

بررسی دسته‌موتورهای هیدرولیکی از منظر نوع، کاربرد و روند توسعه

سعید ضیائی‌راد
استاد دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی اصفهان
szrad@cc.iut.ac.ir

رضا تیکنی*
استادیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی اصفهان
r_tikani@cc.iut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۸/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۱۱

چکیده

اصولاً در سامانه هم‌بندی^۱ موتور و سائل نقلیه، از دسته‌موتور^۲ به‌منظور کاهش ارتعاشات منتقل‌شده از موتور به بدنه و در نتیجه راحتی بیشتر سرنشینان استفاده می‌شود. در این رهگذر، به‌منظور بهبود خواص دینامیکی این قطعه، دسته‌موتورهای هیدرولیکی معرفی شده‌اند. تحقیقات انجام‌شده در این حوزه در سه بخش دسته‌موتورهای غیرفعال، شبه‌فعال و فعال تقسیم‌بندی شده‌اند. در حوزه دسته‌موتورهای غیرفعال، بخش عمده پژوهش‌ها بر ارائه طرح‌های جدید، مدل‌سازی‌های خطی و غیرخطی و بهینه‌سازی طرح‌ها متمرکز شده است. در حوزه دسته‌موتورهای شبه‌فعال و فعال اما، با هدف برطرف کردن اشکال دسته‌موتورهای غیرفعال، طراحی‌های متنوعی به‌همراه الگوریتم‌های گوناگون کنترلی موضوع کار پژوهشگران این حوزه بوده است. در این مقاله به تحقیقات انجام‌شده در مورد دسته‌موتورهای هیدرولیکی، کاربرد و روند تکمیل و توسعه آنها پرداخته شده است.

واژگان کلیدی: دسته‌موتور هیدرولیکی^۳، جداسازی ارتعاشات، دسته‌موتور غیرفعال^۴، دسته‌موتور شبه‌فعال^۵، دسته‌موتور فعال^۶

۱. مقدمه

در حالی است که تحقیقات در این زمینه همچنان ادامه دارد. به حداقل رساندن نوفه و ارتعاشات منتقل‌شده از موتور به بدنه و دستیابی به راحتی بیشتر، از جمله دلایل اصلی سرمایه‌گذاری و انجام پژوهش درباره دسته‌موتورهاست [۱]. امروزه علاقه وافر بازار مصرف خودرو به محصولات با

سامانه هم‌بندی موتور در وسائل نقلیه اعم از انواع خودرو، هواپیما و جز این‌ها به‌طور معمول از موتور (منبع ارتعاشات) و تعدادی نگه‌دارنده (دسته‌موتور) تشکیل شده است. به‌تازگی، برای جداسازی نوفه^۷ و ارتعاشات تولیدشده توسط موتور از سامانه‌های نوین هم‌بندی استفاده می‌شود. با این

مصرف انرژی و آلاینده‌گی کمتر، خودروسازان را به سمت تولید خودروهایی با وزن کمتر و قدرت بیشتر سوق داده است. از دیگر عوامل سرمایه‌گذاری در حوزه بهبود ویژگی‌های دینامیکی دسته‌موتورها، کاهش وزن و افزایش قدرت خودروهاست که اثری معکوس بر میزان ارتعاشات تولیدی دارد [۱]. انواع دسته‌موتورها، از دسته‌موتورهای الاستومری^۸ گرفته تا دسته‌موتورهای هیدرولیکی^۹، به صورت فعال و غیرفعال برای بهبود شرایط جداسازی ارتعاشات در وسائل نقلیه و حتی موتورهای ثابت و موتورهای هواییما در پژوهش‌های گوناگون ارائه و بررسی شده‌اند [۲]. به‌طور کلی، در یک سامانه ارتعاشی وظایف دسته‌موتورها عبارت است از [۲]:

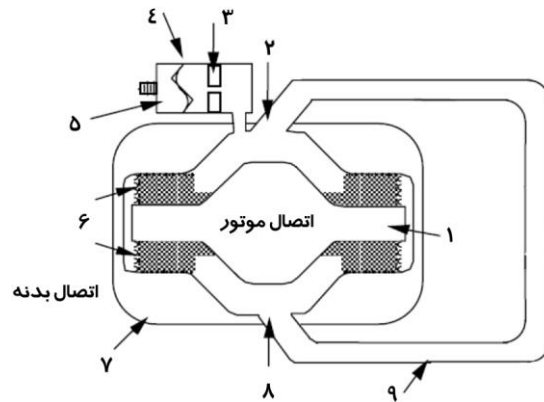
۱. تحمل وزن موتور
۲. جلوگیری از خرابی ناشی از شکست در نقاط اتصال موتور و جعبه‌دنده به بدنه
۳. جداسازی ارتعاشات و کاهش دامنه ارتعاشات انتقال‌یافته به بدنه ناشی از نیروهای نامیزانی موتور
۴. کاهش نوفه ناشی از اتصال صلب موتور به بدنه
۵. افزایش راحتی مسافران با کاهش ارتعاشات وارده از موتور به بدنه
۶. جلوگیری از جابه‌جایی نسبی زیاد بین موتور و بدنه
۷. جلوگیری از حرکات جلو و عقب موتور در اثر اینرسی موتور به‌هنگام شتاب‌گیری و ترمز کردن خودرو

۲. دسته‌موتورهای الاستومری و هیدرولیکی

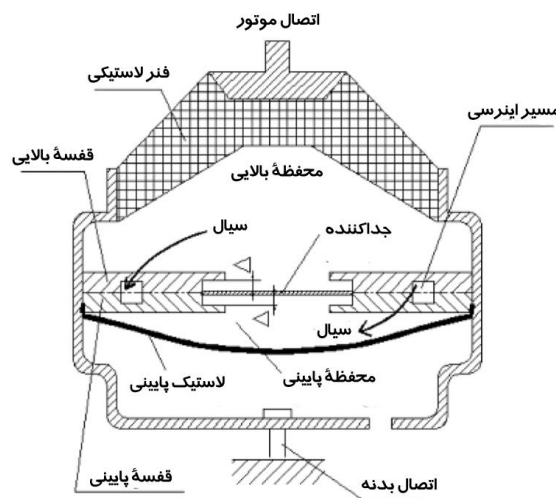
دسته‌موتورهای الاستومری به نگره‌دارنده‌هایی اطلاق می‌شود که بخش عمده آنها از لاستیک تشکیل شده است. ویژگی مهم این دسته از نگره‌دارنده‌ها ایجاد سختی در تمامی جهت‌ها می‌باشد. قیمت پایین، حجم کم و قابلیت تعویض و نگهداری آسان آنها سبب شده است تا از دهه ۱۹۳۰ م برای کاهش ارتعاشات سازه‌ها به کار گرفته شوند [۳]. به دلیل وجود استهلاک، سختی دینامیکی عضو الاستومری با افزایش فرکانس نیروی وارده زیاد می‌شود.

البته سختی و استهلاک زیاد در فرکانس‌های پایین و در نتیجه جلوگیری از حرکت نسبی سازه و بدنه مفید می‌باشد، اما در جداسازی ارتعاشات، که عمدتاً در فرکانس‌های بالا اتفاق می‌افتد، زیادبودن سختی و استهلاک سودمند نیست. در طراحی نگره‌دارنده الاستومری، بین حرکت نسبی سازه و بدنه و همچنین جداسازی ارتعاشات موازنه‌ای صورت می‌پذیرد [۱]. کاهش سختی عضو الاستومری فرکانس طبیعی را کاهش می‌دهد و انتقال‌پذیری در تحریک‌های کوچک (فرکانس‌های بالا) را کم می‌کند، در مقابل کاهش سختی عضو الاستومری سبب افزایش حرکت نسبی سازه و بدنه می‌شود [۴].

نیاز به سامانه جداسازی ارتعاشات متغیر با فرکانس، پژوهشگران را به سمت توسعه دسته‌موتورهای هیدرولیکی سوق داده است. دسته‌موتورهای هیدرولیکی، دسته‌موتورهایی الاستومری‌اند که در آنها سیال بین دو محفظه لاستیکی حرکت می‌کند به مسیر بین دو محفظه لاستیکی اصطلاحاً مسیر اینرسی^{۱۰} گفته می‌شود. این مسیر ممکن است به صورت خارجی (شکل ۱) و یا داخلی (شکل ۲) باشد. در دسته‌موتور نمایش داده شده در شکل ۱، سیال می‌تواند از طریق مسیر اینرسی بین دو محفظه نوسان کند. نوسان سیال بین این دو محفظه سبب کاهش سختی دینامیکی در فرکانس خاصی می‌گردد؛ فرکانسی که معمولاً بر فرکانس کاری موتور منطبق می‌شود. دسته‌موتور نمایش داده شده در شکل ۲، که در خودروها کاربرد دارد، بین دو محفظه، علاوه بر مسیر اینرسی، مسیر دیگری به نام جداکننده یا جداساز^{۱۱} قرار داده شده است. در حرکت‌هایی با جابه‌جایی زیاد (که معمولاً در فرکانس‌های پایین اتفاق می‌افتد) جداساز به قسمت بالایی و پایینی اتاقک خود چسبیده و اجازه عبور سیال از اطراف را نمی‌دهد. در نتیجه سیال از مسیر اینرسی عبور می‌کند. در این نوع از دسته‌موتورها مسیر اینرسی به گونه‌ای طراحی می‌شود که عبور سیال از آن سبب استهلاک بالایی گردد. در این حالت جابه‌جایی نسبی بین موتور و بدنه به حداقل مقدار ممکن



