



## ارزیابی پاسخ‌های دینامیکی در عیب‌یابی دسته‌موتورهای فعال چند محفظه‌ای با قابلیت خنک‌کاری

علی مهرکیش<sup>۱</sup> و علی اکبر اکبری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۰۵، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۸

### چکیده

دسته‌موتورهای الکترومغناطیسی، از جمله دسته‌موتورهای فعال هستند که در سالیان اخیر، مورد توجه قرار گرفته‌اند. تشخیص عیب در دسته‌موتورهای فعال با توجه به قیمت تمام شده آن‌ها نسبت به انواع غیر فعال، بسیار با اهمیت است. با توجه به آن که آنالیز ارتعاشات، از مهم‌ترین تکنیک‌های پایش وضعیت و عیب‌یابی تجهیزات به شمار می‌رود، در این پژوهش با بکارگیری صحیح و اصولی از پاسخ‌های دینامیکی و نمودارهای پاسخ فرکانسی به ویژه نمودارهای بوده، نتایج قابل توجهی در شناسایی خرابی در سیستم دسته‌موتورهای فعال الکترومغناطیسی، افزایش عمر مفید آن‌ها و کاهش هزینه‌های تعمیراتی بوجود خواهد آمد. استفاده از این روش از آنجا که نیازی به شناسایی کامل سیستم وجود ندارد، بسیار حائز اهمیت است. برای این منظور، در این پژوهش پس از معرفی ساختار دسته‌موتور فعال الکترومغناطیسی با قابلیت خنک‌کاری و مدل‌سازی دینامیکی سیستم مورد بررسی، به معرفی عیوب مختلف به ویژه عیوب ناشی از فعل و انفعالات حرارتی و خوردگی پرداخته می‌شود و در نهایت برای نخستین بار به استخراج جداول تفکیکی و ترکیبی عیوب اقدام خواهد شد. بر این اساس، شش عیب تفکیکی و سه عیب ترکیبی شناسایی می‌شوند.

**کلمات کلیدی:** دسته‌موتور فعال الکترومغناطیسی؛ عیب‌یابی؛ آنالیز ارتعاشات.

## Dynamic Responses Assessment in Fault Diagnosis of Multi-Function Active Engine Mounts with Cooling Capacities

A. Mehrkish<sup>1</sup>, A.A. Akbari<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Iran.

### Abstract

Electro-magnetic engine mounts are among active mounts which considered in the recent years. Vibration analysis is one of important techniques in fault detection and condition monitoring. Due to this fact, in this study with application of dynamic responses and frequencies responses diagram, significant results in fault detection in electro-magnetic active engine mount system, it's life-time increase, and repairing cost decline, will obtain. In order to achieve these purposes, after introduction of the engine mount structure and system modeling, different faults especially those caused by thermal and corrosion interactions have been introduced. Finally, qualitative and quantitative states of both separate and combined fault diagnosis systems will be presented. According to these tables, six separate faults and three combined ones will identified.

**Keywords:** Electro-Magnetic Engine Mount; Fault Detection; Vibration Analysis; Frequencies Response.

## ۱- مقدمه

با توجه به آنکه نابالانسی موتور و ورودی‌های ناشی از ناهمواری جاده، از جمله منابع تولید ارتعاشات هستند و موجب کاهش عملکرد وسیله نقلیه می‌شوند، تحقیقات زیادی جهت یافتن دلایل ارتعاشات موتور و وسیله نقلیه و روش‌های کاهش آن انجام شده است [۱]، اما همچنان حوزه‌های بررسی نشده زیادی در موضوع مدل‌سازی و جداسازی<sup>۱</sup> ارتعاشات موجود است. از جمله این موارد، می‌توان به موضوع بررسی عیوب مختلف در دسته‌موتورها به ویژه انواع فعال آن اشاره نمود.

