سختی دینامیکی - که سبب کاهش نیروی انتقالی به شاسی می‌شود - توجه نداشته‌اند، بیان کردند که شبیه‌سازی انجام‌شده مبین اثرپذیری جاذب‌های غیرفعال از تغییر مساحت باریکهٔ اینرسی است. پس از آن، در سال ۲۰۱۲ م، حسینی و همکارانش یک نمونه عملگر ارزان‌قیمت طراحی و مدلسازی کردند [۱۶]. آنها طی تحقیقات تحلیلی و آزمایشگاهی خود عنوان کردند که معادلات غیرخطی سیم‌پیچ در برخی از کاربردهای خاص توانایی خطی‌سازی را خواهند داشت. در همین سال، دسته‌موتور الکترومغناطیسی فعالی پیشنهاد شد که از انتقال حرارت تولیدشده در سیم‌پیچ به اجزای پلاستیکی دسته‌موتور جلوگیری می‌کرد و مانع از آسیب‌دیدن آنها می‌شد. همچنین افزایش مقاومت و ماندگاری آن، ابعادش را کاهش داده و ساختار آن را ساده‌تر کرده بود [۱۷].

با توجه به توضیحات مطرح‌شده و با عنایت به جایگاه ویژهٔ صنعت خودروسازی در ایران، لزوم توجه به گسترش تحقیقات صنعتی دربارهٔ دسته‌موتورها اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند. امروزه بیشترین کاربرد دسته‌موتور در صنعت داخلی مبتنی بر دسته‌موتورهای ارتجاعی است. البته طی سالیان گذشته، خودروسازان با استفاده از دسته‌موتورهای هیدرولیکی در خودروهای سمند[۲۵] و پژو ۲۰۶[۲۶] زمینهٔ گسترش دسته‌موتورهای جدید را در کشور فراهم کرده‌اند. لازم به‌ذکر است در سطح فراملی نیز شرکت تویوتا[۲۷] در نمونه‌های جدید لکسوس[۲۸] و شرکت پورشه[۲۹] در نمونه‌های سفارشی خود کاربرد صنعتی دسته‌موتورهای فعال را آغاز کرده‌اند.

۵. مدلسازی ارتعاشی دسته‌موتور

همگام با توسعهٔ انواع دسته‌موتور، روش‌های مدلسازی رفتار ارتعاشی آنها نیز متناسب با خواص گونه‌های جدید گسترش یافت. نخستین مدل‌ها مربوط به دسته‌موتورهای ارتجاعی بود که تنها منعکس‌کنندهٔ خاصیت کشسانی و میرایی بخش لاستیکی بودند (شکل ۸).



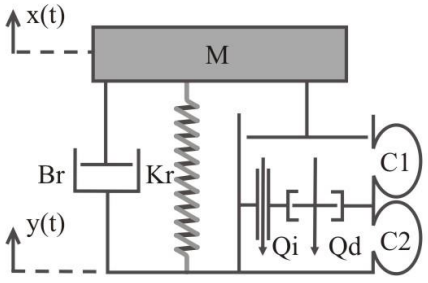
شکل ۸ مدل یک درجهٔ آزادی با تحریک تکیه‌گاه

با معرفی دسته‌موتورهای هیدرولیکی، بخش‌های تازه‌ای نیز به مدلسازی این قطعات اضافه شد. بر همین اساس، دسته‌موتورهای فعال و شبه‌فعال نیز بر پایه‌ای از دسته‌موتورهای هیدرولیکی استوار شدند. یک دسته‌موتور هیدرولیکی که مدل جرم متمرکز آن در شکل ۹ نمایش داده شده، از دو محفظهٔ سیال تشکیل شده است که به‌وسیلهٔ باریکهٔ اینرسی و جداکننده[۳۰] به یکدیگر متصل شده‌اند. معمولاً سیال داخل آن نیز ترکیبی از اتیلن گلیکول و آب است. محفظهٔ بالایی، که فشار بیشتری دارد، از بخش بالایی به یک ساختار لاستیکی متصل است. این ساختار در دسته‌موتورهای ارتجاعی، بدنهٔ اصلی قطعه را تشکیل می‌دهد و سختی و میرایی مورد نیاز سیستم را، که به‌ترتیب با K_r و B_r نمایش داده می‌شود، ایجاد می‌نماید. به‌واسطهٔ