شکل ۱. دسته‌موتور هیدرولیکی با مسیر اینرسی خارجی [۴]. بخش‌های مشخص شده عبارت‌اند از: ۱. محفظه داخلی^{۱۲}، ۲. محفظه بالایی^{۱۳}، ۳. اوریفیس^{۱۴}، ۴. جبران‌گر حجم^{۱۵}، ۵. محفظه نیتروژن^{۱۶}، ۶. بخش الاستومری^{۱۷}، ۷. عضو خارجی^{۱۸}، ۸. محفظه پایینی^{۱۹}، ۹. مسیر اینرسی



شکل ۲. دسته‌موتور هیدرولیکی با مسیر اینرسی داخلی [۵]

۳. دسته‌بندی دسته‌موتورهای هیدرولیکی

بسته به نوع طراحی دسته‌موتور، تشدید ایجادشده در اثر حرکت سیال درون مسیر اینرسی بین دو محفظه می‌تواند سبب ایجاد استهلاک اضافی در دسته‌موتور شود و یا مانند یک جاذب ارتعاشات^{۲۰} کاهش ارتعاشات انتقال‌یافته را در فرکانس خاصی به‌همراه داشته باشد. به این فرکانس، که تابعی از پارامترهای دسته‌موتور است و توسط طراح تعیین می‌شود، اصطلاحاً فرکانس فاق^{۲۱} گفته می‌شود [۴]. معمولاً دسته‌موتورهای هیدرولیکی در انواع خودرو به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که استهلاک اضافی در اثر حرکت سیال درون مسیر اینرسی ایجاد شود. این استهلاک اضافی سبب

می‌رسد. در فرکانس‌های بالا سیال به‌راحتی از اطراف جداساز وارد محفظه پایینی می‌شود، لذا استهلاک دسته‌موتور نسبت به حالت قبل بسیار کمتر خواهد بود. در این حالت دسته‌موتور میزان ارتعاشات منتقل‌شده به بدنه از طرف موتور را کاهش می‌دهد. پارهای از مزایای ذکرشده برای دسته‌موتورهای الاستومری نظیر هزینه و حجم کم، در این نوع از دسته‌موتورها وجود نخواهد داشت، اما در عوض جداسازی ارتعاشات مطلوب‌تری حاصل می‌شود. باربتی و باربوزا (۲۰۰۶ م) مقایسه کاملی میان دسته‌موتورهای الاستومری و هیدرولیکی انجام داده و مزایا و معایب هر یک را ذکر کرده‌اند [۳].

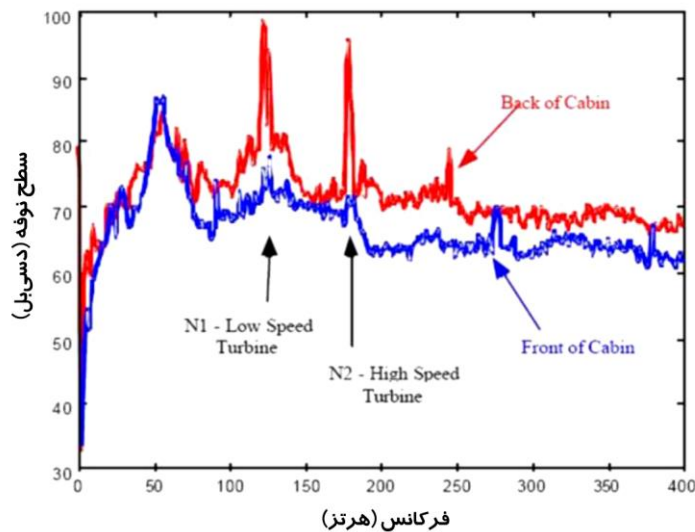
کاهش ارتعاشات انتقال یافته به بدنه در فرکانس کارکرد درجای^{۲۲} موتور خواهد شد، همچنین از جابه‌جایی‌های نسبی زیاد بین موتور و بدنه جلوگیری خواهد کرد [۴ و ۶]. در موتورهای احتراق داخلی دو نوع آشفته‌گی دینامیکی وجود دارد؛ نوع اول ناشی از ضربه حاصل از انفجار درون سیلندر و نوع دوم نیروها و گشتاورهای ناشی از چرخش اجزای دوار و همچنین اجزای متحرک با حرکت رفت و برگشتی. مثلاً برای یک موتور چهارسیلندر معمولی در حال حرکت، که سرعت موتور آن ۲۴۰۰ دور بر دقیقه (معادل ۴۰ هرتز) است، اجزای دورانی دارای فرکانسی معادل ۴۰ هرتز می‌باشند، حال آنکه فرکانس ارتعاشات ناشی از احتراق دو برابر این مقدار و برابر با ۸۰ هرتز می‌باشد. معمولاً شرکت‌های سازنده تلاش زیادی برای بالانس نمودن اجزای دوار موتور انجام می‌دهند تا میزان ارتعاشات ناشی از آن را به حداقل برسانند [۷]. در حالی که ارتعاشات ناشی از نامیزانی‌های ثانویه بر اجزای خودرو تأثیر می‌گذارند و این امر تمایل برای رسیدن به دسته‌موتوری با قابلیت حذف ارتعاشات در این فرکانس‌ها را افزایش می‌دهد.

معمولاً جداسازی ارتعاشات ناشی از این‌گونه نامیزانی‌ها، که در فرکانس‌های بالا (۲۵ تا ۲۰۰ هرتز) اتفاق می‌افتد، به سختی و استهلاک پایین نیاز دارد. این در حالی است که پایین بودن استهلاک و سختی، پاسخ‌گرای سامانه به تحریک‌های ضربه‌ای (در فرکانس‌های کمتر از ۲۵ هرتز) را با مشکل مواجه می‌کند. تحریک‌های ضربه‌ای با شتاب‌گرفتن‌های ناگهانی یا کاهش ناگهانی آن؛ یعنی ترمزگرفتن و همچنین حرکت در جاده‌های ناهموار رخ می‌دهد و می‌تواند سبب ایجاد تشدید در فرکانس‌های پایین شود. در این موارد، برای به حداقل رساندن تشدید و جذب ضربه، موتور به سختی و استهلاک بالایی نیاز دارد [۸]. در دسته‌موتورهای هیدرولیکی مورد استفاده در خودرو، عمدتاً از یک جداساز بین دو محفظه استفاده می‌شود (شکل ۲). این جداساز عملکردی متناسب با دامنه ارتعاشات ورودی دارد.

افزایش دامنه ارتعاشات ورودی با بسته‌شدن این مسیر همراه است و در نتیجه سیال مجبور به عبور از مسیر اینرسی و ایجاد استهلاک زیاد خواهد بود. در فرکانس‌های کاری بالا، که دامنه ارتعاشات وارده پایین است، مسیر جداساز باز بوده و استهلاک کمی به سامانه اعمال می‌شود. لازم به یادآوری است که دسته‌موتورهای هیدرولیکی از نظر گستره فرکانسی عملکرد و خواص دینامیکی با مستهلک‌کننده‌ها متفاوت می‌باشند. به‌عنوان مثال، در مستهلک‌کننده‌ها از اوریفیس کوتاه برای ایجاد استهلاک استفاده می‌شود، حال آنکه در دسته‌موتورهای هیدرولیکی از مسیر اینرسی طولانی برای ایجاد استهلاک بهره گرفته می‌شود [۹]. در دسته‌موتورهای هیدرولیکی مورد استفاده در انواع هواپیما و بالگرد، دسته‌موتور به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که فرکانس فاق ایجادشده در اثر حرکت سیال، بر فرکانس ارتعاشات وارده منطبق شود تا بیشترین کاهش در ارتعاشات انتقال یافته رخ دهد [۴ و ۶]. در هواپیماهای با موتور پیستونی، ارتعاشات زیادی به‌واسطه نامیزانی پروانه هواپیما، همچنین ضربات ناشی از انفجار درون سیلندر ایجاد می‌شود. ارتعاشات معمول در این پیستون‌ها در گستره ۴۰ هرتز و هارمونیک یک‌دوم آن؛ یعنی ۲۰ هرتز، رخ می‌دهد. فرکانس طبیعی این سامانه‌ها نیز در حدود ۱۰ تا ۱۴ هرتز است. لازم به‌ذکر است با توجه به قیمت ارزان این هواپیماها، استفاده از دسته‌موتورهای گران‌قیمت همچون دسته‌موتورهای هیدرولیکی در آنها توجیه اقتصادی ندارد. در هواپیماهای دارای موتور توربین‌دار^{۲۳} بخش اعظم نوفه تولیدشده ناشی از فشار هوای زیاد درون توربین و برخورد آن با بدنه است، که برای کنترل آن از سامانه‌های کنترل فعال سازه و یا کنترل فعال نوفه استفاده می‌شود. ارتعاشات حاصل از جرم و نیروهای نامیزانی اثر دینامیک، که در این هواپیماها در درجه پایین‌تری از اهمیت قرار دارد، به‌وسیله دسته‌موتور قابل کاهش‌اند. سرعت معمول این پروانه‌ها ۱۰ تا ۳۰ هرتز و فرکانس طبیعی سامانه در گستره ۶ تا ۳۰ هرتز است. در اکثر هواپیماهای توربوفا^{۲۴}، غالباً ارتعاشات

شکل ۳ نمایش داده شده است. دو فرکانس N_1 و N_2 نشان‌دهنده سرعت فن و کمپرسور فشاربالا می‌باشند. از دیگر کاربردهای دسته‌موتورهای هیدرولیکی می‌توان به استفاده از آنها در صنایع دریایی اشاره کرد. استفاده از این دسته‌موتورها، با کاهش ارتعاشات منتقل شده به بدنه، راحتی مسافران و خدمه را به‌همراه خواهند داشت. در شناورهای زیرسطحی نیز استفاده از دسته‌موتورهای هیدرولیکی در کاهش مشخصه‌های اکوستیکی کمک شایانی خواهد کرد.

