

# بهینه‌سازی چندهدفه‌ی رفتار ارتعاشی دسته‌موتور هیدرولیکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب

فرزاد فلاحی (دانشجوی دکتری)

رسول شعبانی\* (استاد)

قادر رضازاده (استاد)

سعید تاروردیلو (استاد)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۴۰۰ (ص. ۵۸-۳۹)  
دوری ۳-۳، شماره ۱، ص. ۵۸-۳۹

دسته‌موتورهای لاستیکی عملکرد مناسبی در محدوده‌ی بسامد کاری ندارند؛ از این رو، دسته‌موتورهای هیدرولیکی برای حل این مشکل پیشنهاد شدند. در این مقاله دسته‌موتور هیدرولیکی در بسامدهای پایین بررسی شده و نشان داده شده است که افزایش سفتی دینامیکی و ضریب میرایی با کاهش انتقال‌پذیری دسته‌موتور، سه هدف متضادند؛ بنابراین از الگوریتم ژنتیک با اهداف کاهش انتقال‌پذیری و افزایش سفتی دینامیکی و ضریب میرایی استفاده شده و نمودار جبهه‌ی پارتو رسم شده است. همچنین به منظور انتقال بیشینه‌ی نمودار انتقال‌پذیری به خارج بازه‌ی کاری موتور از تابع جریمه استفاده شده است. با توجه به تضاد اهداف، بهینه‌سازی پاسخ یکتا ندارد و شامل مجموعه‌ی از پاسخ‌هاست. در نهایت به ازای سه دسته پارامتر بهینه، نمودار انتقال‌پذیری، سفتی دینامیکی و ضریب میرایی رسم و اثر بهینه‌سازی مشخص شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش انتقال‌پذیری در بازه‌ی بسامد کاری موتور و همچنین انتقال بیشینه‌ی مقدار آن به خارج بازه‌ی کاری موتور است.

f.fallahi8@gmail.com  
r.shabani@urmia.ac.ir  
g.rezazadeh@urmia.ac.ir  
s.tarverdilo@urmia.ac.ir

واژگان کلیدی: دسته‌موتور هیدرولیکی، شیار اینرسی، جداکننده، بهینه‌سازی.

## ۱. مقدمه

سیال مناسب هستند. جریان سیال بین این دو محفظه سفتی دینامیکی تابع دامنه و بسامد تحریک مورد نیاز برای مجرا کردن ارتعاشات را فراهم می‌سازد. برای ایجاد سفتی دینامیکی بالا در بسامدهای پایین از شیار اینرسی استفاده می‌شود که مسیری با میرایی بسیار بالا بین محفظه‌های بالایی و پایینی است و برای کاهش این سفتی در بسامدهای بالا از دی‌کوپلر<sup>۱</sup> که صفحه‌ی معلق بین دو محفظه است، استفاده می‌شود. یکی از مزایای این دسته‌موتورها وجود بسامدی است که در آن بسامد، سفتی دینامیکی دسته‌موتور از سفتی استاتیکی آن پایین‌تر است. به این بسامد، بسامد نوچ<sup>۲</sup> گفته می‌شود. در توربین‌های مورد استفاده در صنایع هوافضا که توربین معمولاً در دور موتور ثابتی کار می‌کند، دسته‌موتور هیدرولیکی به نوعی طراحی می‌شود که بسامد کاری آن منطبق بر بسامد نوچ باشد. نمونه‌ی از این کار در مراجع<sup>[۱-۵]</sup> آورده شده است. بنابراین دسته‌موتور هیدرولیکی برای استفاده در موتورهای با دور کاری متغیر و ثابت مناسب است. پژوهش‌های زیادی در ارتباط با مدل‌سازی دسته‌موتور در سال‌های اخیر صورت گرفته است که در این بخش تعدادی از آنها آورده شده است. سینگ و همکاران<sup>[۶]</sup> دسته‌موتور هیدرولیکی را با در نظر گرفتن تحریک جابه‌جایی مدل‌سازی کردند. در این تحقیق هر دو حالت دی‌کوپلر ثابت و آزاد بررسی شد. کلگیث و همکاران<sup>[۷]</sup> با ارائه‌ی دو مدل ریاضی خطی جداگانه برای بسامدهای پایین

دسته‌موتور قطعه‌ی است که برای مجرا کردن موتور از شاسی و نگهداشتن موتور در وسایل نقلیه استفاده می‌شود. در موتورهای با دور کاری متغیر مانند موتورهای بنزینی و دیزلی که بسامد کاری موتور متغیر است، دسته‌موتور باید سفتی دینامیکی تابع دامنه و بسامد تحریک داشته باشد. در توربین‌ها و الکتروموتورها که معمولاً دور کاری ثابت است، برای انتقال‌پذیری پایین باید سفتی دینامیکی دسته‌موتور در بسامد کاری کمینه مقدار خود را داشته باشد. دسته‌موتور موتورهای بنزینی چهارسینلندر معمولاً تحت تحریک با دامنه‌ی بالا (حدود ۱ میلی‌متر) در بسامدهای پایین‌تر از ۳۰ هرتز و تحریک با دامنه‌ی پایین (حدود ۱/۰ میلی‌متر) در بسامدهای بالای ۳۰ هرتز است. بنابراین، برای عملکرد مناسب، دسته‌موتور باید در بسامدهای پایین دارای سفتی دینامیکی بالا و در بسامدهای بالا دارای سفتی دینامیکی پایینی باشد. دسته‌موتورهای الاستومری به دلیل ثابت بودن سفتی و میرایی در بازه‌ی بسامد کاری موتور، توانایی ارضای شرایط مذکور را ندارند. بنابراین، دسته‌موتورهای هیدرولیکی توسط پیلامد و همکاران ارائه شدند.<sup>[۱]</sup> این دسته‌موتورها علاوه بر قسمت الاستومر دارای دو محفظه‌ی حاوی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۴/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۱/۵، پذیرش ۱۳۹۹/۱۱/۱۲

DOI:10.24200/J40.2021.56049.1557

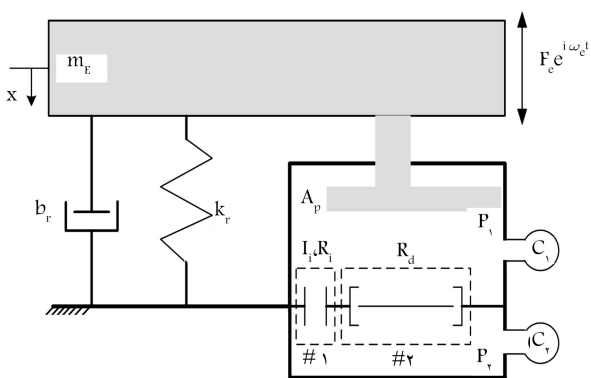
کردند. آنها برای این کار نمونه‌های مختلف دسته‌موتور هیدرولیکی را با ساختار و لاستیک‌های متفاوت آزمودند و رفتار دینامیکی آنها استخراج کردند. سپس این داده‌ها به عنوان داده‌های اولیه‌ی شبکه عصبی استفاده شد. لیو و همکاران<sup>[۲۲]</sup> در تحقیقی به بهینه‌سازی یک دسته‌موتور موتور سه‌سیلندر پرداختند. توابع هدف آنها کمینه کردن نیروی انتقالی به شاسی و جانمایی بسامد طبیعی در مکان مشخص بود. لی و همکاران<sup>[۲۳]</sup> در تحقیقی گذرگاه‌های سیال در دسته‌موتور هیدرولیکی را به صورت بهینه طراحی کردند. آنها از یک مدل غیرخطی برای تنظیم مقدار سیال عبوری از شیر اینرسی استفاده کردند و مقدار بهینه‌ی سیال عبوری را محاسبه نمودند.

همان‌گونه که بیان شد، اکثر بهینه‌سازی‌های صورت گرفته به صورت تک‌هدفه انجام شده است. در این مقالات سفتی دینامیکی، ضریب میرایی، یا انتقال‌پذیری دسته‌موتور به صورت تک‌هدفه بهینه شده است؛ ولی تأثیر بهینه‌سازی آنها بر روی هم بررسی نشده است. در این تحقیق ابتدا تأثیر پارامترهای فیزیکی بر انتقال‌پذیری سفتی دینامیکی و ضریب میرایی دسته‌موتور در محدوده‌ی بسامد کاری پایین بررسی شده است، سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA) و اهداف کاهش نیروی انتقالی به شاسی، افزایش سفتی دینامیکی و افزایش انرژی تلف شده‌ی دسته‌موتور فرایند بهینه‌سازی دسته‌موتور اجرا شده است. همچنین از تابع جریمه برای تنظیم بسامد بیشینه‌ی انتقال‌پذیری استفاده شده و در نهایت نمودار جبهه‌ی پارتوی، انتقال‌پذیری، سفتی دینامیکی و ضریب میرایی بهینه شده رسم شده و حالت‌های بهینه با حالت اولیه مقایسه شده است.