دسته‌موتورهای فعال، از دسته‌موتور غیر فعال به همراه حسگر ارتعاشات، عملگر و یک کنترل‌کننده معمولاً الکترونیکی ساخته شده‌اند. در این انواع، استفاده از دسته‌موتور غیر فعال به آن منظور است تا اگر سیستم هوشمند دچار نقص شود، مجموعه به یک سیستم غیر فعال تبدیل گردد [۲]. در سال ۲۰۱۱ فیضی و همکارانش [۳]، مدل سازی یک دسته‌موتور MR<sup>۲</sup> را در دستور کار قرار دادند. مطالعه آنها نشان داد، با افزایش میدان مغناطیسی سختی دینامیکی دسته‌موتورها نیز قابل تغییر است. در همین سال منصور و همکارانش [۴]، به معرفی و مدل‌سازی دسته‌موتور الکترومغناطیسی جدیدی پرداختند که مبنای پژوهش‌های آتی مهرکیش و طهانی [۱] گردید؛ همچنین در سال ۲۰۱۲ حسینی و همکارانش [۵]، اقدام به طراحی و مدل‌سازی یک نمونه عملگر ارزان قیمت نمودند. آنها در طی تحقیقات تحلیلی و تجربی خود عنوان کردند که معادلات غیرخطی سیم پیچ در برخی از کاربردهای خاص آن، توانایی خطی-سازی را خواهند داشت. در همین سال، دسته‌موتور الکترومغناطیسی فعالی پیشنهاد گردید که از انتقال گرمای تولید شده در سیم پیچ به اجزای مختلف لاستیکی دسته موتور جلوگیری کرده، مانع از ایجاد آسیب به آن شده و ضمن افزایش مقاومت و ماندگاری آن، ابعاد آن را کاهش داده و ساختار آن را ساده‌تر می‌نماید [۶].

بر اساس پیشنهاد ارائه شده، مهرکیش و طهانی در سال ۲۰۱۴، بر پایه ایده‌ای از لی [۶] و [۷] با اعمال تغییراتی بر

دسته‌موتور منصور و همکارانش، به معرفی دسته‌موتور فعال چند محفظه‌ای با قابلیت خنک‌کاری مبادرت ورزیدند (شکل ۱). بر اساس تغییرات انجام شده ایشان نشان دادند، مشکلات حرارتی بوجود آمده نمونه پیشین با کاهش ۱۵ الی ۳۰ درصدی دمای کاری کم‌تر خواهند شد [۱].

با توسعه پژوهش‌های مرتبط با دسته‌موتور فعال و گسترش نمونه‌های صنعتی آن، با توجه به قیمت بالاتر تمام شده این نوع دسته‌موتور، ضرورت مطالعه جدی در زمینه عیب‌یابی دسته‌موتورهای فعال، بیشتر از گذشته بوجود آمده است.

از دیگر سو استفاده از پاسخ‌های دینامیکی و نمودارهای پاسخ فرکانسی به ویژه نمودارهای بوده در موضوع عیب‌یابی از آن‌جا که نیازی به شناسایی کامل سیستم ندارد، می‌تواند روشی مناسب برای این موضوع مد نظر قرار گیرد.