در دو فرکانس خاص^{۲۵} رخ می‌دهد که به سرعت‌های N_1 و N_2 معروفند و دو فرکانس بالا و پایین تحریک نامیزانی در موتور می‌باشند. در جت‌های تجاری سرعت فن ۱۷۵ هرتز و سرعت کمپرسور فشاربالا حدود ۴۳۳ هرتز است. در هواپیماهای بزرگتر همچون بوئینگ سرعت فن پایین‌تر است^{۲۶} [۱۰]. در این نوع از موتورهای ارتعاشات تنها در فرکانس N_1 کاهش داده می‌شود [۱۱]. نمونه‌ای از طیف نوفه اندازه‌گیری شده در هواپیمای دارای این نوع موتور در



شکل ۳. نمودار سطح نوفه در کابین هواپیما [۱۰]

اعظمی از مقاله‌های مربوط به دسته‌موتورهای غیرفعال را تشکیل می‌دهند. یکی از دلایل اهمیت یافتن دسته‌موتورهای غیرفعال آن است که با ایجاد تغییر در خصوصیات و ویژگی‌های آنها می‌توان دسته‌موتورهای شبه‌فعال را شبیه‌سازی و طراحی کرد. پژوهش‌های انجام شده در مورد دسته‌موتورهای شبه‌فعال بیشتر بر پایه تغییر در خصوصیات و ویژگی‌های دسته‌موتورهای غیرفعال، خصوصاً سختی و استهلاک و بررسی اثر آنها بر رفتار دینامیکی دسته‌موتورهای شبه‌فعال بوده است. با استفاده از محرک و یک سامانه کنترلی، دسته‌موتور غیرفعال به دسته‌موتور فعال مبدل می‌شود. در ادامه به تفکیک نوع دسته‌موتور به بررسی مقاله‌های ارائه شده پرداخته می‌شود.

۳-۱. دسته‌بندی دسته‌موتورهای هیدرولیکی از منظر کنترل خصوصیات دینامیکی

دسته‌موتورهای هیدرولیکی از دیدگاه کنترل خصوصیات دینامیکی به سه گروه دسته‌موتورهای غیرفعال، شبه‌فعال و فعال تقسیم می‌شوند [۱-۲]. اکثر پژوهش‌های انجام شده در زمینه دسته‌موتورها بر روی دسته‌موتورهای غیرفعال متمرکز شده است. البته با توجه به اینکه اساس انواع دیگر بر پایه این نوع دسته‌موتورهاست، این امر بدیهی است. مدل‌سازی‌های خطی و غیرخطی دسته‌موتورها، ارائه طراحی‌های جدید با کارایی بیشتر، مدل‌سازی اجزای محدود دسته‌موتورها و بهینه‌سازی طراحی‌های صورت گرفته برای رسیدن به حداقل انتقال ارتعاشات و نوفه بخش

۱-۳-۱. دسته‌موتورهای هیدرولیکی غیرفعال

دسته‌موتورهای غیرفعال برای بهبود مشخصه‌های کارایی انواع قبلی دسته‌موتورها معرفی شده‌اند. در سال ۱۹۶۲ م، ریچارد راسموسن^{۲۷} دسته‌موتوری غیرفعال را برای افزایش استهلاک ابداع کرد [۱۲]. کارایی بالای این دسته‌موتور نسبت به دسته‌موتورهای الاستومری و همچنین امکان تبدیل آنها به وسائل تنظیم‌شونده از جمله دلائل محبوبیت این دسته‌موتورها به‌شمار می‌رود. در مقاله‌های متعددی کارایی بهتر این دسته‌موتورها در کاهش نوفه و ارتعاشات و راحتی سرنشینان نسبت به دسته‌موتورهای الاستومری نشان داده شده است [۸]. شروع تحقیقات پیوسته و مؤثر درباره دسته‌موتورها از سال ۱۹۸۴ م آغاز شده است. برنچن در این سال دسته‌موتور هیدرومکانیکی غیرفعال با جداساز ثابت را توسعه داد که قادر به کاهش نوفه به‌میزان ۵ دسی‌بل بود [۱۳]. در مطالعه وی از مدل‌های ساده مکانیکی و سیالاتی بدون انجام تحلیل استفاده شده است. در همان سال، کرکران و تیکز چند مدل دسته‌موتور هیدرودینامیکی با مدل‌سازی یک درجه آزادی خطی ارائه کردند که در آن جرم جزء الاستیک و سختی آن، همچنین استهلاک و سختی مؤثر سیال مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴]. در مقاله آنها اصول عملکرد و ویژگی‌های دسته‌موتور معرفی و بهترین محل قرارگیری آن در یک خودرو پیشنهاد شده است. کاهش ارتعاشات در فرکانس تشدید و کاهش نوفه به‌میزان ۵ دسی‌بل درخصوص کارایی این دسته‌موتور گزارش شده است. موزچوک (۱۹۸۴ م) موضوعاتی درخصوص فناوری ساخت دسته‌موتورها مانند روش واشربندی، پرکردن سیال و جلوگیری از نشت آن را بررسی کرده است [۱۵]. فلاور (۱۹۸۵ م) نیز با نمایش طراحی‌های مشابه مکانیکی و سیالاتی دسته‌موتورها به بیان ویژگی‌های مسیر عبور سیال بین دو محفظه و جداساز پرداخته و به کمک آزمایش‌های تجربی برتری دسته‌موتورهای هیدرومکانیکی بر دسته‌موتورهای الاستومری را نشان داده است [۱۶]. وی برای نخستین‌بار رفتار دینامیکی

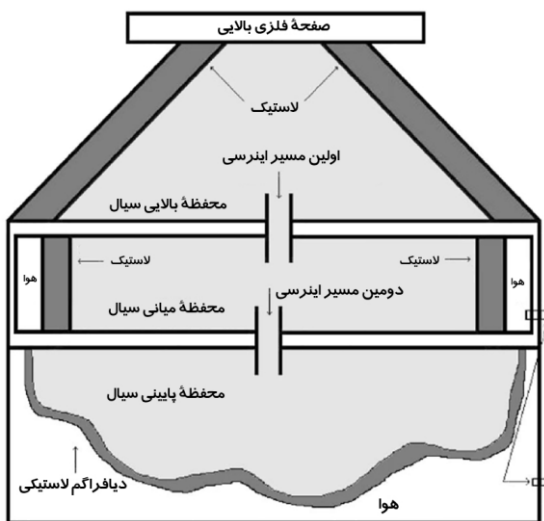
دسته‌موتورها را با استفاده از یک مدل خطی و در نظرگرفتن جداساز به دو صورت همیشه‌باز و همیشه‌بسته به‌وسیله مدل باند گراف بیان کرده است. موارد مورد اشاره نخستین مقاله‌های منتشرشده در زمینه دسته‌موتورهای هیدرولیکی‌اند. پس از این مقاله‌ها، نتایج پژوهش‌های بسیاری در این حوزه منتشر شده است که در ادامه به‌صورت دسته‌بندی‌شده شامل مدل‌سازی، طراحی‌های جدید برای افزایش کارایی، تعیین پارامترهای دسته‌موتور، بررسی اثر هر یک از پارامترها بر کارایی، برهم‌کنش سازه و سیال و طراحی بهینه دسته‌موتور ارائه می‌شود.

۱-۱-۳. مدل‌سازی

بسیاری از مقاله‌های ارائه‌شده در حوزه دسته‌موتورهای هیدرولیکی به مدل‌سازی این سامانه‌ها می‌پردازند. این مدل‌سازی‌ها را می‌توان در دو بخش مدل‌سازی خطی و مدل‌سازی غیرخطی بررسی کرد. مقاله شاخص در حوزه مدل‌سازی خطی، پژوهش سینق و همکاران (۱۹۹۲ م) است [۱۷]. در این پژوهش دسته‌موتور هیدرولیکی به‌صورت خطی مدل‌سازی و نتایج آن با آزمون‌های تجربی مقایسه شده است. مدل‌سازی این پژوهش با تأکید بر رفتار جداساز بوده است. در بسیاری از مقاله‌های دیگر نیز از مدل‌سازی خطی برای بیان رفتار دینامیکی دسته‌موتورهای هیدرولیکی استفاده شده است. از جمله آنها می‌توان به مراجع [۱۷] تا [۲۷] اشاره کرد. عمده مدل‌سازی‌های خطی در مقاله‌هایی مطرح شده که در آنها طراحی جدیدی از دسته‌موتورها ارائه شده است. مدل‌سازی‌های غیرخطی دسته‌موتورهای هیدرولیکی براساس دست‌یابی دقیق‌تر به ویژگی‌های دینامیکی این سامانه‌ها شکل گرفته است. عمده پارامترهای غیرخطی در نظر گرفته شده در مقاله‌ها عبارت است از:

۱. خواص غیرخطی جداساز در کاربردهای خودرو [۲۴، ۲۸-۳۱]
۲. خواص غیرخطی حرکت سیال [۲۳-۳۳]

هندسی و جنس مواد مورد استفاده در اجزاء ضروری است و غالباً از نرم‌فزارهای انسیس^{۲۸} [۴۰ و ۴۴]، آباکوس^{۲۹} [۳۹] و آدینا^{۳۰} [۴۱ و ۴۳] برای این منظور استفاده شده است. آزمایش‌های تجربی که براساس آنها پارامترهای دسته‌موتور استخراج می‌گردند خود حاوی دو زیرمجموعه می‌باشند. در دسته نخست، پارامترهای دسته‌موتور به صورت مجزا و با به‌کارگیری تجهیزات خاص به صورت مستقیم تعیین می‌شوند [۹، ۲۸، ۳۳ و ۳۵]. در دسته دوم اما، پارامترها براساس آزمون‌های استاندارد بر روی مجموعه دسته‌موتور هیدرولیکی و بررسی مدل‌ها تعیین می‌شوند [۴۶ و ۴۹].