## ۲. مدل‌سازی

در این قسمت معادلات حاکم بر دسته‌موتور و فرضیات انجام گرفته در مدل‌سازی آورده شده است. برای مدل‌سازی دسته‌موتور از یک مدل خطی گسسته که طرح‌واره‌ی آن در شکل ۱ نشان داده شده، استفاده شده است. یکی از منابع تحریک دسته‌موتور، نیروی انتقالی از موتور است. این نیرو عمدتاً ناشی از نابالانسی‌های موجود در میل‌لنگ است و با توجه به شعاع ثابت میل‌لنگ، دامنه‌ی آن طبق رابطه‌ی ۱ با توان دوم بسامد کاری موتور متناسب است. بنابراین با توجه به دوران میل‌لنگ، این نیرو به صورت هارمونیک با دامنه‌ی متغیر با بسامد موتور فرض شده است.

ارتعاشات شاسی که ناشی از ناهمواری‌های جاده است و همچنین شوک‌های ناشی از ترمزگیری و شتاب‌گیری نیز از دیگر عوامل نوسان موتور و همچنین عدم آرامش سرنشینان خودرو است. ولی با توجه به این‌که در مقاله‌ی حاضر هدف



شکل ۱. طرح‌واره‌ی مدل دسته‌موتور.

و بالا به بررسی ویژگی‌های سفتی دینامیکی و زاویه‌ی فاز آن در یک دسته‌موتور هیدرولیکی تحت تحریک جابه‌جایی پرداختند. این دو مدل محدودی ۵ تا ۲۰۰ هرتز را پوشش می‌دادند. در این تحقیق علاوه بر اثر دی‌کوپلر، اثر چند ورودی مختلف نیز مطالعه شده است. آدیگونا و همکاران<sup>[۸]</sup> پاسخ گذرای یک دسته‌موتور خطی و غیرخطی هیدرولیکی ساده را به صورت نظری و عملی بررسی کردند. فن و لو<sup>[۹]</sup> در تحقیق خود به بررسی جداگانه‌ی نقش شیر اینرسی، دی‌کوپلر و صفحه‌ی اختلال‌گر<sup>۳</sup> بر سفتی دینامیکی یک دسته‌موتور هیدرولیکی پرداختند. وانگ و همکاران<sup>[۱۰]</sup> در تحلیل خود، یک دسته‌موتور هیدرولیکی را با فرض تحریک جابه‌جایی مدل‌سازی کردند و نقش متغیرهای مختلف، مانند سفتی حجمی، سطح مقطع و طول شیر اینرسی را بر سفتی دینامیکی دسته‌موتور بررسی کردند. لی و همکاران<sup>[۱۱]</sup> در تحقیقی به شناسایی پارامترهای گسسته‌ی یک دسته‌موتور هیدرولیکی پرداختند. آنها برای این منظور از روشی مبتنی بر FSI<sup>۴</sup> و اجرای محدود استفاده کردند. فوکازاوا و همکاران<sup>[۱۲]</sup> در تحقیقی به پیش‌بینی تابع تبدیل ارتعاشی یک دسته‌موتور هیدرولیکی پرداختند و گزارش کردند که روش CAE<sup>۵</sup> روشی دارای دقت مناسب و زمان محاسبه‌ی کم است. گوو و همکاران<sup>[۱۳]</sup> ابتدا سیستم یک‌چهارم خودرو شامل موتور، دسته‌موتور هیدرولیکی، فنربندی و تیر را مدل‌سازی کردند و با گسترش این مدل به مدل ۱۴ درجه‌ی آزادی کامل خودرو، لرزش موتور را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از دسته‌موتور هیدرولیکی تأثیر بسیاری در کاهش لرزش موتور و راحتی سرنشین دارد.

پیشرفت‌های صورت گرفته در صنایع خودروسازی و همچنین افزایش توقعات رفاهی مشتریان لزوم طراحی بهینه‌ی دسته‌موتور با مشخصه‌های نزدیک به دسته‌موتور ایده‌آل را بیش از پیش ضروری می‌سازد. در زمینه‌ی بهینه‌سازی عملکرد دسته‌موتور نیز کارهایی صورت گرفته است. فومنی و همکاران<sup>[۱۴]</sup> از یک روش تجربی - عددی برای بهینه‌سازی مشخصه‌های دسته‌موتور با مدل یک‌چهارم خودرو استفاده کردند. آنها از یک روش حدس و خطا استفاده کردند و داده‌های حاصل از آزمایش را بدون مدل‌سازی ریاضی بهینه‌سازی کردند. لی و همکاران<sup>[۱۵]</sup> با استفاده از روش مبتنی بر پاسخ بسامدی، یک دسته‌موتور را بهینه‌سازی کردند. تابع هدف مورد استفاده در این تحقیق، مساحت زیر نمودار صدای انتقالی به داخل کابین در محدوده‌ی بسامد کاری سیستم بود و هدف پیدا کردن سفتی بهینه‌ی دسته‌موتور بود. کریستوفرسن و نخعی<sup>[۱۶]</sup> با استفاده از روش RMS<sup>۶</sup> یک دسته‌موتور هیدرولیکی را با هدف کاهش جابه‌جایی نسبی انتقالی بهینه‌سازی کردند. آنها با مقایسه‌ی پاسخ زمانی سیستم به ورودی پله، تأثیر بهینه‌سازی را نشان دادند. آهن و همکاران<sup>[۱۷]</sup> یک طراحی بهینه برای دسته‌موتور هیدرولیکی ارائه کردند. برای این منظور آنها ابتدا با استفاده از دو معادله‌ی خطی دسته‌موتور را برای بسامدهای بالا و پایین مدل کردند و از ترکیب این معادلات برای بهینه‌سازی استفاده کردند. هدف اصلی، کمینه کردن نیروی انتقالی با استفاده از روش SQP<sup>۷</sup> بود. ارزان‌پورو همکاران<sup>[۱۸]</sup> روش جدیدی برای بهینه‌سازی یک دسته‌موتور در حوزه‌ی زمان و بسامد با استفاده از روش RMS ارائه کردند. آنها از شتاب مطلق و جابه‌جایی نسبی در حوزه‌ی بسامد و شتاب انتقالی و جابه‌جایی در حوزه‌ی زمان به عنوان توابع هدف استفاده کردند. وو و شانگوان<sup>[۱۹]</sup> با استفاده از مدل پنج پارامتری مشتقات جزئی، یک دسته‌موتور هیدرولیکی را در حوزه‌ی زمان مدل‌سازی کردند. آنها با استفاده از روش SQP به بهینه‌سازی سیستم دو درجه‌ی آزادی با هدف کاهش ارتعاشات بدنه پرداختند. راسخی‌پورو اوحدی<sup>[۲۰]</sup> به مقایسه‌ی بهینه‌سازی دسته‌موتور تنها و دسته‌موتور به همراه موتور پرداختند. آنها با بیان مزایا و معایب هر یک از مدل‌سازی‌ها، از روش DTS<sup>۸</sup> برای بهینه‌سازی استفاده کردند. لی و همکاران<sup>[۲۱]</sup> یک دسته‌موتور هیدرولیکی را با استفاده از روش NN<sup>۹</sup> بهینه‌سازی

$Q_i$  دبی سیال عبوری از شیار اینرسی و  $Q_d$  دبی سیال عبوری از دی‌کوپلر است و به ترتیب از روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند:

$$Q_i = A_i \dot{x}_i \quad (6)$$

$$Q_d = A_d \dot{x}_d \quad (7)$$

$A_i$  و  $A_d$  به ترتیب مساحت سطح مقطع شیار اینرسی و دی‌کوپلر و  $\dot{x}_i$  و  $\dot{x}_d$  به ترتیب سرعت سیال عبوری از شیار اینرسی و دی‌کوپلر است. در ادامه با استفاده از معادله‌ی پیوستگی، رابطه‌ی ۸ برای دو محفظه‌ی بالایی و پایینی دسته‌موتور نوشته می‌شود: [۶]

$$\begin{aligned} C_1 \dot{p}_1 + A_p(-\dot{x}) + Q_i + Q_d &= 0 \\ C_2 \dot{p}_2 - Q_i - Q_d &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، فشار محفظه‌ی بالایی، تابع جابه‌جایی موتور دبی سیال عبوری از شیار اینرسی و دی‌کوپلر است. برای به دست آوردن  $p_1$  باید هر سه پارامتر ذکر شده محاسبه شوند. بنابراین، فشار محفظه‌های بالایی و پایینی از رابطه‌ی ۸ محاسبه و در رابطه‌ی ۵ جایگذاری می‌شود. در نهایت معادلات حاکم بر سیال عبوری از شیار اینرسی و جابه‌جایی دی‌کوپلر به صورت رابطه‌ی ۹ نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} I_i A_i \ddot{x}_i + R_i A_i \dot{x}_i + K(A_i x_i + A_d x_d) &= \frac{A_p x}{C_1} \\ R_d A_d \dot{x}_d + K(A_i x_i + A_d x_d) &= \frac{A_p x}{C_1} \end{aligned} \quad (9)$$

در رابطه‌ی ۹  $K = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$  برای به دست آوردن جابه‌جایی موتور، معادله‌ی حاکم بر موتور به صورت رابطه‌ی ۱۰ نوشته می‌شود:

$$m_E \ddot{x} + b_r \dot{x} + k_r x = F - p_1 A_p \quad (10)$$

با حل هم‌زمان معادلات ۹ و ۱۰، سیال جابه‌جا شده از شیار اینرسی، جابه‌جایی دی‌کوپلر و جابه‌جایی موتور محاسبه می‌شود و سپس با جایگذاری این مقادیر در رابطه‌ی ۱۱ فشار محفظه‌ی بالایی به دست می‌آید.

$$p_1 = \frac{1}{C_1} (A_p x - A_i x_i - A_d x_d) \quad (11)$$

با جایگذاری فشار محفظه‌ی بالایی و جابه‌جایی موتور در رابطه‌ی ۴، نیروی انتقالی به شاسی و به تبع آن سفتی دینامیکی و انتقال‌پذیری دسته‌موتور به دست می‌آید.