محفظه‌های تعبیه‌شده در دسته‌موتور سختی دینامیکی نسبت به انواع ارتجاعی بالاتر می‌رود و میرایی در فرکانس‌های پایین به‌شدت کاهش می‌یابد. کاهش جداسازی در فرکانس‌های بالا مشکل بزرگ این نوع از دسته‌موتورهاست که با در نظر گرفتن جداکننده برطرف می‌شود. بخش‌های اصلی دسته‌موتور هیدرولیکی با جداکننده عبارت است از [۲]:

۱. قسمت ارتجاعی که توانایی تحمل پیش‌بار (وزن موتور) را دارد و همچون پیستون جهت پمپاژ سیال به محفظه‌های پایین با سطح مؤثر A_P به‌کار می‌رود.
۲. دو محفظهٔ جدا برای جابه‌جایی سیال
۳. اریفیس[۳۱] یا باریکهٔ اینرسی[۳۲] که برای تولید میرایی است. اریفیس لوله‌ای باریک و بلند بین دو محفظه است که توسط پارامترهای I_i و R_i مدل می‌شود.
۴. صفحهٔ بین محفظه‌ها با فضای بیرون
۵. جداکننده که به فرکانس‌های کم‌دامنه اجازهٔ عبور می‌دهد و در شرایط خطی با پارامترهای I_d و R_d مدل می‌شود.
۶. سیال عامل که عموماً اتیلن گلیکول است.
۷. صفحهٔ بل[۳۳] جهت بهبود ارتعاشات در فرکانس‌های بالا در بعضی از این نوع دسته‌موتورها

شکل ۹ نشان‌دهندهٔ یک دسته‌موتور هیدرولیکی غیرفعال است که در آن پارامترهای C_1 و C_2 نشان‌دهندهٔ ضرایب انعطاف حجمی محفظه‌ها هستند.



شکل ۹. مدل جرم متمرکز دسته‌موتور هیدرولیکی

همان‌طور که اشاره شد K_r و B_r ضرایب سختی و میرایی دسته‌موتور می‌باشند. پارامترهای Q_i و Q_d نیز به‌ترتیب نرخ جریان عبوری از باریکهٔ اینرسی و جداکننده است. همچنین P_1 و P_2 نیز فشار در محفظه‌های بالایی و پایینی را نشان می‌دهند.

متغیرهای سیستم نیز عبارت‌اند از: $x(t)$ که بیانگر تابع تحریک است و $y(t)$ که بیانگر حرکت تکیه‌گاه است. معادلات دینامیکی داخلی سیستم به دو دستهٔ معادلات پیوستگی و اندازه حرکت (معادلات ۱ تا ۴) تقسیم می‌شوند که با در نظر گرفتن تحریک‌هایی با دامنهٔ کم و زیاد به‌صورت دو تحریک مجزا و مستقل، دو مدل خطی مجزا ارائه می‌شود. مثلاً در مدلسازی با تحریک با دامنهٔ زیاد و فرکانس کم، معادلات مربوط به رفتار جداکننده (معادلات ۵ تا ۸) حذف می‌شوند.