شکل ۴. دسته‌موتور هیدرولیکی با دو فرکانس فاق [۲۱]

۳-۱-۱-۴. برهم‌کنش سازه و سیال

اثر متقابل سازه و سیال در پاره‌ای از مقاله‌های علمی بررسی شده است. اکثر این پژوهش‌ها توسط شانگوان و همکاران و با استفاده از نرم‌افزار آدینا انجام شده است [۵، ۴۲-۴۳]. ویژگی‌های این نرم‌افزار و امکانات آن در تحلیل اثر متقابل سازه و سیال، از جمله در نمایش خصوصیات دینامیکی دسته‌موتورهای هیدرولیکی در مرجع [۵۰] آمده است. کائو و همکاران نیز آثار برهم‌کنش سازه و سیال در دسته‌موتورهای هیدرولیکی را با استفاده از روش المان محدود بررسی کرده‌اند [۵۱-۵۲].

۳. خواص غیرخطی سختی حجمی [۹، ۳۴]

۴. مجموعه‌ای از ویژگی‌های غیرخطی ممکن در دسته‌موتورها [۳۵]

در بیشتر این مقاله‌ها تعیین ویژگی‌های غیرخطی هر یک از اجزاء به کمک آزمایش مشخص شده است [۹، ۲۸، ۳۴ و ۳۵].

۳-۱-۱-۲. طراحی‌های جدید

ارائه طراحی‌های جدید، دسته دیگری از مقاله‌های ارائه‌شده در این حوزه را تحت پوشش قرار می‌دهد. به‌عنوان نمونه دسته‌موتوری با قابلیت کاهش ارتعاشات در دو فرکانس فاق برای کاربردهای هوایی [۲۱ و ۳۶]، دسته‌موتوری با جداساز ثابت [۳۷]، دسته‌موتوری با جداساز غیرشناور و مستقیم [۳۸] برای کاربردهای خودرو از جمله این مقاله‌ها می‌باشند. شکل ۴، دسته‌موتور ارائه‌شده در مرجع [۲۱] را نمایش می‌دهد. در این طرح با بهره‌گیری از سه محفظه برای سیال و دو مسیر اینرسی بین آنها، یک دسته‌موتور هیدرولیکی با سختی دینامیکی دارای دو فرکانس فاق معرفی شده است. البته باید توجه داشت که تنوع بیشتری از مقالات در حوزه طراحی‌های جدید در دسته‌موتورهای شبه‌فعال وجود دارد.

۳-۱-۱-۳. تعیین پارامترهای دسته‌موتور

پارامترهای تأثیرگذار بر سختی دینامیکی یک دسته‌موتور عبارت‌اند از:

۱. سختی و استهلاک لاستیک اصلی

۲. سطح مؤثر لاستیک اصلی برای پمپ‌کردن سیال به محفظه پایینی

۳. سختی حجمی محفظه‌های سیال

۴. اینرسی و استهلاک سیال درون مسیر اینرسی

پارامترهای دسته‌موتور عموماً با استفاده از روش المان محدود [۵، ۳۹-۴۵] و یا آزمایش‌های تجربی تعیین می‌شوند. در روش المان محدود، اطلاع دقیق از شکل

۵-۱-۱-۳. طراحی بهینه دستموتور هیدرولیکی

مطالعات انجام شده در این حوزه بر پایه بهینه‌سازی پارامترهای دستموتور هیدرولیکی برای دستیابی به شرایط مورد نظر برای خصوصیات دینامیکی انجام شده است. در پاره‌ای از مقاله‌ها کاهش سختی دینامیکی در فرکانس فاق و در فرکانس قله^{۳۱} به‌عنوان تابع هدف انتخاب شده است [۵۳ و ۵۵] و در پاره‌ای دیگر، تنظیم پارامترها برای انطباق فرکانس‌های تشدید بر فرکانس‌های مورد نظر، به‌عنوان هدف در نظر گرفته شده است [۵۶]. کاهش شتاب مطلق و جابه‌جایی نسبی موتور و بدنه در گستره فرکانسی، تابع هدف پژوهش انجام شده توسط چریستوفرسون و نخعی جزار است [۵۷]. بهینه‌سازی دستموتور برای مدل‌های مختلف خودرو از دیگر مقاله‌های ارائه شده در این زمینه است [۵۸]. روش‌های استفاده شده برای بهینه‌سازی عبارت‌اند از:

۱. روش جذر میانگین مربعات [۵۷]

۲. روش شبکه‌های عصبی [۵۶]

۳. روش سیمپلکس با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک [۵۳]

۴. روش الگوریتم حیات مصنوعی [۵۴]

۲-۱-۳. دستموتورهای هیدرولیکی شبه‌فعال

دستموتورهای غیرفعال قادر به حل تمامی مشکلات ایجاد شده در حین عملکرد موتور نیستند. از جمله آنکه این دستموتورها به‌هنگام اعمال بارهای سینوسی تک‌فرکانسی وارده عملکرد خوبی ندارند، حال آنکه اعمال بارهای اضافی دیگر در عملکرد آنها اختلال ایجاد می‌کند [۵۹]. از دیگر مشکلات آنها، تغییر در فرکانس فاق طراحی شده پس از ساخت دستموتور می‌باشد که به دلیل مراحل ساخت، عمر تجهیز و یا شرایط دمایی اتفاق می‌افتد [۲۲]. با علم به این مسائل، دستموتورهای شبه‌فعال مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

دستموتور شبه‌فعال اصطلاحاً به دستموتوری غیرفعال شامل اجزایی با قابلیت تغییر در برخی پارامترها گفته

می‌شود. در کنترل شبه‌فعال با تغییر پارامترهای سامانه، پاسخ دینامیکی سامانه قابل تغییر می‌باشد. پارامترهای قابل کنترل در دستموتور شبه‌فعال عمدتاً استهلاک و سختی سامانه است. در مقاله‌های گوناگون، روش‌های متفاوتی برای انجام این تغییرات ارائه شده است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود. در اغلب موارد، ایده اصلی کنترل ارتعاشات به‌صورت شبه‌فعال بر پایه هدرفت انرژی از سامانه و به‌طور معمول با تغییر بر خواص استهلاک سامانه استوار می‌باشد. این طرح عموماً در یک ساختار مدار باز به‌کار گرفته می‌شود و مشکلات ناپایداری به دلیل هدرفت انرژی مطرح نمی‌باشد [۱].

در اغلب موارد، دستموتورهای شبه‌فعال برای بهبود وضعیت کارایی سامانه در محدوده فرکانسی پایین استفاده می‌شوند. برای بهبود جداسازی ارتعاشات در فرکانس‌های بالا روش‌های کنترل فعال پیشنهاد شده است. دستموتورهای شبه‌فعال برای بهبود ویژگی‌های فرکانس پایین سامانه با افزایش استهلاک و همچنین بهره‌گیری از پهناهای باند فرکانس فاق به‌کار گرفته می‌شوند. تحقیقات روی این دستموتورها از دهه ۸۰ میلادی آغاز شده است. میزوگوچی و همکاران (۱۹۸۴ م) دستموتور کنترل شونده الکترونیکی ارائه دادند، که با استفاده از شیر چرخان سلونوئیدی، روزنه بین دو محفظه سیال تغییر می‌نمود [۶۰]. مولر و اکل (۱۹۸۶ م) نیز دستموتوری که ویژگی‌های میرایی آن با باز شدن مسیرهای مختلف عبور سیال به کمک ایجاد خلاء جزئی تغییر می‌کرد، طراحی و آزمایش کردند [۶۱]. سختی دینامیکی با این طراحی در سرعت بی‌بار به حداقل نصف سختی استاتیکی رسید. در سال ۱۹۸۷ م، وست دستموتور هیدرومکانیکی شبه‌فعال را با استفاده از فنر هوا در آن ارائه کرد [۶۲]. پس از این سال‌ها، استفاده از سیالات هوشمند همچون سیالات الکترورنولوژیکی^{۳۲} و مگنتورئولوژیکی^{۳۳} در کنار سایر طراحی‌ها مورد توجه قرار گرفتند که در ادامه بدانها اشاره می‌شود.