## ۱.۲. بهینه‌سازی

با افزایش درخواست برای موتورهای با وزن کم و قدرت زیاد، نیاز به تولید دسته‌موتورهای بهینه نیز افزایش یافته است. چرا که این موتورها باعث افزایش ارتعاشات و صدا در کابین می‌شوند. همان‌طور که اشاره شد، بیشینه بهینه‌سازی‌های صورت گرفته در پژوهش‌های فن به صورت تک‌هدفه بوده است و رایج‌ترین روش‌ها برای این امر روش SQP و الگوریتم ژنتیک است. روش SQP شدیداً به مقدار اولیه‌ی پارامترهای طراحی وابسته است و در صورت انتخاب نامناسب این پارامترها ممکن است موجب نتایج نامناسبی شود. بنابراین روش الگوریتم ژنتیک روش مناسب‌تری برای بهینه‌سازی تک‌هدفه است. [۵-۱۹] از طرفی در بهینه‌سازی‌های تک‌هدفه، اغلب پاسخ بهینه برای یک هدف موجب ایجاد پاسخ نامناسب برای هدف دیگر می‌شود. بنابراین در صورتی که پارامترهای مؤثر سیستم بیش از یک پارامتر باشد و رسیدن

کاهش ارتعاشات منتقل شده از موتور به شاسی و بهینه‌سازی پارامترهای دسته‌موتور است، مجموعه‌ی مورد نظر به عنوان یک سیستم تک‌ورودی در نظر گرفته شده است. مقالات متعدد نظری و تجربی در خصوص تحلیل دینامیکی مجموعه‌ی فوق با این راهبرد نیز تا کنون ارائه شده‌اند. [۶، ۸-۱۱، ۲۰-۲۲] همچنین ارتعاشات ناشی از ناهمواری‌های جاده، شوک‌های ترمزگیری و شتاب‌گیری نیز در محدوده‌ی بسامد کاری مورد مطالعه (تا ۵۰ هرتز) است. پس بهینه‌سازی سیستم نسبت به جایگزین یک ورودی (ارتعاشات موتور) منجر به استخراج پارامترهایی خواهد بود که در جداسازی ارتعاشات بین شاسی و موتور نیز می‌تواند مؤثر باشد. در مرجع [۲۰] نشان داده شده است که بهینه‌سازی دسته‌موتور به صورت مجزا موجب ایجاد ۹ درصد خطا نسبت به بهینه‌سازی کل سیستم شامل موتور و سه دسته‌موتور متصل به آن با ۱۳ درجه آزادی می‌شود. بنابراین، برای اجتناب از پیچیدگی‌های موجود در مدل‌سازی کل سیستم، سریع‌ترین روش مدل‌سازی دسته‌موتور به‌نهایی است.

در شکل ۱،  $m_E$  جرم موتور،  $k_r$  و  $b_r$  به ترتیب سفتی و میرایی قسمت الاستومری دسته‌موتور هستند.  $p_1$  و  $p_2$  به ترتیب فشار محفظه‌ی بالایی و پایینی دسته‌موتور،  $I_i$  اینرسی معادل سیال داخل شیار اینرسی،  $R_i$  مقاومت سیال درون شیار اینرسی،  $R_d$  مقاومت معادل دی‌کوپلر،  $C_1$  عکس سفتی حجمی محفظه بالایی،  $C_2$  عکس سفتی حجمی محفظه‌ی پایینی و  $A_p$  مساحت مؤثر مقطع دسته‌موتور است. همان‌طور که بیان شد، تحریک موتور به صورت  $F = F_e e^{i\omega_e t}$  در نظر گرفته شده است که  $\omega_e$  بسامد تحریک موتور و  $F_e$  دامنه‌ی تحریک است و از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود. [۲۲، ۲۴]

$$F_e = \frac{m_p r^2 \omega_e^4}{l} \quad (1)$$

در رابطه‌ی ۱  $m_p$  جرم پیستون،  $r$  شعاع میل‌لنگ و  $l$  طول شاتون است. هدف اصلی از مدل‌سازی دسته‌موتور، به دست آوردن سفتی دینامیکی و انتقال‌پذیری دسته‌موتور است. سفتی دینامیکی به صورت نسبت نیروی انتقالی به شاسی به دامنه‌ی جابه‌جایی تعریف و از رابطه‌ی ۲ و انتقال‌پذیری به صورت اندازهی نسبت نیروی انتقالی به شاسی به دامنه‌ی نیروی ورودی تعریف و از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

$$K_{dyn}(i\omega_e) = \frac{F_T}{X}(i\omega_e) = k_e(\omega_e) + i b_e(\omega_e)\omega_e \quad (2)$$

$$TR = \left| \frac{F_T}{F_e} \right| \quad (3)$$

$k_e$  سفتی و  $b_e$  ضریب میرایی تابع بسامد تحریک معادل دسته‌موتور است. در بسامدهای پایین نیروی انتقالی به شاسی از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای محاسبه‌ی این نیرو، جابه‌جایی موتور و فشار محفظه‌ی بالایی باید محاسبه شود. بدین منظور ابتدا فشار محفظه‌ی بالایی با استفاده از روابط مونتوم و پیوستگی برای سیال موجود به دست می‌آید.

$$F_T = k_r x + b_r \dot{x} + A_p p_1 \quad (4)$$

روابط مونتوم برای حجم کنترل‌های شیار اینرسی (۱) و دی‌کوپلر (۲) طبق رابطه‌ی ۵ نوشته می‌شود: [۱]

$$\begin{aligned} p_1 - p_2 &= I_i \dot{Q}_i + R_i Q_i \\ p_1 - p_2 &= R_d Q_d \end{aligned} \quad (5)$$

$$dj(z, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{J_i(z) - J_i(y)}{J_i^{\max} - J_i^{\min}} \right)^2} \quad (13)$$

که در آن،  $J_i^{\max}$  و  $J_i^{\min}$  به ترتیب برابر بیشینه و کمینه‌ی مقادیر تابع هدف  $J_i$  و  $n$  تعداد اهداف است. سپس مقدار شایستگی<sup>۱۲</sup> برای هر حل  $z$  در نسل  $t$  به صورت رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود:<sup>[۲۵]</sup>

$$nc(z, t) = \sum \max \left\{ \frac{\sigma_{share} - dj(z, y)}{\sigma_{share}}, 0 \right\} \quad (14)$$

مقدار  $\sigma_{share}$  با رابطه‌ی ۱۵ تعیین می‌شود:<sup>[۲۶]</sup>

$$\sigma_{share} = \frac{r}{\sqrt{q}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n (J_{k,\max} - J_{k,\min})^2}}{2\sqrt{q}} \quad (15)$$

که در آن  $q$  تعداد نقاط اوج فضای حل است. پس از انجام محاسبات، تابع هدف جدید برای هر رتبه به شکل رابطه‌ی ۱۶ تعریف می‌شود:<sup>[۲۵]</sup>

$$f^*(x, t) = \frac{f(x, t)}{nc(x, t)} \quad (16)$$

در مرحله‌ی بعد، نیمی از داده‌های با شایستگی کمتر حذف می‌شوند. برای تولید داده‌های جدید، نخست باید والدین انتخاب شوند که برای این منظور از روش انتخاب رقابتی استفاده شده است. پس از انتخاب والدین با استفاده از عملگر تقاطع تک‌نقطه‌یی<sup>۱۳</sup>، داده‌های جدید تولید می‌شوند. با اعمال عملگر جهش از همگرایی الگوریتم به کمینه‌ی محلی جاگویری می‌شود. شکل ۲ فلوچارت مراحل این الگوریتم را نشان می‌دهد که در آن  $R$  بیانگر رتبه‌ی متسبب به هر کروموزوم است.