$$C_1\dot{P}_1 = A_p(\dot{X}) - Q_i - Q_d \qquad (۱)$$

$$C_2\dot{P}_1 = Q_i + Q_d \qquad (۲)$$

$$\begin{aligned} P_1 - P_2 &= I_d\dot{Q}_d + \\ &+(R_d + R_d^{'}|Q_d| + R_{add})Q_d \\ &+ I_i\dot{Q}_i + \left(R_i + R_i'|Q_i|\right)Q_i \end{aligned} \qquad (۳)$$

$$\begin{aligned} F_T &= K_rX + B_r\dot{X} \\ &+(A_P - A_{d-fnc})(P_1 - P_2) \\ &+ A_PP_2 + A_d(R_d + R_d'|Q_d|)Q_d \end{aligned} \qquad (۴)$$

$$C_1\dot{P}_1 = A_p(\dot{X}) - Q_i \qquad (۵)$$

$$C_2\dot{P}_2 = Q_i \qquad (۶)$$

$$P_1 - P_2 = I_d\dot{Q}_d + R_dQ_d \qquad (۷)$$

$$F_T = K_rX + B_r\dot{X} + A_PP_1 \qquad (۸)$$

با انجام محاسبات مربوطه و به‌کمک فضای حالت معادلهٔ موهومی سختی دینامیکی به‌دست می‌آید و به‌کمک آن سختی دینامیکی و فاز سیستم ارائه می‌شود. در ادامه، با بسط معادلات خطی و در نظر گرفتن عوامل غیرخطی‌ساز مدل کامل‌تر غیرخطی می‌تواند ارائه گردد. با حل معادلات

۵ تا ۸، پس از انتقال به فضای حالت و به‌کمک روش لاپلاس، در نهایت فشار محفظهٔ بالایی را در معادلهٔ ۸ قرار داده که به‌صورت معادلهٔ ۱۱ درخواهد آمد و در نهایت ضریب سختی دینامیکی به‌صورت رابطهٔ ۱۲ به‌دست خواهد آمد.

$$K^* = \frac{|F_T|}{|X|} = |K\omega_{dr}J| \qquad (۹)$$

$$\phi = \phi_F + \phi_X \qquad (۱۰)$$

$$P_1(s) = \left(\frac{A_p X(s)}{C_1}\right) \times \left(\frac{I_i s^2 + R_i s + \left(\frac{1}{C_2}\right)}{I_i s^2 + R_i s + \left(\frac{1}{C_2}\right) + \left(\frac{1}{C_1}\right)}\right) \qquad (۱۱)$$

$$K_{dyn}(s) = K_r + B_r(s) + \left(\frac{A_p X(S)}{C_1}\right)\left(\frac{I_i s^2 + R_i s + \left(\frac{1}{C_2}\right)}{I_i s^2 + R_i s + \left(\frac{1}{C_2}\right) + \left(\frac{1}{C_1}\right)}\right) \qquad (۱۲)$$

تلاش‌های انجام‌شده برای مدلسازی دسته‌موتورهای فعال عموماً بر کنترل فشار در محفظهٔ بالایی تمرکز دارند. با کنترل فشار محفظهٔ بالایی و توجه به اختلاف فشار ایجادشده بین دو محفظه، دسته‌موتور می‌تواند ارتعاشات منتقل‌شده از موتور به شاسی را کنترل کند و کاهش دهد. در سال ۲۰۱۱ م، فیضی و همکارانش مدلسازی یک دسته‌موتور سیال مغناطیسی را در دستور کار قرار دادند [۳]. مطالعات آنها نشان داد که با افزایش میدان مغناطیسی سختی دینامیکی دسته‌موتورها نیز قابل تغییر است. مطالعهٔ آنها روی مدلسازی و شبیه‌سازی دو طرح از دسته‌موتور سیال مغناطیسی، که ایدهٔ اولیهٔ آن توسط بربر و کارلسن یک سال قبل ارائه شده بود [۱۸]، متمرکز شد. در مدلسازی فیضی و همکارانش معادلات پیوستگی و مومنتوم به‌صورت روابط ۱۳ تا ۱۶ در نظر گرفته شدند.