۱-۲-۱-۳. دسته‌موتورهای هیدرولیکی شبه‌فعال با استفاده از سیال الکترورنولوژیکال

مقاله‌های ارائه‌شده در این حوزه بیشتر بر پایه طراحی‌های جدید از دسته‌موتورها با تأثیر بر خواص تحت میدان الکتریکی سیالات الکترورنولوژیکال می‌باشد. ویلیامز و همکاران (۱۹۹۳ م) مدل ساده‌ای از دسته‌موتور خودروها با استفاده از سیال الکترورنولوژیکال در حالت فشرده‌گی ارائه دادند. آنها رفتار سامانه به ورودی سینوسی را شبیه‌سازی کرده، نتایج تحلیل را با داده‌های مدل واقعی ساخته‌شده مقایسه کردند [۶۳]. در همان سال، اسپروستون و همکاران ساخت و آزمایش این نوع دسته‌موتور شبه‌فعال را در غالب مقاله‌ای منتشر کردند [۶۴]. چوی و همکاران (۱۹۹۹ م) نیز دسته‌موتوری را براساس سیال الکترورنولوژیکال (براساس مدل بینگهام^{۳۴})، که در حالت ترکیبی جریان و برشی کار می‌کند، برای خودروهایی با اندازه متوسط طراحی و ساختند. همچنین کارایی دسته‌موتور ساخته‌شده را با دسته‌موتورهای غیرفعال مقایسه کردند. سپس کارایی این دسته‌موتور را به‌هنگام اعمال بارهای استاتیکی زیاد (۲۰۰ کیلوگرم) مورد بررسی قرار دادند [۱۹]. خصوصیت این دسته‌موتور استفاده از الکترودهایی با طول کوچک و فاصله کم بین دو الکتروده موازی می‌باشد. آنها همچنین نشان دادند که شتاب و جابه‌جایی منتقل‌شده با استفاده از کنترلرهای اسکای‌هوک^{۳۵} قابل کاهش می‌باشد [۶۵]. از آخرین دسته‌موتورهای طراحی‌شده با سیال الکترورنولوژیکال می‌توان به طراحی یانگ و همکاران اشاره کرد [۶۶]. مدل ریاضی و شبیه‌سازی این طراحی به کمک نرم‌افزار متلب^{۳۶} و بسته سیمولینک^{۳۷} انجام شده است. لازم به ذکر است که استفاده از سیالات الکترورنولوژیکال به دلیل مشکلاتی چون نیاز به ولتاژ بالا برای تحریک، در وسائل تجاری با محبوبیت روبرو نشده است و عملاً این وسائل در حد پژوهش‌های دانشگاهی باقی مانده‌اند. در عوض، سیالات مگنتورنولوژیکال با توجه به شرایط آسان‌تر برای تحریک در وسائل تجاری بسیاری به کار گرفته شده‌اند.

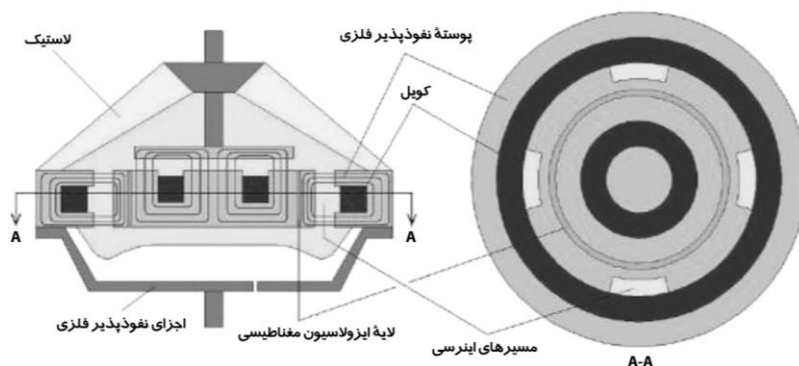
۲-۱-۲-۳. دسته‌موتورهای هیدرولیکی شبه‌فعال با استفاده از سیال مگنتورنولوژیکال

تاکنون طرح‌های متفاوتی از کاربرد سیالات مگنتورنولوژیکال در دسته‌موتورهای هیدرولیکی متناسب با نوع کاربرد ارائه شده است. آن و همکاران (۱۹۹۹ م) با استفاده از یک سامانه کنترل ساده با استفاده از سیال مگنتورنولوژیکال مسیر عبور سیال بین دو محفظه را بازبسته نمودند و با انجام این کار نشان دادند که قلّه ایجادشده در سختی دینامیکی دسته‌موتور پس از فرکانس فاق قابل کاهش می‌باشد [۶۷]. احمدیان و آن نیز در مقاله دیگری با استفاده از این نوع سیال در یک دسته‌موتور غیرفعال (که با اعمال جریان مسیر عبور سیال بین دو محفظه بازبسته شدن می‌شود)، تأثیر استفاده از این سیال را بر کارایی دسته‌موتور مورد بررسی قرار دادند [۶۸]. در این مقاله نشان داده شده است که سختی لاستیک، سطح مؤثر پیستون و سختی حجمی سیال تأثیر زیادی بر کارایی دسته‌موتور در این حالت دارد. در این دو پژوهش از حالت جریان سیال (شکل ۵) برای به‌کارگیری سیال استفاده شده است.

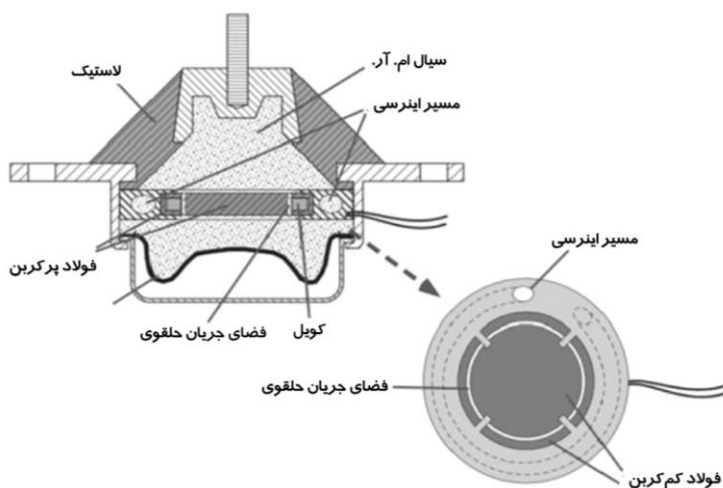
چوی و همکاران (۲۰۰۲ م) نیز دسته‌موتوری شبه‌فعال با سیال مگنتورنولوژیکال برای نصب روی خودروها ارائه دادند [۶۹]. از جمله ویژگی‌های مهم کار آنها استفاده از مدل کامل خودرو برای بررسی عملکرد دسته‌موتور طراحی‌شده بود. الگوریتم مورد استفاده برای کنترل در این پژوهش برمبنای کنترلر اسکای‌هوک بود. بریگلی و همکاران (۲۰۰۷ م) نیز یک جداکننده با سیال مگنتورنولوژیکال ساختند که در آن از حالت‌های سه‌گانه سیال شامل برشی، جریان و فشرده‌گی استفاده می‌شد [۷۰]. مدل ریاضی این جداکننده نیز استخراج و پارامترهای مورد نیاز با استفاده از آزمایش جایگزین شده‌اند. ارزانیور و گل‌نراقی (۲۰۰۸ م) با به‌کارگیری این سیال هوشمند، دسته‌موتوری شبه‌فعال برای کاهش ارتعاشات و نوفه در موتورهای جابه‌جایی متغیر طراحی کردند و ساختند [۷۱]. نتایج حاصل از مدل ریاضی این دسته‌موتور نیز با نتایج تجربی مقایسه شد. استهلاک

مورد نیاز دسته‌موتور برای به‌صرفه‌بودن طراحی انجام گرفته از نظر اقتصادی، با استفاده از یک محفظه جدا حاوی این سیال هوشمند تأمین گردید که سختی و استهلاک متغیر با میدان مغناطیسی را فراهم می‌آورد. کیوکائل و همکاران دسته‌موتوری با سیال مگنتورئولوژیکال در حالت ترکیبی جریان و فشردگی طراحی و شبیه‌سازی نمودند و نشان دادند که عملکرد دسته‌موتور در حالت ترکیبی سبب کارایی آن در گستره فرکانسی بیشتری می‌شود [۷۲]. معادلات با استفاده از نرم‌افزار متلب و سیمولینک برای مقادیر خاصی از پارامترها حل شده است. ضمناً در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ماکسول^{۳۸} شبیه‌سازی میدان مغناطیسی درون مسیر عبور سیال بین دو محفظه مدل‌سازی شده است. در شکل ۷ عنمایی شماتیک از

دسته‌موتور طراحی‌شده توسط این گروه نمایش داده شده است. کارایی سیال مگنتورئولوژیکال ساخته‌شده در شرکت لرد^{۳۹} (بزرگترین سازنده این نوع سیال)، توسط باربر و کارلسون (۲۰۱۰ م) برای دو نوع دسته‌موتور آزمایش و در هریک از حالت‌ها ویژگی‌های دینامیکی دسته‌موتور و سختی دینامیکی آن نمایش داده شده است [۷۳]. در این پژوهش هیچ‌گونه شبیه‌سازی ارتعاشی برای دسته‌موتور هیدرولیکی طراحی‌شده 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 دسته‌موتور متناسب با جابه‌جایی وارده توسط کنترل مسیر تعبیه‌شده صورت گرفته است. این طراحی در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۵. دسته‌موتور هیدرولیکی شبه‌فعال مگنتورئولوژیکال [۷۲]



شکل ۶. دسته‌موتور هیدرولیکی مگنتورئولوژیکال [۷۳]