#### ۲.۱.۲. فرمول‌بندی مسئله‌ی بهینه‌سازی

در یک مسئله‌ی بهینه‌سازی مهم‌ترین قسمت، انتخاب تابع هدف و قیدهای موجود بر روی سیستم است. دو نوع کلی قید در بهینه‌سازی استفاده می‌شود: قیودی که بر روی پارامترهای طراحی اعمال می‌شود و قیودی که بر روی خروجی‌های سیستم اعمال می‌شود. در این قسمت مسئله‌ی بهینه‌سازی فرمول‌بندی شده است. توابع هدف و قید بر روی خروجی سیستم به صورت رابطه‌ی ۱۷ در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} J^{(1)} &= \min \int_0^{100\pi} TR dw \\ J^{(2)} &= \max \int_0^{100\pi} b_e dw \\ J^{(3)} &= \max \int_0^{100\pi} K_{dyn} dw \\ g : \omega_{\max}(TR) &\leq \omega_{sw} \end{aligned} \quad (17)$$

لازم به توضیح است که دسته‌موتور به عنوان یک جاذب ارتعاشی باید دارای دو ویژگی انتقال‌پذیری کم و استهلاک انرژی زیاد باشد، کاهش انتقال‌پذیری موجب کاهش ضربات دینامیکی موتور به شاسی و در نتیجه افزایش راحتی سرنشینان می‌شود. بنابراین هدف اول کمینه کردن مساحت زیر نمودار انتقال‌پذیری، هدف دوم بیشینه کردن مساحت زیر نمودار ضریب میرایی معادل در نظر گرفته شده است. از طرفی با توجه به این‌که هدف این مقاله بررسی رفتار ارتعاشی دسته‌موتور در بسامدهای پایین است و در این محدوده‌ی بسامدی، دسته‌موتور باید دارای سفتی دینامیکی بالا باشد، پس هدف سوم بیشینه کردن مساحت زیر نمودار سفتی دینامیکی دسته‌موتور در نظر

به مقدار بهینه برای این پارامترها در تضاد با هم باشد، از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود. این نوع بهینه‌سازی تمام اهداف را تا حد امکان بررسی و به صورت هم‌زمان بهینه می‌کند. برای بهینه‌سازی چندهدفه دو روش کلی وجود دارد. در روش اول تمام اهداف با یکدیگر جمع و تبدیل به یک هدف می‌شوند. رایج‌ترین روش در این گروه روش مجموع وزن‌دار است. در این روش چالش اصلی تعیین ضرایب وزنی برای اهداف مختلف است. به طوری که تغییرات اندکی در این ضرایب ممکن است موجب ایجاد پاسخ‌های کاملاً متفاوتی شود. همچنین این روش بهینه‌سازی در نهایت منجر به پاسخ واحد می‌شود و برای به دست آوردن پاسخ‌های متفاوت باید فرایند بهینه‌سازی به ازای مقادیر مختلف ضرایب وزنی اجرا شود. در این حالت نیز ممکن است به علت تحذب تابع هدف، رسیدن به تمام پاسخ‌های بهینه امکان‌پذیر نباشد. روش دوم استفاده از جبهه‌ی پارتو برای به دست آوردن پاسخ‌های بهینه است. در این روش تابع هدف به صورت برداری که درایه‌های آن اهداف مورد نظر می‌باشد، در نظر گرفته می‌شود. در نهایت تمام حالت‌های بهینه با در نظر گرفتن اهداف، بر روی جبهه‌ی پارتو نشان داده می‌شوند. بر روی جبهه‌ی پارتو مقدار یک هدف زمانی بهتر می‌شود که مقدار هدف متضاد دیگر بدتر شود. شکل کلی مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از جبهه‌ی پارتو به صورت رابطه ۱۲ است:<sup>[۲۵]</sup>

$$\begin{aligned} J(y, p) &= [J_1, \dots, J_n] \\ h(y, p) &= 0 \\ g(y, p) &\leq 0 \\ y_{i, LB} &\leq y_i \leq y_{i, UB} \quad (i = 1, \dots, m) \\ y &= [y_1, \dots, y_i, \dots, y_m] \\ h &= [h_1(y), \dots, h_{r1}(y)] \\ g &= [g_1(y), \dots, g_{r2}(y)] \end{aligned} \quad (12)$$

که  $J, p, y$  به ترتیب بردار توابع هدف، بردار متغیرهای طراحی، بردار ثوابت و تعداد اهداف هستند. هر متغیر طراحی بین دو حد پایین ( $y_{i, LB}$ ) و بالا ( $y_{i, UB}$ ) محدود شده است. بهینه‌سازی ممکن است شامل دسته‌یی از قیود به‌فرم تساوی ( $h$ ) و نامساوی ( $g$ ) باشد. در این روابط  $r_1$  و  $r_2$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تعداد قیود تساوی و نامساوی هستند.

#### ۲.۱.۲.۱. الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب

الگوریتم ژنتیک یک روش جستجو و بهینه‌سازی بر پایه‌ی انتخاب طبیعی است که جمعیت داده‌ها را تحت قانون انتخابی مشخصی بهبود می‌دهد. با توجه به مطالب گفته شده در قسمت قبل، در این مقاله برای مسئله‌ی چندهدفه از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب که خروجی آن جبهه‌ی پارتو است، استفاده شده است. برای بهینه‌سازی با این الگوریتم ابتدا با توجه به دامنه‌ی طراحی، یک جمعیت اولیه از متغیرهای طراحی تولید می‌شود و سپس توابع هدف به ازای جمعیت موجود محاسبه می‌شود. در مرحله‌ی بعدی مقادیر یکی از اهداف با توجه به نتیجه‌ی مورد انتظار مرتب می‌شود و جمعیت و مقادیر هدف دیگر نیز متناظر با ترتیب مقادیر این هدف مرتب می‌شوند. سپس داده‌های نامغلوب شناسایی، رتبه‌بندی و از میان جمعیت جدا می‌شوند و این روند برای تمام جمعیت اعمال می‌شود. برای توزیع یکنواخت تر داده‌ها، از اشتراک شایستگی<sup>۱۱</sup> استفاده می‌شود. بدین منظور ابتدا با توجه به رابطه‌ی ۱۳ فاصله‌ی اقلیدسی بین جفت جواب  $z$  و  $y$  در فضای بی‌بعد بین صفر و یک محاسبه می‌شود:<sup>[۲۵]</sup>

جدول ۱. پارامترها و محدوده‌ی آنها در بهینه‌سازی دسته‌موتور.

محدوده	کمیت
$\Delta A_p : [^\circ / \Delta A_p; \Delta A_p]$	$A_p$
$\Delta k_r : [^\circ / \Delta k_r; \Delta k_r]$	$k_r$
$\Delta b_r : [^\circ / \Delta b_r; \Delta b_r]$	$b_r$
$\Delta I_i : [^\circ / \Delta I_i; \Delta I_i]$	$I_i$
$\Delta R_i : [^\circ / \Delta R_i; \Delta R_i]$	$R_i$
$\Delta R_d : [^\circ / \Delta R_d; \Delta R_d]$	$R_d$
$\Delta C_v : [^\circ / \Delta C_v; \Delta C_v]$	$C_v$

جدول ۲. پارامترهای فیزیکی دسته‌موتور. [۶]

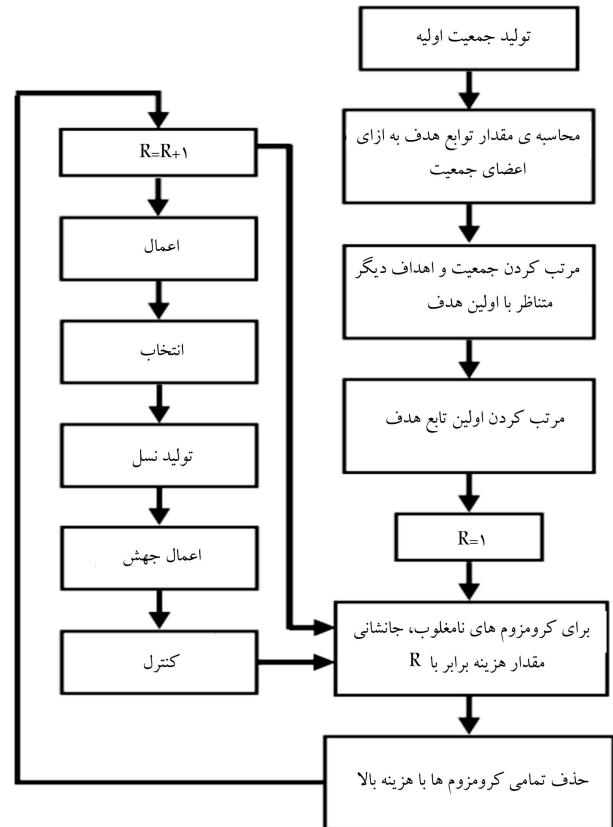
مقدار	واحد	کمیت
$5 \times 10^{-2}$	$m^2$	$A_p$
۲۰۰	N/mm	$k_r$
۱۰۰۰	Ns/m	$b_r$
$4/2848 \times 10^{10}$	$kg/m^2$	$I_i$
$2/129 \times 10^{12}$	$Ns/m^5$	$R_i$
$5/5269 \times 10^{12}$	$Ns/m^5$	$R_d$
$4/6298 \times 10^{-15}$	$m^5/N$	$C_v$
$4/6629 \times 10^{-12}$	$m^5/N$	$C_r$

عملکرد دی‌کوپلر وابسته است، بنابراین مشخصات دی‌کوپلر باید به عنوان پارامتر بهینه‌سازی در نظر گرفته شود. علاوه بر این باید توجه کرد که مشخصات شیار اینرسی نیز نقشی اساسی دارد. مثلاً اگر سطح مقطع شیار اینرسی بزرگ باشد، دسته‌موتور قادر به ایجاد میرایی کافی برای میرا کردن ارتعاشات با دامنه‌ی زیاد نخواهد بود و اگر این سطح مقطع کوچک باشد، در زمان ارتعاشات ناگهانی، دسته‌موتور قادر به انتقال سیال کافی نیست. پارامترهای مورد استفاده برای بهینه‌سازی و محدوده‌ی تغییرات آن در جدول ۱ آورده شده است.