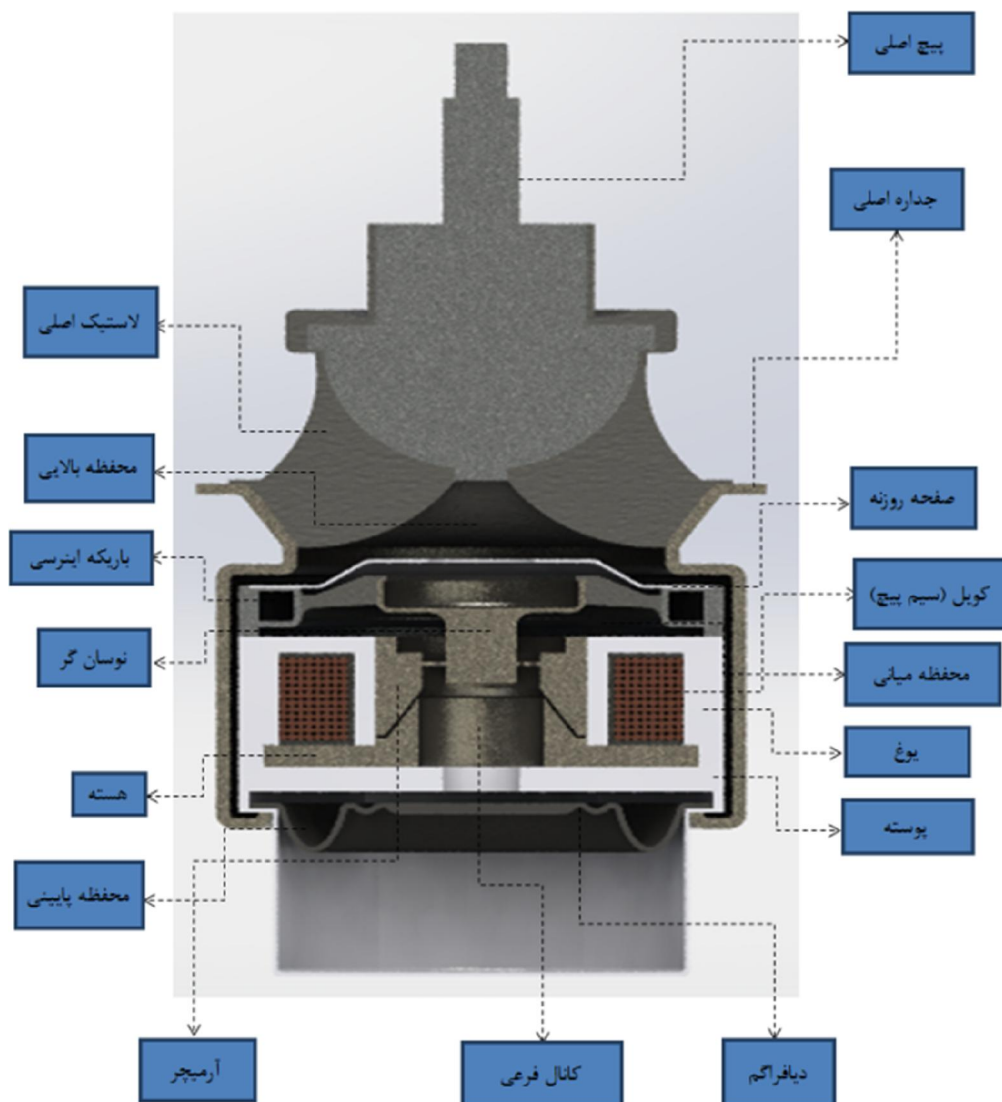
این پژوهش پس از ارائه مدل‌سازی دینامیکی صورت گرفته روی دسته‌موتور فعال چندمحفظه‌ای با توجه به این موضوع که گرمای تولید شده در دسته‌موتورهای فعال الکترومغناطیسی سبب بروز عیوب مختلف در دسته‌موتور می‌گردد، به بررسی عیوب مختلف و شناسایی این عیوب به کمک آنالیز فرکانسی می‌پردازد.

## ۲- معرفی ساختار دسته‌موتور فعال چند محفظه-

## ای با قابلیت خنک‌کاری

در شکل ۱ [۷] نحوه ارتباط بخش‌های مختلف نمایش داده شده است. در این نمونه یک لاستیک اصلی از یک طرف به پیچ مرکزی کوپل گردیده و از طرف دیگر، به جداره اصلی<sup>۳</sup> متصل شده است. محفظه میراکننده شامل، سه محفظه بالایی، میانی و پایینی است و از اتصال لاستیک اصلی، جداره اصلی و دیافراگم بوجود می‌آید. این محفظه از سیال عامل پر شده است و یک قسمت روزنه در بخش میانی تعبیه شده است که قطعه نوسان‌کننده در آن حرکت می‌کند. عبور سیال میان دو محفظه بالایی توسط یک عملگر الکترومغناطیسی کنترل می‌شود، منجر به بهبود عملکرد ارتعاشات سیستم خواهد شد. این در حالی است که محفظه سوم، منجر به بهبود عملکرد حرارتی دسته‌موتور می‌شود. سیال با دمای بالا

<sup>1</sup> Isolation<sup>2</sup> Magneto Rheological<sup>3</sup> Main Pipe



شکل ۱- اجزای دسته موتور توسعه یافته چند محافظه ای با قابلیت خنک کاری [۷]

قسمت مرکزی سلنویید و آرمیچر عبور می‌کند. قسمت سلنوییدی نیز شامل: سیم‌پیچی که به صورت حلقه پیچیده شده است و یک یوغ آن را مهار می‌کند، یک هسته که آرمیچر به صورت مداوم از آن متصل و منفصل می‌شود و یک پوسته<sup>۲</sup> است که یوغ و هسته را پیوند می‌دهد. یوغ، پوسته و هسته، مجموعاً توسط قالب‌گیری تزریقی شکل گرفته‌اند، به