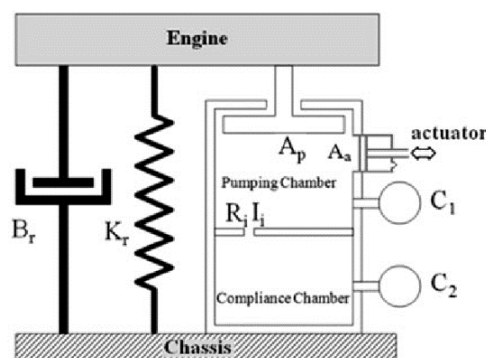
۳-۲-۱-۳. دیگر طراحی‌ها

در کنار طرح‌های ذکر شده با استفاده از سیالات هوشمند، گروهی از پژوهشگران با استفاده از سازوکارهایی خاص، ایجاد تغییر در برخی پارامترهای دسته‌موتور هیدرولیکی را ممکن کرده‌اند. تغییر در سختی لاستیک اصلی در پژوهشی توسط فومنی و همکاران (۲۰۰۲ م) به کمک آلیاژهای حافظه‌دار^{۴۰} جا داده شده در لاستیک ایجاد شده است [۴۴]. در این تحلیل، شبیه‌سازی به کمک روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار انسیس انجام شده است. تغییر در مساحت جداساز و طول مسیر اینرسی [۲۶]، تغییر در مساحت مسیر اینرسی [۷۶]، تغییر همزمان سطح مقطع و طول مسیر اینرسی [۷۷] و تغییر پروفیل مسیر اینرسی [۷۸] از دیگر طراحی‌های انجام شده برای کنترل خواص دینامیکی دسته‌موتور است. تغییر در سختی حجمی^{۴۱} محفظه پایینی به منظور تنظیم فرکانس فاق بر روی فرکانس مورد نظر پس از ساخت دسته‌موتور، با به کارگیری سازوکارهای متفاوت نیز در پژوهش‌هایی مطرح شده است [۲۲، ۲۳ و ۷۹]. به‌طور کلی، دسته‌موتورهای شبه‌فعال در گستره فرکانسی محدودتری نسبت به دسته‌موتورهای فعال به کار گرفته می‌شوند. ضمن آنکه در آنها ارتعاشات به‌طور کامل حذف نمی‌شود [۸۰]. مزیت این نوع از دسته‌موتورها نسبت به نوع فعال، قابلیت اطمینان بیشتر، هزینه و انرژی مورد نیاز کمتر می‌باشد.

۳-۱-۳. دسته‌موتورهای هیدرولیکی فعال

در کنترل فعال ارتعاشات، نیروی دینامیکی خنثی‌کننده‌ای به کمک یک یا چند محرک برای حذف نیروهای اعمالی، در سامانه تولید می‌شود. به عبارت دیگر منبع انرژی بایستی به صورت مداوم انرژی مورد نیاز محرک‌ها برای غلبه بر ارتعاشات وارده را تأمین نماید [۱]. یک دسته‌موتور فعال معمولاً از یک دسته‌موتور غیرفعال، محرک تولیدکننده نیرو، حسگر و کنترلر تشکیل شده است. محرک مورد استفاده در این نوع از دسته‌موتورها بیشتر محرک‌های الکترومغناطیس

لازم به ذکر است استفاده از سیال مگنتورئولوژیکال در دسته‌موتورهای هیدرولیکی شبه‌فعال، با تغییر در خصوصیات استهلاک آنها همراه است. در دیگر طراحی‌های انجام شده برای دسته‌موتورهای هیدرولیکی شبه‌فعال، سایر ویژگی‌ها به خصوص سختی نیز مد نظر قرار گرفته است.



شکل ۷. نمایش شماتیک از دسته‌موتور فعال ارائه شده در مأخذ [۹۱]

کاهش مؤثر سختی دینامیکی در فرکانس قله، به کمک طراحی جدیدی از دسته‌موتورهای هیدرولیکی بر پایه استفاده از سیال مگنتورئولوژیکال توسط تیکنی و همکاران (۲۰۱۲ م) ارائه شده است [۷۴]. در این طراحی، دسته‌موتور دارای دسته‌موتوری داخلی است که با سیال مگنتورئولوژیکال پر شده است و تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد. با اعمال میدان مغناطیسی خواص دینامیکی دسته‌موتور تغییر می‌کند و سختی دینامیکی در فرکانس قله کاهش می‌یابد. مدل‌سازی و طراحی دسته‌موتور شبه‌فعال با سیال مگنتورئولوژیکال برای کاربردهای خودرو توسط فرجود و همکاران (۲۰۱۴ م) انجام شده است [۷۵]. در تحلیل انجام شده، با در نظر گرفتن حوزه‌های مختلف انرژی سعی شده است آثار غیرخطی بین اجزای گوناگون دسته‌موتور شامل دینامیک سیال، مسیر اینرسی، اجزای الاستیک، جداساز، مدار مغناطیسی، راه‌انداز الکتریکی و الگوریتم کنترلی در نظر گرفته شود.

یا پیزوالکتریک است. در مواردی که در سامانه کنترل فعال مشکلاتی نظیر خرابی ایجاد شود، دسته‌موتور غیرفعال وظیفه کاهش ارتعاشات را برعهده می‌گیرد [۱]. در این دسته‌موتورها، حسگر نیرو یا شتابسنج سیگنال کنترل را به کنترلر برای تنظیم دامنه و فاز نیروی تولیدی توسط محرک می‌فرستد تا سیگنال اندازه‌گیری شده توسط حسگر به حداقل میزان خود برسد [۲]. در تحقیقات انجام شده، تاکنون کنترلرهای گوناگونی برای فعال نمودن دسته‌موتورها به کار گرفته شده است. کنترل فعال ارتعاشات، معمولاً با اندازه‌گیری به‌هنگام حسگر در یک کنترل مداربسته صورت می‌پذیرد. در مقایسه بین دسته‌موتورهای فعال و غیرفعال، چون در دسته‌موتورهای فعال از حسگر، واحد کنترل و منبع انرژی استفاده می‌شود، وزن، قیمت و اتلاف انرژی در آنها بالاست، ضمن آنکه قابلیت اطمینان آنها کاهش می‌یابد. این نقاط ضعف به نیاز برای تحقیقات بیشتر جهت بهبود این دسته موتورها منتهی می‌شود.

از جمله پژوهش‌های انجام شده در این حوزه می‌توان به ارائه دسته‌موتور فعالی شامل دسته‌موتور غیرفعال و محرک الکترومغناطیس توسط میلر و همکاران اشاره کرد که با تأثیرگذاری بر میزان سختی دینامیکی در گستره فرکانسی خاصی کاهش قابل ملاحظه‌ای ارتعاشات انتقال یافته را نسبت به دسته‌موتورهای غیرفعال نتیجه گرفته است [۸۱]. استفاده از الگوریتم‌های کنترل تطبیقی [۸۰، ۸۲ - ۸۵] و کنترل مقاوم [۸۶] در پژوهش‌های گوناگونی برای کنترل دسته‌موتورهای فعال به کار گرفته شده است. هیلیس و همکاران با در نظر گرفتن یک دسته‌موتور غیرفعال، که شامل دسته‌موتوری غیرفعال و محرکی الکترومغناطیسی می‌باشد، به بررسی دو روش FxLMS و Er-MCSI پرداختند [۸۷]. در این مقاله نشان داده شده است که از دید عملی هر دو الگوریتم عملکرد یکسانی را نمایش می‌دهند.

ارائه دسته‌موتور فعال برای کنترل ارتعاشات خودروهای سنگین با موتور دیزل نیز در پژوهش دیگری توسط پژوهشگران ژاپنی ارائه شده است [۸۴]. لی و همکاران (۲۰۰۹ م) نمونه اولیه دسته‌موتور فعالی با قیمت پایین برای استفاده در خودروهای تجاری ارائه دادند [۸۸]. برای تخمین ارتعاشات در این مطالعه، الگوریتم کنترلی پیش‌خور، جایگزین حسگرهای پس‌خور مورد نیاز برای سامانه شده و تنها یک حسگر برای نمایش ارتعاشات انتقال یافته از موتور به شاسی استفاده شده است. این پژوهشگران در مطالعه دیگری طراحی بهینه این دسته‌موتور را با توجه به کارایی محرک انجام داده‌اند [۸۹]. دسته‌موتور فعال به منظور کاهش ارتعاشات موتورهای پیستونی دو حلاله توسط ارزانیور و گل‌نراقی (۲۰۱۰ م) با کنترل فشار محفظه سیال توسط آهنربای دائمی و محرک الکترومغناطیسی ارائه شده است [۹۰]. کاربرد دسته‌موتورهای فعال در صنایع کشتی نیز در پژوهشی توسط ماتیس و همکاران (۲۰۰۷ م) ارائه شده است [۹۲].

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله انواع دسته‌موتورهای هیدرولیکی شامل دسته‌موتورهای غیرفعال، شبه‌فعال و فعال مقایسه شدند و درباره مزایا و معایب هر یک بحث شد. در ادامه، تحقیقات انجام شده در هر حوزه به همراه روند تکمیل فناوری دسته‌موتورها بیان شد. با نگاهی بر مقاله‌های ارائه شده و روند حاکم بر توسعه این عرصه تحقیقاتی می‌توان دریافت که علاقه به فعالیت در حوزه دسته‌موتورهای شبه‌فعال با به‌کارگیری مواد هوشمند از جمله سیالات مگنتورئولوژیکال، همچنین دسته‌موتورهای فعال با قابلیت اطمینان بالا و هزینه کم از دیگر زمینه‌های این حوزه گوی سبقت را ربوده و سهم عمده‌ای از پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده است.