محدوده‌ی تغییر پارامترها در بهینه‌سازی معمولاً با توجه به قابلیت ساخت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، حتی اگر احتمال وجود نقطه‌ی بی‌بهینه خارج از این بازه نیز وجود داشته باشد، به دلایل مهندسی قابل قبول نیست. با توجه به این‌که در مراجع [۲۱، ۲۳] دسته‌موتور مورد نظر ساخته شده است، در این مقاله از بازه‌های این مراجع استفاده شده است. نرخ جهش در این مقاله برابر با ۰/۱۵ و تعداد جمعیت برابر با ۵۰۰ در نظر گرفته شده است.

### ۳. بحث و نتایج

در این قسمت، ابتدا برای صحنه‌سنجی نتایج، سفتی دینامیکی و زاویه‌ی فاز دسته‌موتور به ازای پارامترهای ارائه شده در جدول ۲ که به صورت عملی در مرجع [۶] صحنه‌سنجی شده‌اند، رسم شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، پاسخ‌های استخراجی بر هم منطبق‌اند. در شکل ۳ الف تغییرات سفتی دینامیکی و در شکل ۳ ب تغییرات زاویه‌ی فاز دسته‌موتور بر حسب بسامد نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که سفتی دینامیکی بیشینه‌ی دسته‌موتور، تقریباً چهار برابر سفتی استاتیکی آن است و می‌توان با افزایش این مقدار عملکرد دسته‌موتور در بسامدهای پایین را بهبود داد. در ادامه به بررسی تأثیر پارامترهای مهم دسته‌موتور بر رفتار ارتعاشی آن پرداخته

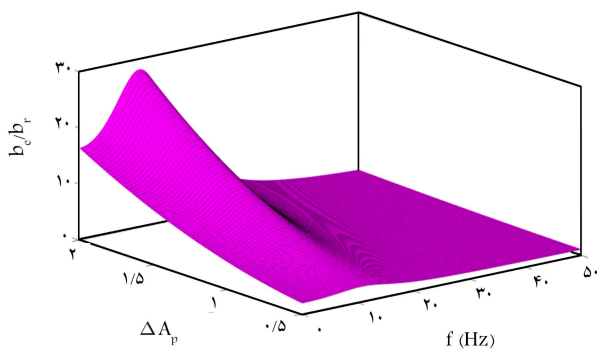


شکل ۲. روند نامی الگوریتم ژنتیکی با مرتب‌سازی نامغلوب.

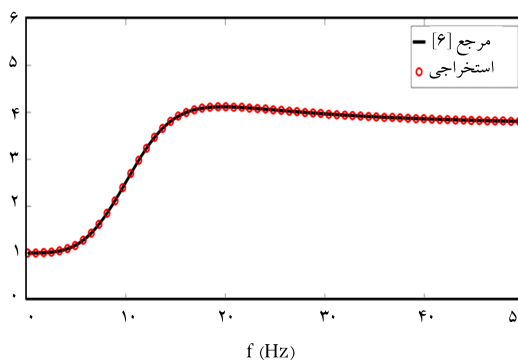
گرفته شده است. با توجه به این‌که کاهش مساحت زیر نمودار انتقال پذیری ممکن است باعث افزایش بیشینه‌ی مقدار انتقال پذیری شود، از قید نامساوی  $g$  استفاده شده است. در این قید  $\omega_{max}(TR)$  بسامد بیشینه‌ی انتقال پذیری و  $\omega_{sw}$  بسامد شروع بازه‌ی کاری موتور است. این قید بیشینه‌ی انتقال پذیری دسته‌موتور را به خارج از بازه‌ی کاری موتور منتقل می‌کند. با توجه به این‌که بازه‌ی کاری موتور چهار سیلندر معمولی از ۱۰ هرتز شروع می‌شود،  $\omega_{sw} = 10 Hz$  در نظر گرفته شده است. [۱] با اعمال روش جریمه، (پنالتی) توابع هدف تغییر یافته به صورت رابطه‌ی ۱۸ نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned}
 J^{(1)} &= \min \left\{ \int_0^{100\pi} TR dw \right\} \\
 &\quad + \kappa_1 \max \{0, \omega_{\max}(TR) - \omega_{sw}\} \\
 J^{(2)} &= \max \left\{ \int_0^{100\pi} b_e dw \right\} \\
 &\quad + \kappa_2 \max \{0, \omega_{\max}(TR) - \omega_{sw}\} \\
 J^{(3)} &= \max \left\{ \int_0^{100\pi} K_{dyn} dw \right\} \\
 &\quad + \kappa_3 \max \{0, \omega_{\max}(TR) - \omega_{sw}\}
 \end{aligned} \tag{18}$$

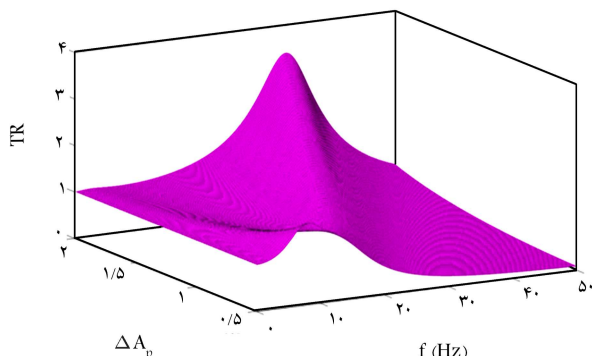
$K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  ضریب جریمه است و مقدار آنها معمولاً در مقایسه با مقدار هدف مربوطه نسبتاً بزرگ در نظر گرفته می‌شود تا در صورت عدم ارضای قید اعمالی، مقدار تابع هدف را به شدت افزایش دهد و داده‌های متناظر حذف شود. با توجه به این‌که کاهش میرایی دسته‌موتور در بسامدهای بالاتر از بسامد تشدید، شدیداً به



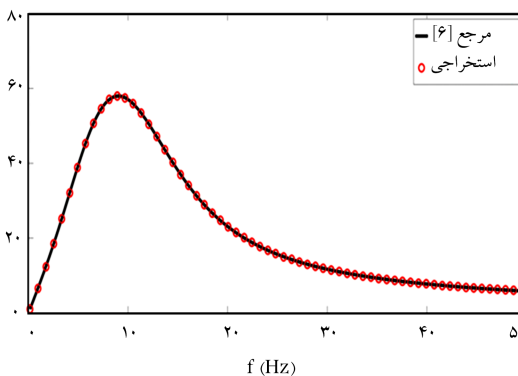
الف) سفتی دینامیکی؛



الف) سفتی و دینامیکی؛



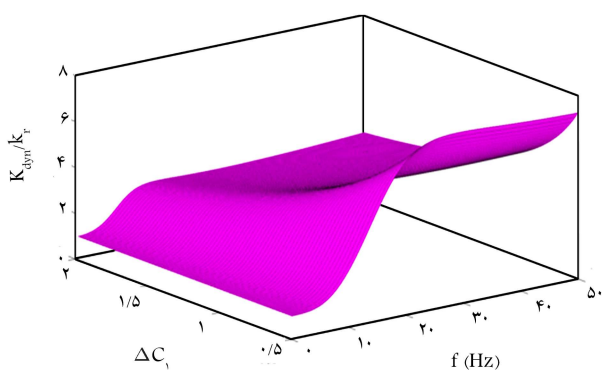
ب) انتقال پذیری.



ب) زاویه فاز دسته موتور هیدرولیکی.

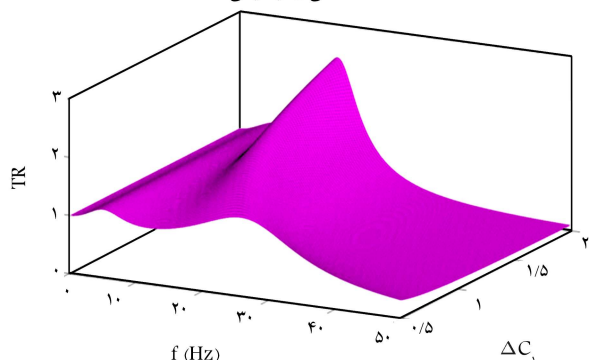
شکل ۴. تأثیر مساحت معادل دسته موتور بر روی ضریب استهلاک و انتقال پذیری دسته موتور.