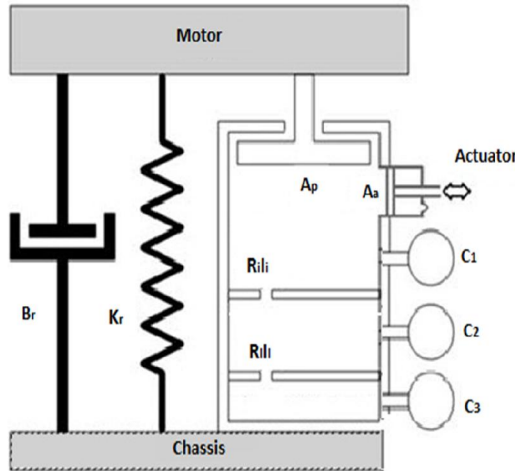
با قرار گرفتن در محافظه سوم، ظرفیت تبادل حرارتی بهتری را با محیط خواهد داشت. "راه‌انداز الکترومغناطیسی نیز، شامل: قسمت سیم‌پیچ که نیروی الکترومغناطیسی را تولید می‌کند، آرمیچری که از یک طرف به نوسانگر (نوسان‌گر به وسیله نیروی الکترومغناطیسی بالا و پایین می‌رود) کوئل شده است و کانال فرعی<sup>۱</sup> است که به صورت عمودی در طول

<sup>2</sup> Case

<sup>1</sup> Sub Channel

$$P_1 + P_2 = I_1 \dot{Q}_1 + R_1 Q_1 \quad (4)$$

$$P_2 + P_3 = I_1 \dot{Q}_1 + R_1 Q_1 \quad (5)$$



شکل ۲- مدل متمرکز دسته‌موتور توسعه‌یافته چند محفظه- ای [۷]

با استفاده از حل لاپلاس و به کمک یک دستگاه ۵ معادله (معادلات (۱) تا (۵))، ۵ مجهول (دبی و فشارهای ارائه شده در معادلات) می‌توان مقادیر دبی مجاری و فشار محفظه‌های مختلف را بدست آورد [۱۲]. با توجه به معادله نیروی انتقالی (۸) که اهمیت فشار محفظه بالایی را نشان می‌دهد، معادله (۶) را به صورت زیر خواهیم داشت:

$$P_1(s) = \left( \frac{A_p X(s) + A_a Y(s)}{C_1} \right) \left( \frac{M}{N} \right) \quad (6)$$

$$M = \left( \frac{1}{C_2} \right) (I_1 s^2 + R_1 s + I_1 s^2) +$$

$$\left( \frac{1}{C_3} \right) (I_1 s^2 + R_1 s) + (I_1 I_1 s^4 + R_1 I_1 s^3 + R_1 I_1 s^2) + \left( \frac{1}{C_3 C_2} \right)$$

$$N = \left( \frac{1}{C_2} \right) (I_1 s^2 + R_1 s + I_1 s^2) +$$

$$\left( \frac{1}{C_3} \right) (I_1 s^2 + R_1 s) + (I_1 I_1 s^4 + R_1 I_1 s^3 + R_1 I_1 s^2) +$$

$$\left( \frac{1}{C_1} \right) (I_1 s^2 + R_1 s) + \left( \frac{1}{C_1 C_2} \right) + \left( \frac{1}{C_3 C_2} \right) + \left( \frac{1}{C_3 C_1} \right)$$

در مطالعات انجام شده تابع جابجایی  $Z(s)$  به عنوان کنترل‌کننده‌ای که عملگر را بر اساس جابجایی موتور تنظیم می‌کند، بر طبق رابطه (۷) معرفی گردیده است.

طوری که سیال عامل، درون پوسته جاری نمی‌شود. هنگامی که آرمیچر از هسته جدا می‌شود، درزگیر، هسته و پوسته را در گپ<sup>۱</sup> ایجاد شده آب‌بندی و از اتصال کوتاه جلوگیری می‌کند. جاری شدن سیال درون گپ، نویز حاصل از اتصال و انفصال مکرر آرمیچر از هسته را می‌کاهد [۱].