$$C_1\dot{P}_1 = A_p(\dot{X}) - Q_i - Q_d \qquad (۱۳)$$

$$C_2\dot{P}_2 = Q_i + Q_d \qquad (۱۴)$$

$$P_1 - P_2 = I_i\dot{Q}_i + R_iQ_i \qquad (۱۵)$$

$$P_1 - P_2 = I_d\dot{Q}_d + R_dQ_d + \Delta p_{MR} \qquad (۱۶)$$

باید توجه داشت که Δp_{MR} افت فشار ناشی از تنش تسلیم سیال مغناطیسی است که به‌کمک نظریهٔ سرینیواسان محاسبه شده است [۱۵] و موجب ایجاد اختلاف فشار مورد نظر می‌شود. نیروی انتقالی به پایهٔ دسته‌موتور نیز به‌صورت رابطهٔ ۱۷ به‌دست می‌آید.

$$F_T = K_rX + b_r\dot{X} + (A_p)(P_1) \qquad (۱۷)$$

پس از حل معادله در فضای حالت، معادلهٔ موهومی حاکم بر سیستم تعیین و به‌کمک اندازه و زاویهٔ آن، سختی دینامیکی و فاز تعیین می‌شود.

$$K_d = \sqrt{K_s{}^2 + K_1{}^2} \qquad (۱۸)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{K_1}{K_s}\right) \qquad (۱۹)$$

همان‌گونه که اشاره شد، جهت طراحی هدفمند و بررسی مناسب دسته‌موتور مفروض، وجود یک مدل ریاضی مناسب ضروری به‌نظر می‌رسد. بررسی مدل‌های گوناگون دسته‌موتورهای فعال و شبه‌فعال روند مناسبی جهت مدلسازی دسته‌موتور ارائه می‌دهند [۲، ۱۴، ۱۷، ۱۹ و ۲۰]. بر این اساس الگوریتم زیر جهت مدلسازی ارائه می‌شود:

۱. تبیین مدل فیزیکی و ریاضی
۲. استخراج معادلات حاکم بر سیستم شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت
۳. اتخاذ فرض‌های لازم جهت ساده‌سازی و انتقال معادلات به فضای حالت
۴. استخراج معادلهٔ موهومی سختی دینامیکی سیستم و تعیین سختی دینامیکی و فاز سیستم

نتایج حاصل از مدلسازی عموماً به‌صورت پاسخ فرکانسی مورد بررسی قرار می‌گیرند. در بررسی نمودارهای بود[۳۴] باید به این نکات توجه کرد:

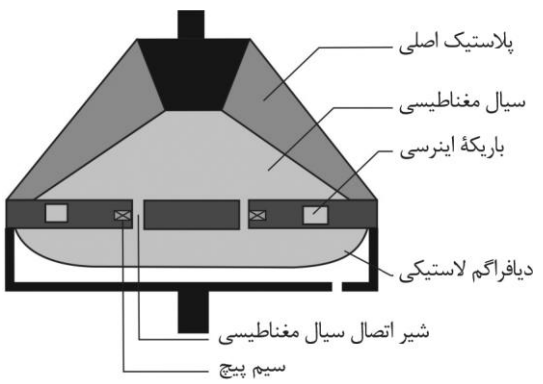
۱. چون خروج از مرکزی موتور یکی از منابع تولید ارتعاشات است و شامل فرکانس‌های ۲۵ تا ۲۰۰ هرتز با دامنهٔ تحریک کمتر از ۰/۳ میلی‌متر می‌باشد، در این حالت ارتعاشات موتور باید در ناحیه‌ای قرار بگیرد که بیش از فرکانس موتور و دسته‌موتور باشد. برای این منظور باید سختی دسته‌موتور پایین باشد.

۲. دومین منبع تحریک از ورودی‌های ناشی از ناهمواری‌های جاده و گشتاور موتور در شتابگیری‌های ناگهانی نتیجه می‌شود. فرکانس تحریک این منبع زیر ۳۰ هرتز و دامنهٔ آن بالای ۰/۳ میلی‌متر است. افزایش سختی دسته‌موتور منجر به افزایش فرکانس طبیعی و حضور در ناحیهٔ مطلوب خواهد شد.