شکل ۳. مقایسه پاسخ دینامیکی دسته موتور با نتایج مرجع [۶].



الف) سفتی و دینامیکی؛

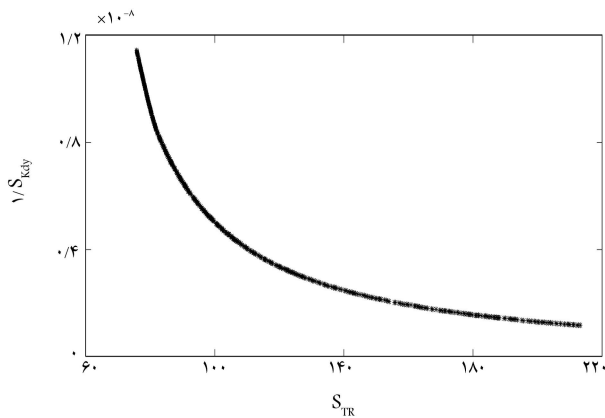
شده است. در شکل ۴ تأثیر مساحت مؤثر دسته موتور بر ضریب میرایی و انتقال پذیری آن رسم شده است. همان طور که از شکل ۴ - الف مشخص است با افزایش مساحت مؤثر، از نصف مقدار اولیه تا دو برابر آن، حجم سیال بیشتری از شیار اینرسی عبور می‌کند و این موجب افزایش ضریب میرایی دسته موتور می‌شود. بسامدهای طبیعی اول و دوم سیستم در شکل ۴ - ب نشان داده شده‌اند. بیشینه اول ظاهر شده در این نمودار مربوط به درجه‌ی آزادی موتور و بیشینه‌ی دوم، مربوط به درجه‌ی آزادی شیار اینرسی است. طبق شکل، افزایش مساحت مؤثر دسته موتور موجب سفت‌تر شدن سیستم در بسامد طبیعی مربوط به شیار اینرسی و در نتیجه افزایش بیشینه‌ی مربوط به آن می‌شود. همچنین در نتیجه‌ی این سفت شدن، بسامد طبیعی مربوط به شیار اینرسی نیز افزایش پیدا کرده است. می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مساحت مؤثر در حالی که با افزایش ضریب میرایی تأثیر مثبتی بر رفتار ارتعاشی سیستم می‌گذارد، هم‌زمان انتقال‌پذیری سیستم را نیز افزایش می‌دهد که امری نامطلوب است. در شکل ۵ تأثیر  $C_1$  بر روی سفتی دینامیکی و انتقال‌پذیری دسته موتور نشان داده شده است. طبق شکل ۵ - الف با افزایش  $C_1$  از نصف مقدار اولیه تا دو برابر آن، سفتی سیستم کاهش پیدا کرده است. این کاهش همان طور که در شکل ۵ - ب نشان داده شده است، موجب کاهش انتقال‌پذیری و بسامد طبیعی مربوط به شیار اینرسی شده است. بنابراین، افزایش  $C_1$  در حالی که موجب کاهش انتقال‌پذیری دسته موتور می‌شود، سفتی دینامیکی آن را نیز کاهش می‌دهد.



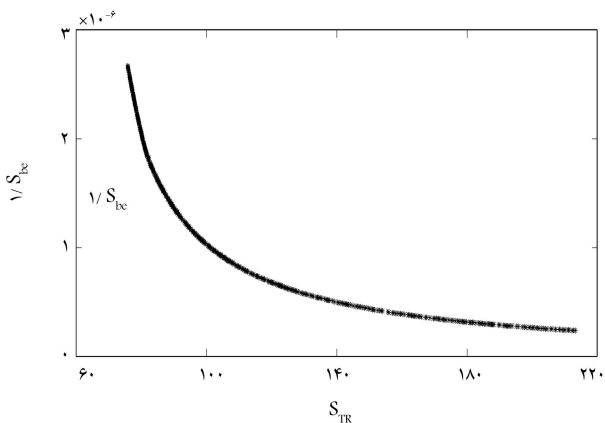
ب) انتقال پذیری.

شکل ۵. تأثیر انعطاف پذیری محفظه دسته موتور بر روی سفتی دینامیکی و انتقال پذیری سیستم.

شکل ۶ تأثیر اینرسی سیال درون شیار اینرسی را بر روی ضریب میرایی و انتقال‌پذیری دسته موتور نشان می‌دهد. همان طور که از شکل ۶ - الف ملاحظه می‌شود این افزایش با بیشتر کردن حجم سیال درون شیار اینرسی موجب افزایش



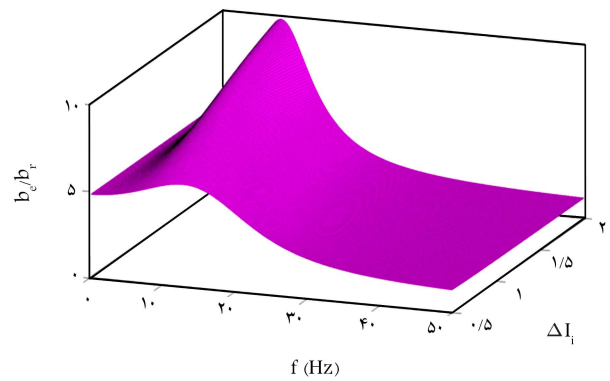
شکل ۸. جبهه‌ی پارتوی مربوط به افزایش سفتی دینامیکی و کاهش انتقال پذیری.



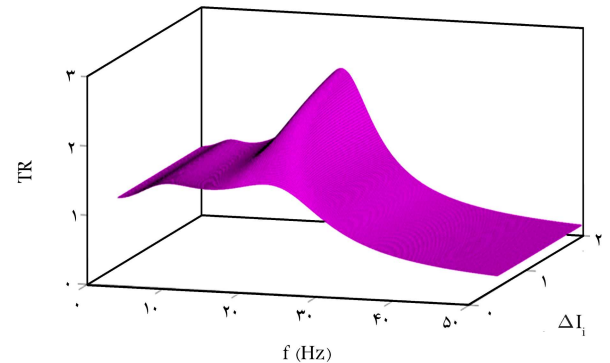
شکل ۹. جبهه‌ی پارتوی مربوط به افزایش ضریب میرایی معادل و کاهش انتقال پذیری.

نمودار ضریب میرایی و افزایش مساحت زیر نمودار سفتی دینامیکی را نشان می‌دهد. برای نشان دادن تناقض اهداف، شکل ۸ و ۹ به صورت دوجودی رسم شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود، اهداف افزایش سفتی دینامیکی و ضریب میرایی با کاهش انتقال پذیری دسته‌موتور در تناقض هستند. از این رو بهینه‌سازی پاسخی یکتا ندارد و به مجموعه‌یی از جواب‌های نامغلوب منتهی می‌شود؛ بدین معنی که هیچ یک از پاسخ‌های به دست آمده برتری نسبت به پاسخ‌های دیگر ندارد.

همان طور که بیان شد، در بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های مبتنی بر جبهه‌ی پارتو بر خلاف روش مجموع وزن‌دار، تمام پاسخ‌های بهینه در اختیار طراح قرار می‌گیرد و طراح بسته به اولویت طراحی می‌تواند هر یک از این نقاط بهینه را استفاده کند. در محدوده‌ی پارامترهای موجود، بهترین مقدار برای افزایش سفتی دینامیکی و ضریب میرایی نقطه‌ی A و بهترین مقدار در کاهش انتقال پذیری، نقطه‌ی B در شکل ۷ است. در واقع این نقاط به ترتیب متناظر با بهینه‌سازی تک‌هدفه با هدف افزایش سفتی دینامیکی و ضریب میرایی و با هدف کاهش انتقال پذیری است. پارامترهای مربوط به این دو حالت در جدول ۳ آورده شده‌اند. همچنین پارامترهای مربوط به نقطه‌ی C که یک نقطه بر روی جبهه‌ی پارتو است نیز در جدول ۳ آورده شده است. همان طور که از شکل ۷ مشخص است، این نقطه از نقاط میانی نمودار جبهه‌ی پارتو انتخاب شده است تا بتواند هر سه هدف را به نسبتی بهینه سازد. همان طور که از مقادیر جدول مشخص است،  $C_1$  و  $A_p$  بیشترین تأثیر را در رفتار دسته‌موتور دارند. به طوری که افزایش  $A_p$  و کاهش  $C_1$  موجب افزایش سفتی دینامیکی و