### ۳- مدل سازی و ارائه معادلات ریاضی دسته‌موتور فعال توسعه یافته

بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته [۸ و ۹]، چهارچوب مدل‌سازی به صورت شکل ۲ که نمایانگر مدل متمرکز حاکم بر دسته‌موتور است، مدنظر قرار گرفت. پژوهش‌های مختلفی در سال‌های اخیر انواع مدل‌سازی‌های دسته‌موتور را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۰ و ۱۱]. بر این اساس، همانطور که اشاره گردید، در مدل مهرکیش و طهانی [۷]، به تمام اجزای یک دسته‌موتور غیرفعال بدون دی‌کاپلر، یک شناور به محفظه‌ی بالایی و یک زیر محفظه به بخش پایین اضافه شده است. در این‌جا ذکر این نکته ضروری است که بر اساس پژوهش‌های پیشین از جمله غلامی [۲] و مهرکیش [۷]، عوامل غیرخطی‌ساز بسیاری در مدل وجود دارند که به دلیل اثرات محدود در این مطالعه به آن‌ها اشاره نشده است. معادلات پیوستگی حاکم بر سیستم [۱۲]، به صورت معادلات (۱) الی (۳) نمایش داده خواهند شد:

$$C_1 \dot{P}_1 + Q_1 = A_p \dot{X} + A_a \dot{Y} \quad (1)$$

$$C_2 \dot{P}_2 + Q_2 = Q_1 \quad (2)$$

$$C_3 \dot{P}_3 = Q_2 \quad (3)$$

که در معادله (۱)  $A_a$  سطح مقطع موثر شناور و  $A_p$  سطح مقطع معادل پیستون است؛ همچنین  $Y$  جابجایی عملگر و  $X$  جابجایی نسبی موتور و شاسی است. در معادلات (۱) و (۲)  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$ ، ضریب انعطاف‌پذیری حجمی محفظه اول، دوم و سوم و به طور مشابه  $\dot{P}_1$ ،  $\dot{P}_2$  و  $\dot{P}_3$  نرخ تغییر فشار در این سه محفظه است؛ همچنین  $Q_1$  و  $R_1$ ،  $I_1$  معرف دبی، مقاومت و اینرسی سیال عبوری از مجرای میانی سیم‌پیچ و هسته عملگر و  $Q_2$  دبی عبوری از مجرای اول هستند. در نهایت معادلات مومنوم نیز عبارتند از:

<sup>1</sup> Gap

مورد مقایسه قرار گرفت. شکل ۳ نشان‌دهنده این موضوع است که مدل‌سازی صورت گرفته با نتایج پیشین انطباق کامل داشته و می‌توان چنین بیان نمود که حالت مطرح شده نسبت به مدل‌های پیشین، از جامعیت بیشتری برخوردار است.

جدول ۱- پارامترهای بکار رفته در مدل سازی در دسته موتور توسعه یافته [۷]

پارامتر	مقادیر	پارامتر	مقادیر
$A_a$	1788mm <sup>2</sup>	$K_r$	170 N/mm
$I_i$	4.2×10 <sup>-10</sup> NS <sup>2</sup> /mm <sup>5</sup>	$B_r$	0.215NS/mm
$R_i$	3.9×10 <sup>-8</sup> NS /mm <sup>5</sup>	$C_1$	2.05×10 <sup>5</sup> mm <sup>5</sup> /N
$I_1$	3.2×10 <sup>-10</sup> NS <sup>2</sup> /mm <sup>5</sup>	$C_2$	2.03×10 <sup>7</sup> mm <sup>5</sup> /N
$R_1$	3.6×10 <sup>-8</sup> NS /mm <sup>5</sup>	$C_3$	2.1×10 <sup>6</sup> mm <sup>5</sup> /N
		$A_p$	3650mm <sup>2</sup>

#### ۴- بررسی عیوب مختلف مورد انتظار در دسته-موتورهای الکترومغناطیسی

دسته اول عیوب ایجاد شده در نتیجه اثرات حرارت تولید شده در سیم‌پیچ دسته‌موتور را می‌توان در دو قالب خلاصه نمود:

۱- تغییر خواص سیال داخل دسته‌موتور بر اثر تغییرات حرارتی [۱۲].