- [1] Yu, Y., S. M. Peelamedu, N. G. Naganathan, R. V. Dukkipati. "Automotive Vehicle Engine Mounting Systems: A Survey." *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 123, 2001, pp. 186-194.
- [2] Jazar, G. N., F. Golnaraghi. "Engine Mounts for Automotive Applications: A Survey." *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 34, No. 5, 2002, pp. 363-379.
- [3] Barbetti, M. R. S., R. S. Barbosa. "Comparative Study between Hydraulic and Elastomeric mount, both applied for automotive engine mount system." *SAE technical paper series*, Vol. 2006-01-2608, 2006.
- [4] Ahn, Y. K., M. Ahmadian, S. Morishita. "On the design and development of a Magneto-Rheological mount." *Vehicle System Dynamics*, Vol. 32, No. 2, 1999, pp. 199-216.
- [5] Shangguan, W. B., Z. H. Lu. "Modelling of a hydraulic engine mount with fluid-structure interaction finite element analysis." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 275, No. 1-2, 2004, pp. 193-221.
- [6] Miller, L. R., M. Ahmadian, C. M. Nobles, D. A. Swanson. "Modelling and Performance of an Experimental Active Vibration Isolator." *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 117, No. 3A, 1995, pp. 272-278.
- [7] Ungar, E. E., D. Ross. "Vibrations and noise due to piston-slap in reciprocating machinery." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 2, No. 2, 1965, pp. 132-146.
- [8] Yu, Y., N. G. Naganathan, R. V. Dukkipati. "A Literature Review of Automotive Vehicle Engine Mounting Systems." *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 36, 2001, pp. 123-142.
- [9] Kim, G., R. Singh. "Nonlinear analysis of automotive hydraulic engine mount." *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME*, Vol. 115, No. 3, Sep, 1993, pp. 482-487.
- [10] Jesse, D., *Aircraft Engine Attachment and Vibration Control*, 2001.
- [11] Miller, L. R., A. M. *Active Mounts - A Discussion of Future Technological Trends, in Inter-noise*, Toronto, Canada, 1999.
- [12] Marjoram, R. H. "Pressurized Hydraulic Mounts for Improved Isolation of Vehicle Cabs." *SAE paper*, Vol. 852349.
- [13] Bernuchon, M. "A New Generation of Engine Mounts." *SAE Technical Paper Series*, Vol. 840259, 1984.
- [14] Corcoran, P. E., G. H. Ticks. "Hydraulic Engine Mount Characteristics." *SAE Technical Paper Series*, Vol. 840407, 1984.
- [15] Muzechuk, R. A. "Improved Engine Isolation." *SAE Technical Paper Series*, Vol. 840410, 1984.
- [16] Flower, W. C. "Understanding Hydraulic Mounts for Improved Vehicle Noise." *SAE Technical Paper Series*, Vol. 850975, 1985
- [17] Singh, R., G. Kim, P. V. Ravindra. "Linear analysis of automotive hydromechanical mount with emphasis on decoupler characteristics." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 158, No. 2, Oct 22, 1992, pp. 219-243.

- [18] Ahmadian, M., Y. K. Ahn. "Performance Analysis of Magneto-Rheological Mounts." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, No. 3, March 1, 1999, pp. 248-256.
- [19] Choi, S. B., Y. T. Choi, C. C. Cheong, Y. S. Jeon. "Performance evaluation of a mixed mode ER engine mount via hardware-in-the-loop simulation." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, No. 8, Aug, 1999, pp. 671-677.
- [20] Ciocanel, C., T. Nguyen, M. Elahinia. "Design and modeling of a mixed mode magnetorheological (MR) fluid mount." in *Proceeding of SPIE 6928, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2008*.
- [21] Vahdati, N. "Double-notch single-pumper fluid mounts." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 285, No. 3, 2005, pp. 697-710.
- [22] Vahdati, N., M. Ahmadian. "Single Pumper Semi-Active Fluid Mount." in *Proceeding of ASME*, pp. 167-175.
- [23] Vahdati, N., M. Ahmadian. "Variable volumetric stiffness fluid mount design." *Shock and Vibration*, Vol. 11, No. 1, 2004, pp. 21-32.
- [24] Golnaraghi, M. F., 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, 2001, pp. 495-526.
- [25] Lee, B. H., C. W. Lee. "Model based feed-forward control of electromagnetic type active control engine-mount system." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 323, No. 3-5, 2009, pp. 574-593.
- [26] Foumani, M. S., A. Khajepour, M. Durali. "A new high-performance adaptive engine mount." *Journal of Vibration and Control*, Vol. 10, No. 1, 2004, pp. 39-54.
- [27] Vahdati, N. "a detailed mechanical model of a double pumper fluid mount." *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, Vol. 120, No. 2, 1998, pp. 361-370.
- [28] Kim, G., R. Singh. "A study of passive and adaptive hydraulic engine mount systems with emphasis on non-linear characteristics." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 179, No. 3, 1995, pp. 427-453.
- [29] Jazar, G. N., M. F. Golnaraghi. "Nonlinear modeling, experimental verification, and theoretical analysis of a hydraulic engine mount." *Journal of Vibration and Control*, Vol. 8, No. 1, 2002, pp. 87-116.
- [30] Ohadi, A. R., G. Maghsoodi. "Simulation of engine vibration on nonlinear hydraulic engine mounts." *Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME*, Vol. 129, No. 4, Aug, 2007, pp. 417-424.
- [31] Colgate, J. E., C. T. Chang, Y. C. Chiou, K. Liu, L. M. Keer. "Modelling of a hydraulic engine mount focusing on response to sinusoidal and composite excitations." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 184, No. 3, 1995, pp. 503-528.
- [32] Lee, J. H., K. H. Kim. "An efficient technique for design of hydraulic engine mount via, design, variable-embedded damping modeling." *Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME*, Vol. 127, No. 1, Feb, 2005, pp. 93-99.
- [33] Adiguna, H., 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, 2003, pp. 217-248.

- [34] He, S., S. R. “Discontinuous compliance nonlinearities in the hydraulic engine mount.” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 307, 2007, pp. 545-563.
- [35] Geisberger, A., A. Khajepour, F. Golnaraghi. “Non-linear modelling of hydraulic mounts: Theory and experiment.” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 249, No. 2, 2002, pp. 371-397.
- [36] Tikani, R., 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, 2011, pp. 1644-1656.
- [37] Nakhaie Jazar, G., J. Christopherson. “Development of a new design hydraulic engine mount.” in *Proceeding of Design Engineering*, 2005, pp.1125-1132.
- [38] Christopherson, J., G. N. Jazar. “Dynamic behavior comparison of passive hydraulic engine mounts. Part 1: Mathematical analysis.” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 290, No. 3-5, Mar 7, 2006, pp. 1040-1070.
- [39] Wang, L. R., J. C. Wang, I. Hagiwara. “An integrated characteristic simulation method for hydraulically damped rubber mount of vehicle engine.” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 286, No. 4-5, Sep 22, 2005, pp. 673-696.
- [40] Christopherson, J., G. N. Jazar. “Dynamic behavior comparison of passive hydraulic engine mounts. Part 2: Finite element analysis.” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 290, No. 3-5, Mar 7, 2006, pp. 1071-1090.
- [41] Zhang, Y. Q., W. B. Shangguan. “A novel approach for lower frequency performance design of hydraulic engine mounts.” *Computers and Structures*, Vol. 84, No. 8-9, 2006, pp. 572-584.
- [42] Shangguan, W., Z. H., S. J. Lu. “Finite Element Analysis of Static Elastic Characteristics of the Rubber Isolators in Automotive Dynamic Systems.” *SAE Paper*, Vol. 2003-01-0240, 2003.
- [43] Shangguan, W. B., Z. H. Lu. “Experimental study and simulation of a hydraulic engine mount with fully coupled fluid-structure interaction finite element analysis model.” *Computers & Structures*, Vol. 82, No. 22, Sep, 2004, pp. 1751-1771.
- [44] Foumani, M. S., A. Khajepour, M. Durali. “Application of Shape Memory Alloys to a New Adaptive Hydraulic Mount.” *SAE paper*, 2002, pp. 2002-01-2163.
- [45] Jahani, K., M. Dehnad. “Identifying the frequency dependent material property of a hydraulic engine mount through an iterative procedure using 3D finite element modeling.” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 6, 2014, pp. 2041-2047.
- [46] Fan, R., Z. Lu. “Fixed points on the nonlinear dynamic properties of hydraulic engine mounts and parameter identification method: Experiment and theory.” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 305, No. 4-5, 2007, pp. 703-727.
- [47] Fan, R. L., Z. H. Lu. “The fixed points on the nonlinear dynamic properties and the parameters identification method for hydraulic engine mount.” *SAE International Journal of Engines*, Vol. 1, No. 1, 2009, pp. 1303-1311.
- [48] Yoon, J. Y., R. Singh. “Indirect measurement of dynamic force transmitted by a nonlinear hydraulic mount under sinusoidal excitation with focus on super-harmonics.” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 25, 2010, pp. 5249-5272.