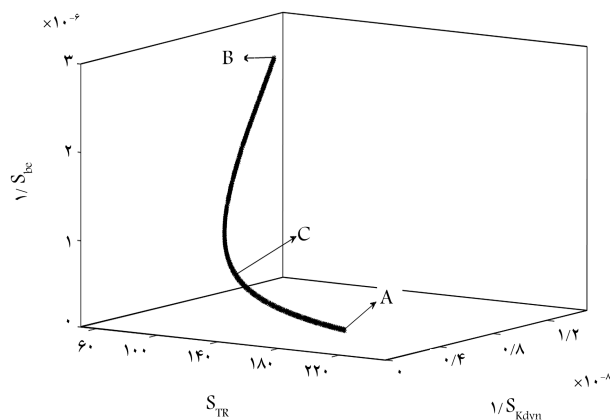


الف) ضریب میرایی؛



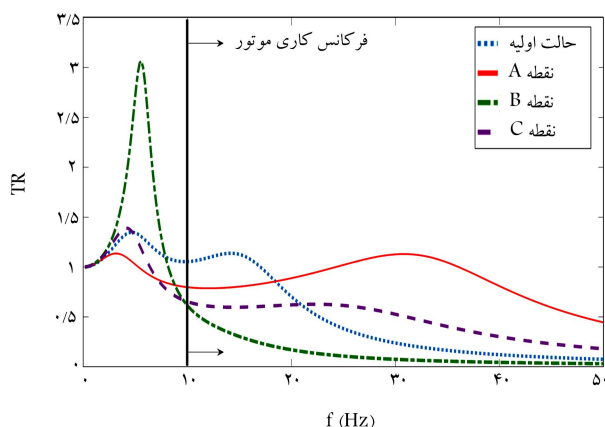
ب) انتقال پذیری.

شکل ۶. تأثیر تغییرات اینرسی سیال درون شیار اینرسی بر روی ضریب استهلاک و انتقال پذیری دسته‌موتور.



شکل ۷. جبهه‌ی پارتوی بهینه‌سازی سه‌هدفه.

ضریب میرایی و به تبع آن طبق شکل ۶- ب افزایش انتقال پذیری دسته‌موتور می‌شود. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته تأثیر برخی پارامترهای فیزیکی بر عملکرد دسته‌موتور مشخص شد. همان طور که بیان شد تغییرات پارامترها در بازه‌های خاصی مطلوب و خارج از آن بازه نامطلوب است. از طرفی تغییر یک پارامتر در حالی که اثر مطلوب بر روی انتقال پذیری می‌گذارد، اثر نامطلوب بر روی سفتی دینامیکی یا ضریب میرایی دسته‌موتور دارد. بنابراین، در راستای دست‌یابی به یک دسته‌موتور با عملکرد بهتر، لزوم بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای فیزیکی آن بیش از پیش مشخص می‌شود. شکل ۷ نمودار جبهه‌ی پارتوی حاصل از بهینه‌سازی سه‌هدفه‌ی دسته‌موتور با اهداف کاهش مساحت زیر نمودار انتقال پذیری، افزایش مساحت زیر



شکل ۱۲. مقایسه‌ی انتقال‌پذیری دسته‌موتور برای دو حالت اولیه و بهینه شده.

در تضادند. از این سه شکل می‌توان مشاهده کرد که داده‌های متناظر با نقطه‌ی A مساحت زیر نمودار سفتی دینامیکی و ضریب میرایی دسته‌موتور را به ترتیب به میزان ۵۵° و ۷° درصد افزایش داده‌اند، ولی در مقابل انتقال‌پذیری دسته‌موتور در حوالی بسامد ۳° هرتز از واحد بیشتر شده است و همچنین مساحت زیر نمودار انتقال‌پذیری نیز به میزان ۸۵ درصد افزایش پیدا کرده است. نمودار رسم شده با داده‌های نقطه‌ی B نشان می‌دهد که مساحت زیر نمودار انتقال‌پذیری به میزان ۱۸ درصد کاهش یافته است، ولی هم‌زمان سفتی دینامیکی و ضریب میرایی دسته‌موتور نیز به میزان قابل ملاحظه‌ی کاهش پیدا کرده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به ازای نقاط حدی جبهه‌ی پارتو که متناظر با بهینه‌سازی تک‌هدفه است، هدف مورد بررسی اصلاح می‌شود، ولی امکان عدم بهبود هدف متضاد با هدف مورد بررسی وجود دارد. داده‌های نقطه‌ی C که یک نقطه بر روی جبهه‌ی پارتو است، ویژگی اصلی بهینه‌سازی چندهدفه را مشخص می‌کند. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، در این حالت مساحت زیر نمودار سفتی دینامیکی و ضریب میرایی به ترتیب به میزان ۱۹° و ۲۶° درصد افزایش پیدا کرده‌اند و در کنار این افزایش، مساحت زیر نمودار انتقال‌پذیری نیز به میزان ۴° درصد کاهش یافته و همچنین تشدید روی داده در بسامد ۱۴/۵ هرتز نیز حذف شده است.

برای بررسی اثر تابع جریمه، در شکل ۱۲ بسامد کاری دسته‌موتور مشخص شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، بسامد تشدید انتقال‌پذیری در خارج محدوده‌ی کاری دسته‌موتور قرار دارد.

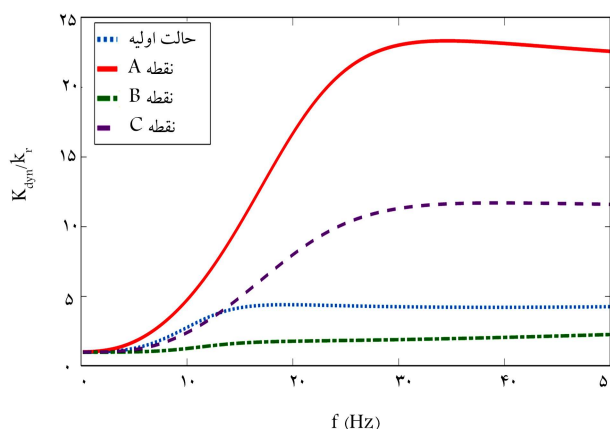
#### ۴. نتیجه‌گیری

در این بررسی ابتدا یک دسته‌موتور به صورت گسسته برای بسامدهای پایین موتور مدل‌سازی شده است. سپس اثر پارامترهای فیزیکی بر روی رفتار ارتعاشی آن نشان داده شده است. با توجه به این‌که تاکنون بهینه‌سازی چندهدفه‌ی با اهداف کاهش مساحت زیر نمودار انتقال‌پذیری، افزایش مساحت زیر نمودار سفتی دینامیکی و افزایش مساحت زیر نمودار ضریب میرایی صورت نگرفته بود، از الگوریتم ژنتیک سه‌هدفه برای بهینه‌سازی پارامترهای فیزیکی دسته‌موتور استفاده شد. دلیل انتخاب سه‌هدف بهینه‌سازی به صورت زیر است:

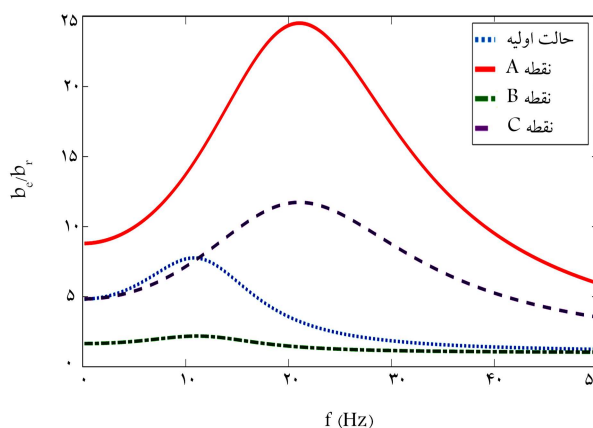
- کاهش ضریب انتقال‌پذیری دسته‌موتور برای راحتی بیشتر سرنشین.
- افزایش سفتی دینامیکی دسته‌موتور، به دلیل این‌که در بسامدهای پایین دسته‌موتور ایده‌آل دارای سفتی دینامیکی بالایی است.

جدول ۳. پارامترهای فیزیکی برای حالت بهینه.

کمیت	مقدار برای کمترین انتقال (نقطه B)	مقادیر برای بیشترین سفتی دینامیکی و میرایی (نقطه A)	مقادیر متناظر با نقطه C
$A_p$	$0.509 A_p$	$1/80.86 A_p$	$1/2427 A_p$
$k_r$	$0.806 k_r$	$0.8609 k_r$	$0.8115 k_r$
$b_r$	$0.8288 b_r$	$0.9304 b_r$	$0.8659 b_r$
$I_i$	$0.5546 I_i$	$0.5795 I_i$	$0.5659 I_i$
$R_i$	$0.5491 R_i$	$0.5485 R_i$	$0.5497 R_i$
$R_d$	$0.5531 R_d$	$0.6756 R_d$	$0.5949 R_d$
$C_1$	$1/7372 C_1$	$0.5342 C_1$	$0.5549 C_1$



شکل ۱۰. سفتی دینامیکی دسته‌موتور برای حالت‌های مختلف.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی ضریب میرایی دسته‌موتور برای دو حالت اولیه و بهینه‌سازی شده.