۲- اثرات مخرب بر بخش‌های لاستیکی دسته‌موتور بر اثر تغییرات حرارتی مانند، تغییرات در ضریب سختی و ضریب ارتجاع که به دو صورت کاهش عملکرد دسته‌موتور و کاهش طول عمر آن خواهند بود [۱۲].

دسته دوم عیوب ناشی از خوردگی، در بخش‌های فلزی پیستون و داخل محافظ دسته‌موتور است که سبب تغییرات در سطوح مقطع عملگر و پیستون می‌شوند. دسته سوم نیز

$$Z(s) = \left( \frac{Y(s)}{X(s)} \right) \quad (7)$$

مقدار  $Z(s)$  مقداری واحد نیست و از پایگاه داده‌ای بدست می‌آید که بر اساس شرایط عملکردی وسیله نقلیه نظیر، سرعت، شتاب روی شاسی، دور موتور، کنترل‌کننده درجه سوخت و سایر مشخصات عملیاتی توسط تولیدکننده وسیله نقلیه اعلام می‌شود.

جهت بررسی عملکرد دینامیکی به معرفی سختی دینامیکی نیاز است که از حاصل تقسیم نیروی منتقل شده به شاسی بر جابجایی نسبی موتور و شاسی بدست می‌آید. البته سایر خواص میرا کننده نیز، از اهمیت بالایی برخوردارند. نیروی منتقل شده به شاسی به صورت رابطه (۸) خواهد بود که با گرفتن لاپلاس از آن و جایگذاری فشار محفظه بالایی در این معادله و تقسیم نیروی دینامیکی بر جابجایی نسبی موتور و شاسی، سختی دینامیکی را به صورت رابطه (۹) خواهیم داشت:

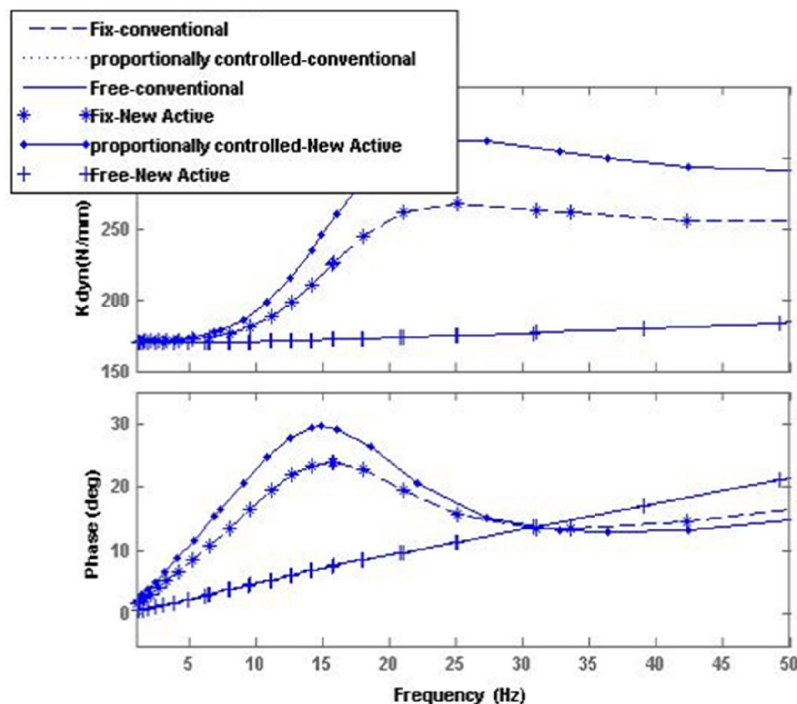
$$F_r = K_r X + B_r \dot{X} + A_p P_1 \quad (8)$$

$$K_{dyn}(s) = K_r + B_r(s) + \left( \frac{A_p}{C_1} \right) \left( \frac{M}{N} \right) + \left( \frac{A_p Z(s)}{C_1} \right) \left( \frac{M}{N} \right) \quad (9)$$

نکته قابل توجه، اهمیت تحلیل‌های فضای زمانی به ویژه در جابجایی‌های بزرگ است؛ اما در این پژوهش دینامیک مدل از طریق بررسی پارامترهای سختی دینامیکی، مورد مطالعه قرار می‌گیرد؛ بنابراین با تعیین سختی و میرایی کل سیستم، می‌توان رفتار دینامیکی آن را در فضای زمانی، مورد ارزیابی قرارداد.