- [49] Yoon, J. Y., R. Singh. "Dynamic force transmitted by hydraulic mount: Estimation in frequency domain using motion and/or pressure measurements and quasi-linear models." *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 58, No. 4, 2010, pp. 403-419.
- [50] Zhang, H., X. Zhang, S. Ji, Y. Guo, G. Ledezma, N. Elabbasi, H. DeCougny. "Recent development of fluid-structure interaction capabilities in the ADINA system." *Computers and Structures*, Vol. 81, No. 8-11, 2003, pp. 1071-1085.
- [51] Cao, Z., J. Li, K. Guo, Q. Zhang. "Simulation research on strong fluid-solid interaction of hydraulic engine mount." *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2013, pp. 1235-1247.
- [52] Cao, Z. L., J. Li, K. H. Guo, Q. Zhang. "Simulations of dynamic characteristics of hydraulic engine mounts by FEM with strong fluid-structure coupling." *Journal of Vibration and Shock*, Vol. 3, No. 10, 2012, pp. 4-8.
- [53] Ahn, Y. K., Y. C. Kim, B. S. Yang, M. Ahmadian, K. K. Ahn, S. Morishitah. "Optimal design of an engine mount using an enhanced genetic algorithm with simplex method." *Vehicle System Dynamics*, Vol. 43, No. 1, 2005, pp. 57-81.
- [54] Ahn, Y. K., J. D. Song, B. S. Yang. "Optimal design of engine mount using an artificial life algorithm." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 261, No. 2, pp. 309-328, 2003
- [55] Y. K. Ahn, J. D. Song, B. S. Yang, K. K. Ahn, S. Morishita, Optimal design of nonlinear hydraulic engine mount." *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 3, 2005, pp. 768-777.
- [56] Li, Q., J. C. Zhao, B. Zhao, X. S. Zhu. "Parameter optimization of a hydraulic engine mount based on a genetic neural network." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 223, No. 9, 2009, pp. 1109-1117.
- [57] Christopherson, J., G. N. Jazar. "Optimization of classical hydraulic engine mounts based on RMS method." *Shock and Vibration*, Vol. 12, No. 2, 2005, pp. 119-147.
- [58] Rasekhipour, Y., A. Ohadi. "Optimization of hydraulic engine mounts through simplified and full vehicle models." in *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol III*, pp. 2507-2513.
- [59] Ushijima, T., K. Takano, H. Kojima. "High Performance Hydraulic Mount for Improving Vehicle Noise and Vibration." *SAE Paper*, Vol. 880073, 1988.
- [60] Mizuguchi, M., T. Suda, S. Chikamori, K. Kobayashi. "Chassis Electronic Control Systems for Mitsubishi 1984 Galant." *SAE Technical Paper Series*, Vol. 840258, 1984
- [61] Muller, M., H. G. Eckel. "Reduction of Noise and Vibration in Vehicle by an Appropriate Engine Mount System and Active Absorbers." *SAE Technical Paper Series*, Vol. 960185, 1986.
- [62] West, J. P. "Hydraulically-Damped Engine Mounting." *Automotive Engineer*, Vol. 12, 1987, pp. 17-19.
- [63] Williams, E. W., S. G. Rigby, J. L. Sproston, and R. Stanway. "Electrorheological Fluids Applied to an Automotive Engine Mount." *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 47, 1993, pp. 221-238.

- [64] Sproston, J. L., R. Stanway, M. J. Prendergast, J. R. Case, C. E. Wilne. "Prototype automotive engine mount using electrorheological fluids." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 4, No. 3, 1993, pp. 418-419.
- [65] Hong, S. R., S. B. Choi. "Vibration Control of an ER Mount Subjected to High Static Loads." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 242, No. 4, 2001, pp. 740-748.
- [66] Yang, H. X., D. M. Liu. "Simulation analysis of a new type of engine fluid hydraulic mount's characteristic in isolating vibration." *Advanced Materials Research*, 2013, pp. 475-478.
- [67] Ahn, Y. K., M. Ahmadian, S. Morishita. "On the Design and Development of a Magneto-Rheological Mount." *Vehicle System Dynamics*, Vol. 32, 1999, pp. 199-216.
- [68] Ahmadian, M., Y. K. Ahn. "Performance Analysis of Magneto-Rheological Mounts." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, 1999, pp. 248-256.
- [69] Choi, S. B., H. H. Lee, H. J. Song, J. S. Park. "Vibration Control of a Passenger Car Using MR Engine Mounts." *Smart Structures and Materials*, Proceedings of SPIE Vol. 4701, 2002.
- [70] Brigley, M., Y. T. Choi, N. M. Wereley, S. B. Choi. "Magnetorheological Isolators Using Multiple Fluid Modes." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 18, 2007, pp. 1143-1148.
- [71] Arzanpour, S., M. F. Golnaraghi. "A Novel Semi-active Magnetorheological Bushing Design for Variable Displacement Engines." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 19, 2008, pp. 989-1003.
- [72] Ciocanel, C., T. Nguyen, M. Elahinia. "Design and Modeling of a Mixed Mode Magnetorheological (MR) Fluid Mount." in Proceeding, 69281C-69281C-10.
- [73] Barber, D. E., J. D. Carlson. "Performance characteristics of prototype MR engine mounts containing glycol MR fluids." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 15, 2010, pp. 1509-1516.
- [74] Tikani, R., S. Ziaei-Rad, N. Vahdati. "Effective reduction of stiffness at peak frequency in hydraulic engine mounts by using magneto-rheological fluids." *Journal of Vibroengineering*, Vol. 14, No. 2, 2012, pp. 866-879.
- [75] Farjoud, A., R. Taylor, E. Schumann, T. Schlangen. "Advanced semi-active engine and transmission mounts: Tools for modelling, analysis, design, and tuning." *Vehicle System Dynamics*, Vol. 52, No. 2, 2014, pp. 218-243.
- [76] Truong, T. Q., K. K. Ahn. "A new type of semi-active hydraulic engine mount using controllable area of inertia track." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 3, 2010, pp. 247-260.
- [77] Wang, M., G. F. Yao, J. Z. Zhao, M. Qin. "A novel design of semi-active hydraulic mount with wide-band tunable notch frequency." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 333, No. 8, 2014, pp. 2196-2211.
- [78] Tikani, R., N. Vahdati, S. Ziaei-Rad. "Two-mode operation engine mount design for automotive applications." *Shock and Vibration*, Vol. 19, No. 6, 2012, pp. 1267-1280.
- [79] Vahdati, N., S. Heidari. "A novel semi-active fluid mount using a multi-layer piezoelectric beam." *Journal of Vibration and Control*, Vol. 16, No. 14, 2010, pp. 2215-2234.

- [80] Lee, Y. W., C. W. Lee. "Dynamic analysis and control of an active engine mount system." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 216, No. 11, 2002, pp. 921-931.
- [81] Miller, L. R., M. Ahmadian, C. M. Nobles, D. A. Swanson. "Modelling and Performance of an Experimental Active Vibration Isolator." *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 117, 1995, pp. 272-278.
- [82] Nakaji, Y., S. Satoh, T. Kimura, T. Hamabe, Y. Akatsu, H. Kawazoe. "Development of an active control engine mount system." *Vehicle System Dynamics*, Vol. 32, No. 2, 1999, pp. 185-198.
- [83] Liang, T. Y., X. L. Tang, W. K. Shi. "Study on electromagnetic actuator active engine mount with adaptive feed-forward control." in Proceeding, pp. 112-115.
- [84] Togashi, C., K. Ichiryu. "A study on hydraulic active engine mount, Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu." *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, Vol. 69, No. 9, 2003, pp. 2302-2307.
- [85] Yang, H. X., R. M. Wang, D. M. Liu. "A study on active engine vibration control by applying hydraulic- piezoelectric mount." *Advanced Materials Research*, 2013, pp. 501-504.
- [86] G. C. Sun, C. H. Zhang, X. Hua. "Active engine vibration isolation using robust control." *Applied Mechanics and Materials*, 2013, pp. 504-507.
- [87] Hillis, A. J., A. J. L. Harrison, D. P. Stoten. "A Comparison of Two Adaptive Algorithms for The Control of Active Engine Mounts." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 286, 2005, pp. 37-54.
- [88] Lee, B. H., C. W. Lee. "Model Based Feed-forward Control of Electromagnetic Type Active Control Engine-Mount System." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 323, 2009, pp. 574-593.
- [89] Lee, B., C. Lee. "Optimal Design of Electromagnetic Type Active Control Engine Mount in Consideration of Actuator Efficiency." *SAE Technical Paper*, Vol. 2007-01-2424.
- [90] Arzanpour, S., M. F. Golnaraghi. "Development of an active compliance chamber to enhance the performance of hydraulic bushings." *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, Vol. 132, No. 4, 2010, pp. 0410121-0410127.
- [91] Mansour, H., S. Arzanpour, F. Golnaraghi. "Design of a solenoid valve based active engine mount." *Journal of Vibration and Control*, Vol. 18, No. 8, 2012, pp. 1221-1232.
- [92] Matthias, M., A. Friedmann, T. Koch, T. Drögemüller. "Active mounts for marine application; the BMBF research project active aggregate mounts to reduce structure vibrations and structure-borne sound transmission." *The 14th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, International Society for Optics and Photonics, 2007.

پی نوشت

1. assembling system
2. engine mount
3. hydraulic engine mount
4. passive engine mount
5. semi-active engine mount

6. active engine mount
7. noise
8. Elastomeric engine mounts
9. hydraulic engine mounts
10. inertia track

-
11. decoupler
 12. inner chamber
 13. upper chamber
 14. orifice plate
 15. volume compensator
 16. nitrogen chamber
 17. elastomeric section
 18. outer member
 19. lower chamber
 20. vibration isolator
 21. notch frequency
 22. idle
 23. turboProbs
 24. turbofans
 25. rotating spools
۲۶. سرعت فن در بوئینگ ۷۳۷ برابر با ۸۵ هرتز، در بوئینگ ۷۵۷ معادل ۶۰ هرتز و در بوئینگ ۷۶۷ برابر با ۵۰ هرتز است.
27. Richard E. Rasmussen
 28. ANSYS[®]
 29. Abaqus[®]
 30. ADINA[®]
 31. peak frequency
 32. electrorheological fluids (ER fluids)
 33. magnetorheological fluids (MR fluids)
 34. Bingham
 35. Skyhook Controller
 36. MATLAB[®]
 37. Simulink[®]
 38. Maxwell
 39. Lord Corporation, <http://lord.com> (accessed March 1, 2015)
 40. shape memory alloy
 41. volumetric stiffness