ضریب میرایی دسته‌موتور و کاهش  $A_p$  و افزایش  $C_1$  موجب کاهش انتقال‌پذیری دسته‌موتور می‌شود.

برای مشاهده تأثیر بهینه‌سازی، در شکل ۱۰ سفتی دینامیکی، در شکل ۱۱ ضریب میرایی و در شکل ۱۲ انتقال‌پذیری دسته‌موتور برای سه دسته داده‌ی جدول ۳ و داده‌های اولیه آورده شده است. اولین نتیجه که مؤید جبهه‌ی پارتو استخراجی است، این است که افزایش سفتی دینامیکی و ضریب میرایی دو هدف در راستای هم هستند و افزایش یکی موجب افزایش دیگری می‌شود و این دو هدف با انتقال‌پذیری



- افزایش ضریب میرایی معادل دسته موتور، به دلیل این که هدف اصلی یک جداساز استهلاک بالای انرژی است.
  - با رسم جبهه‌ی پارتوی نشان داده شد که کاهش ضریب انتقال پذیری با دو هدف افزایش سفتی دینامیکی و ضریب میرایی در تناقض است. بنابراین، بهینه‌سازی به پاسخ یکتایی منجر نشده و شامل مجموعه‌ی از پاسخ‌ها شده است. نمودارهای سفتی دینامیکی، ضریب میرایی و انتقال پذیری برای سه حالت بهترین سفتی دینامیکی و ضریب میرایی، بهترین حالت انتقال پذیری و یک نقطه‌ی انتخابی بر روی جبهه‌ی پارتو رسم و مشخص شد که:
  - برای بهترین حالت سفتی دینامیکی و ضریب میرایی، اگرچه این پارامترها به صورت ملموسی افزایش پیدا کرده‌اند، ولی مساحت زیر نمودار انتقال پذیری نیز به میزان ۸۵ درصد افزایش یافته است.
  - برای بهترین حالت انتقال پذیری، با این که انتقال پذیری در بازه‌ی بسامد کاری کاهش پیدا کرده است و بیشینه‌ی آن به خارج محدوده‌ی کاری موتور منتقل شده است، ولی به صورت هم‌زمان سفتی دینامیکی و ضریب میرایی نیز کاهش پیدا کرده‌اند.
  - برای یک نقطه‌ی انتخابی روی جبهه‌ی پارتو، هم‌زمان با افزایش حدود سه برابری مساحت زیر نمودار سفتی دینامیکی و ضریب میرایی، مساحت زیر نمودار انتقال پذیری نیز به میزان ۴۰ درصد کاهش پیدا کرده و بیشینه‌ی روی داده در بسامد ۱۴/۵ هرتز نیز حذف شده است.
- نتیجه گرفته شد که برای حالات حدی نمودار جبهه‌ی پارتو که متناظر با بهینه‌سازی تک‌هدفه است، به دلیل تضاد اهداف، احتمال عدم بهبود وضعیت کلی سیستم وجود دارد، ولی به ازای نقاط میانی بر روی جبهه‌ی پارتو رفتار سیستم بهینه شده است. همچنین با استفاده از تابع جریمه‌ی بیشینه انتقال پذیری به خارج محدوده‌ی کاری دسته موتور منتقل شده است.

## پانویس‌ها

1. decoupler
2. notch frequency
3. disturbing plate
4. fluid structure interaction
5. computer aided engineering
6. root mean square
7. sequential quadratic programming
8. directed tabu search
9. neural network
10. non-dominated sorting genetic algorithm
11. fitness sharing
12. niche count
13. single point crossover

## منابع (References)

1. Yu, Y., Pelemedu, S.M., Naganathan, N.G. and et al. "Automotive vehicle engine mounting systems: a survey", *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, **123**(2), pp. 186-194 (2001).
2. Ahn, Y.K., Song, J.D. and Yang, B.-S. "Optimal design of engine mount using an artificial life algorithm", *Journal of Sound and Vibration*, **261**(2), pp. 309-328 (2003).
3. Tikani, R., Vahdati, N.R. Ziaei-Rad, S. and et al. "A new hydraulic engine mount design without the peak frequency", *Journal of Vibration and Control*, **17**(11), pp. 164-1656 (2011).
4. Vahdati, N. and Heidari, S. "A novel semi-active fluid mount using a multi-layer piezoelectric beam", *Journal of Vibration and control*, **16**(14), pp. 2215-2234 (2010).
5. Ahn, Y.K., Kim, Y., Yang, B. and et al. "Optimal design of an engine mount using an enhanced genetic algorithm with simplex method", *Vehicle System Dynamics*, **43**(1), pp. 57-81 (2005).
6. Singh, R., Kim, G. and Ravindra, p. "Linear analysis of automotive hydro-mechanical mount with emphasis on decoupler characteristics", *Journal of sound and vibration*, **158**(2), pp.219-243 (1992).
7. Colgate, J., Chang, C.-T., Chiou, Y.-C. and et al. "Modelling of a hydraulic engine mount focusing on response to sinusoidal and composite excitations", *Journal of Sound and Vibration*, **184**(3), 503-528 (1995).
8. Adiguna, H., Tiwari, M., Singh, R. and et al. "Transient response of a hydraulic engine mount", *Journal of Sound and Vibration*, **268**(2), pp. 217-248 (2003).
9. Fan, R. and Lu, Z. "Fixed points on the nonlinear dynamic properties of hydraulic engine mounts and parameter identification method: experiment and theory", *Journal of Sound and Vibration*, **305**(4-5), pp. 703-727 (2007).
10. Wang, L.-R., Lu, Z.-H. and Hagiwara, I. "Analytical analysis approach to nonlinear dynamic characteristics of hydraulically damped rubber mount for vehicle engine", *it Nonlinear Dynamics*, **61**(1-2), pp. 251-264 (2010).
11. Li, Q., Liu, W., Sun, Y. and et al. "Parameter identification on lumped parameters of the hydraulic engine mount model", *In: MATEC Web of Conferences, EDP Sciences*, pp. 02017 (2016).
12. Fukazawa, M., Murao, T. and Unigame, S. "The Method to Predict the Vibration Transfer Function of Hydraulic Engine Mount on a Vehicle", 0148-7191, SAE Technical Paper (2016).
13. Guo, R., Gao, J., Wei, X.-k. and et al. "Full vehicle dynamic modeling for engine shake with hydraulic engine mount", 0148-7191, SAE Technical Paper (2017).
14. Fomani, M.S., Khajepour, A. and Durali, M. "Optimization of engine mount characteristics using experimental/numerical analysis", *Modal Analysis*, **9**(10), pp. 1121-1139 (2003).

15. Lee, D.-H., Hwang, W.-S. and Kim, C.-M. "Design sensitivity analysis and optimization of an engine mount system using an FRF-based substructuring method", *Journal of Sound and Vibration*, **255**(2), pp. 383-397 (2002).
16. Christopherson, J. and Jazar, G.N. "Optimization of classical hydraulic engine mounts based on RMS method", *Shock and Vibration*, **12**(2). pp. 119-147 (2005).
17. Ahn, Y.K., Song, J.D., Yang, B.-S. and et al. "Morishita, Optimal design of nonlinear hydraulic engine mount", *Journal of Mechanical Science and Technology*, **19**(3), pp. 768-777 (2005).
18. Arzanpour, S., Eslaminasab, N., Shubert, B. and et al. "A novel technique for frequency and time optimization of automotive engine mount parameters", *In: ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, pp. 1613-1620 (2006).
19. Wu, J. and Shangguan, W.-B. "Dynamic optimization for vibration systems including hydraulic engine mounts", *Journal of Vibration and Control*, **16**(11), pp. 1577-1590 (2010).
20. Ohadi, A. "Optimization of hydraulic engine Rasekhipour, Y. and mounts through simplified and full vehicle models", *In: Proceeding of the World Congress on Engineering*, (2011).
21. Li, Q., Zhao, J., Zhao, B. and et al. "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*, **223**(9), pp. 1109-117 (2009).
22. Liu, X.-A., Shangguan, W.-B., Lv, Z. P. and et al. "A study on optimization method of a powertrain mounting system with a three-cylinder engine, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers", *Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **231**(12), pp. 2235-2252 (2017).
23. Li, Y., Jiang, J.Z. and Neild, S.A. "Optimal fluid passageway design methodology for hydraulic engine mounts considering both low and high frequency performances", *Journal of Vibration and Control*, **25**(21-22), pp. 2749-2757 (2019).
24. Choi, S., Song, H., Lee, H. and et al. "Vibration control of a passenger vehicle featuring magnetorheological engine mounts", *International Journal of Vehicle Design*, **33**(1-3), pp. 2-16 (2003).
25. Konak, A., Coit, D.W. and Smith, A.E. "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial", *Reliability Engineering & System Safety*, **91**(9), pp. 992-1007 (2006).
26. Deb, K. "An investigation of niche and species formation in genetic function optimization", *ICGA* **89**, pp. 42-50 (1989).