۳. با توجه به مطالب ارائه‌شده، چون ویژگی‌های یک دسته‌موتور آرمانی به شرایط دامنه و فرکانس تحریک بستگی دارد، کاهش ضریب سختی در فرکانس‌های بالا و افزایش آن در فرکانس‌های پایین می‌تواند مطلوب باشد.

۴. تغییر در نتیجهٔ نمودار می‌تواند نمایانگر کاهش و افزایش فرکانس گوشه‌ای[۳۵] سیستم نیز باشد.

۵. از دیگر مباحث مطلوب در نمودار به‌دست آمده، می‌تواند کاهش اختلاف فاز به‌ویژه در محدودهٔ فرکانس گوشه‌ای باشد که مبین کاهش اختلاف ورودی آرمانی و پاسخ‌های به‌دست آمده است.



شکل ۱۰. دسته‌موتور با سیال مغناطیسی

۶. جمع‌بندی

با توجه به روند روبه رشد کاربرد و طراحی انواع دسته‌موتورها می‌توان از داده‌های جدول ۱ جهت مقایسهٔ این ادوات استفاده کرد. براساس مطالعهٔ انجام‌شده و بررسی مقاله‌های متنوع در حوزهٔ ارتعاشات موتور، دسته‌موتورها و مدلسازی آنها، در کنار پیدایش انواع گوناگون دسته‌موتورها، روش‌های گوناگونی در زمینهٔ اندازه‌گیری و تحلیل ارتعاشات نیز پدید آمده است. در ادامه به مهم‌ترین نکات مشترک در مطالعات انجام‌شده اشاره می‌شود:

۱. پس از بررسی انجام‌شده می‌توان چنین نتیجه گرفت که معادلات حاکم بر سیستم شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت می‌باشند که از طریق حل در فضای حالت، به تولید معادلهٔ موهومی سختی دینامیکی می‌انجامد.

۲. بررسی و مدلسازی دسته‌موتور به‌همراه مدل یک‌دوم خودرو چندان مورد توجه قرار نگرفته است.

۳. در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران به دسته‌موتورهای فعال و به‌خصوص نیمه‌فعال منعطف بوده است.

۴. دسته‌موتورهای شبه‌فعال در مقایسه با انواع فعال، به‌دلیل سادگی در طراحی و قیمت مناسب‌تر، بیشتر در کانون توجه پژوهشگران بوده‌اند.

۵. با فعال‌سازی دسته‌موتورهای هیدرولیکی معمولاً از طریق تغییر سطح باریکه و حذف جداکننده، مشکلات دسته‌موتورهای قبلی، به‌خصوص در فرکانس‌های بالا، برطرف می‌شود.

۶. در مطالعات آتی می‌توان به موضوع بهینه‌سازی دسته‌موتورهای فعال برای کاهش مصرف انرژی و توجیح استفاده از آنها، کوپل‌کردن معادلات دسته‌موتور فعال با مدل کامل خودرو، بهینه‌سازی موقعیت و جهت قرارگیری دسته‌موتور روی خودرو برای نیروهای

انتقالی بین بدنه و موتور و بررسی و ساخت دستگاه آزمایش دسته‌موتورهای فعال اقدام نمود.

۷. توجه به مباحث حرارتی حاکم بر دسته‌موتور، به‌ویژه آسیب حرارتی بخش‌های کشسان، روش‌های انتقال حرارت و راه‌های برطرف‌نمودن آسیب‌ها از دیگر موضوعات مهم در پژوهش‌های آتی خواهند بود که تبعاً پژوهش پیرامون آثار ارتعاشی و عملکردی ناشی از روش‌های پیشنهادی نیز می‌بایست مورد توجه قرار گیرند.

۷. نتیجه‌گیری

آنچه در این مقاله مطرح شد، نگاهی اجمالی بر تحقیقات گسترده‌ای بود که طی چند دههٔ گذشته دربارهٔ موضوع مهمی چون ارتعاشات موتور و عملکرد انواع دسته‌موتورها، به‌ویژه گونهٔ فعال آنها، انجام شده است. این تحقیقات شامل معرفی نسل جدید دسته‌موتورها، استخراج معادلات حاکم بر هر نوع، مدل‌سازی‌های گوناگون انجام‌شده و اصلاحات پیاپی محققانی است که در این زمینه به مطالعه و بررسی‌های گسترده دست زده‌اند. همچنین از رهیافت بررسی مدل‌سازی‌های مرسوم دسته‌موتورها به تبیین الگوریتم مناسب مدل‌سازی اقدام می‌نماید. تحقیقات آتی در این زمینه بیشتر به موضوع انواع فعال و شبه‌فعال اختصاص خواهد داشت، هرچند مطالعه در موضوع بهینه‌سازی و رفع عیب‌های انواع موجود، به‌ویژه دسته‌موتورهای غیرفعال و ارتجاعی به‌دلیل ویژگی‌های ارزندهٔ آنها، از جمله صرفهٔ اقتصادی و سادگی تولید، همچنان ادامه خواهد داشت.

جدول ۱. مقایسهٔ کیفی انواع دسته‌موتور

دسته‌موتور	پیدایش	ویژگی بارز	عیب
ارتجاعی	دههٔ ۳۰ م	صرفهٔ اقتصادی	عملکـرد نامناسب
هیدرولیکی	دههٔ ۶۰ م	طراحی و تولیـد مقرون به‌صرفه	عملکرد در بازهٔ فرکانسی محدود، ضعف در بـارهـای غیرهارمونیک
شبه‌فعال	دههٔ ۹۰ م	طراحی و تولیـد نسبتاً به‌صرفه و کارآیی مناسـب	قیمت نسبتاً بالا
فعال	دههٔ ۹۰ م	کارآیی مناسب و تنوع طراحی	قیمت بالا، پیچیـدگی طـراحـی

۸. مآخذ

[1] Mansour, H., "Design and development of active and semi-active engine mounts" M.Sc. diss., University of Sharif, 2008.

[۲] غلامی، محمدصادق. "مدلسازی و بهینه‌سازی دسته‌موتورهای هیدرولیکی" پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۹.

[3] Feyzi, T., M. Esfahanian, R. Tikani, and S. Ziaei-Rad. "Simulation of the dynamic behavior of the magnetorheological engine mount for automotive applications." *International Journal of Automotive Engineering*, Vol. 1 (1998): 258-268.

[4] Ramachandran, T., and K. Padmanaban, "Review on internal combustion Engine vibration and mountings." *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, Vol. 3 (2012): 63-73.

[5] Singh, R., G. Kim, and P. V. Ravindra. "Linear analysis automotive hydri-mechanical mount with emphasis on decoupler characteristics." *Journal of Sounds and Vibration*, 158(2), (1992): 219-243.

[6] Williams, E.W., S.G. Rigby, R. Sproston, and R. Stanway. "Electrorheological fluids applied to an automotive engine mount." *Journal of axon-Newtonian Fluid*, (1993): 221-238.

[7] Hong, S., S. Choi, W. Jung, I. Ham, and D. Kim. "Vibration control of an ER mount subjected to high static loads." *Journal of Sounds and Vibration*, Vol. 242(2), (2001): 740-748.

[8] J.D. Carlson, M. Jolly, JR. Toscano. "MR fluid, foam and elastomer devices." *Journal of Mechatronics*, Vol. 10, (2000): 555-569.

[9] T.A. Baudendistel, S.G. Tewani, J.M. Shores, M.W. Long, R.E. Longhouse, S.C. Namuduri and A.A. Alexandridis. "Hydraulic mount with magnetorheological fluid." US Patent No. 6,622,995 B2, 2003.

[10] Vahdati, N., M. Ahmadian. "Single Pumper Semi-active fluid mount." *Proceedings of IMECE2003*, Washington, D.C., November 1621, 2003.

[11] Foumani, M. S., A. Khajepour, and M. Durali. "Application of SMA to a new adaptive hydraulic mount." Proceedings of the 2002 SAE International Body Engineering Conference and Automotive & Transportation Technology Conference, July 9-11, 2002.

[12] Shim, T., D. Margolis. "Controlled equilibrium mounts for aircraft engine isolation", *Journal of control engineering practice* (2006): 721-733.

[13] Choi, S., S. Hong, K. Sung, and J. Sohn. "Optimal control of structural vibrations using a mixed-mode magnetorheological fluid mount." *International Journal of Mechanical Sciences*, 50, (2008): 559-568.

[14] Lee, B. and C. Lee. "Model based feed-forward control of electromagnetic type active engine mount system." *Journal of Sounds and Vibration*, 323, (2009): 574-593.

[15] Quoc, T., and K. Ahn. "A new type of semi-active hydraulic engine mount using controllable area of inertia track." *Journal of Sounds and Vibration*, 329, (2010): 247-260.

[16] Hosseini, M., S. Arzanpour, F. Golnaraghi, and A. Parameswaran. "Solenoid actuator design and modelling with application in engine vibration isolators." *Journal of Vibration and Control*, (2012): 1-9.

[17] Lee, D., S. Kang, J. Shores, J. Kim, S. Hong, and S. Lee. "Electromagnetic active engine mount with apparatus." US Patent No. 8,100,388 B2, 2012.

[18] Barber, D., and J. Carlson. "Performance Characteristics of Prototype MR Engine Mounts Containing LORD Glycol MR Fluids." *Journal of Physics: Conference Series*, 149, 2009.

[19] Mansour H., S. Arzanpour, F. Golnaraghi. "Design of a solenoid valve based active engine mount." *Journal of Vibration and Control*, (2011): 1221-1232.

[۲۰] مهرکیش، علی، مسعود طهانی، احسان کیومرثی. "معرفی و مدلسازی دسته‌موتور نوین چن محفظه‌ای با قابلیت خنک‌کاری"، *همایش ملی مهندسی مکانیک*، ۱۳۹۲.

پی‌نوشت

1. unbalancing
2. engine mounts
3. isolation
4. elastomeric mount
5. hydraulic engine mount
6. semi-active engine mount
7. active engine mount
8. chassis
9. eccentricity
10. shock absorber
11. isolator
12. rear-wheel-drive (RWD) cars
13. front-wheel drive (FWD) cars
14. passive engine mounts

۱۵. سیال الکتریکی (electrorheological fluid) اصطلاحاً به سیالی گفته می‌شود که لزجت آن با قرارگرفتن در میدان‌های الکتریکی تغییر می‌کند [ویراستار].

۱۶. سیال مغناطیسی (magnetorheological fluid) یا آهنربای سیال اصطلاحاً به سوسپانسیونی گفته می‌شود که در آن ذرات ریز یک مادهٔ جامد مغناطیسی به‌قطر تقریباً ۱۰ نانومتر در مایعی، که معمولاً نوعی روغن است، شناور می‌شوند. این سیال خاص، برای نخستین‌بار در سال ۱۹۶۰ م، در سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحدهٔ امریکا، هنگامی‌که پژوهشگران روش‌های گوناگون کنترل مایع در فضا را بررسی می‌کردند، کشف شد. از جمله ویژگی‌های بارز این سیال می‌توان به تغییر مقدار لزجت آن در میدان‌های مغناطیسی اشاره کرد [ویـراستار].

17. electromagnetic active engine mount
18. upper chamber
19. controlled equilibrium mounts (CEM)
20. computational electromagnetics, computational electrodynamics or electromagnetic modeling
21. magnetic engine mounts
22. Bingham number
23. active control engine mount (ACM)
24. anti-vibration signals
25. Samand ®
26. Peugeot 206 ®
27. Toyota Motor Corporation, http://www.toyota-global.com (accessed Oct 24, 2013)
28. Lexus ®
29. Porsche Automobil Holding, usually shortened to Porsche, http://www.porsche-se.com (accessed Oct 24, 2013)
30. decoupler
31. orifice
32. inertia track
33. Bell surface
34. Bode diagrams
35. notch frequency