#### ۳-۱- بررسی نتایج حاصل از مدل سازی

با اعمال پارامترهای بکار رفته در مدل دسته‌موتور توسعه یافته مهرکیش و طهانی [۷] (جدول ۱) و به کمک نرم‌افزار متلب و با استفاده از نمودارهای بوده به ترسیم نمودار سختی دینامیکی و فاز (نمودارهای پاسخ فرکانسی) پرداخته و در ابتدا جهت بررسی صحت نتایج به مقایسه آنها با نتایج بدست آمده از مقالات و پژوهش‌های مشابه اقدام گردید. به این منظور، نتایج بدست آمده از مطالعات پیشین را با مدل‌سازی انجام شده با در نظر گرفتن شرایطی که در آن ضرایب مربوط به محفظه سوم یعنی،  $C_3$ ،  $R_1$  و  $I_1$  صفر در نظر گرفته شوند،



شکل ۳- مقایسه پاسخ سختی دینامیکی دسته‌موتور فعال نوین و دسته‌موتور دو محفظه‌ای ساده برای سه حالت معرفی شده (که مبین انطباق کامل است) [۷]

روش‌های مختلف عیب‌یابی در سیستم‌های مشابه دسته-موتور وجود دارد که عمده آنها عبارتند از: عیب‌یابی به کمک فشار، روغن و غلظت آن، تغییرات درجه حرارت، جریان روغن و عیب‌یابی به کمک آنالیز ارتعاشات. بر اساس مطالعات پیشین عیب‌یابی به کمک ارتعاشات را می‌توان یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها عنوان نمود. باید توجه داشت که در عیب‌یابی به کمک دیگر روش‌ها، عمدتاً روند پیدایش مشکل تعیین می‌شود و نوع مشکل قابل تعیین نخواهد بود، اما به کمک ارتعاشات می‌توان ضمن نگهداری پیشگیرانه، با درنظر گرفتن سیگنال‌های ارتعاشی تشخیص عیب نیز محقق گردد. با استفاده از روش ارتعاشات می‌توان محدوده وسیعی از عیوب را به طور اتوماتیک و بدون دخالت انسان، با کمک رایانه شناسایی نمود [۱۳]. از سیگنال‌های ثبت شده به روش‌های مختلف می‌توان برای تشخیص خطا با ارتعاشات به روش‌های تحلیل شکل موج زمانی، تحلیل فرکانسی، تحلیل پایداری یا ناپایداری پاسخ، تحلیل زوایای فاز، تحلیل دامنه ارتعاش در حین توقف یا راه اندازی و

عیوبی مانند، نشستی هستند که می‌توانند منشا متفاوتی مانند نقص در دیکاپلر داشته باشند.

با توجه به آن که دسته‌موتور فعال در شرایط عملکردی مختلف با توابع انتقال گوناگون قابل بررسی است، در این مبحث به بررسی عیوب مختلف برای حالت تناسب یک به یک حرکت نسبی ارتعاشی شاسی و حرکت شناور که به معنای  $Z(s)$  برابر یک است، اقدام می‌شود. در این تحقیق به بررسی حول ۲۰ درصد تغییرات مثبت و منفی حول هر پارامتر در نرم‌افزار متلب پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که نتایج تجربی و عددی حسین منصور نیز تاییدکننده نتایج حاصل از این روش می‌باشند [۱۴].

عیوب دسته‌موتور تحت بررسی در این گزارش عبارتند از: تغییرات انعطاف پذیری حجمی، تغییرات اینرسی و مقاومت سیال در نتیجه افزایش دما، کاهش سطح موثر عملگر به دلیل رسوبات داخلی و خوردگی، افت میرایی و سختی خطی به دلیل تغییرات حرارتی.

#### ۴-۳- تغییرات مقاومت سیال

همانطور که از شکل ۶ مشخص است، افزایش مقاومت بر فرکانس گوشه‌ای سیستم اثری نداشته و تنها موجب کاهش بیشینه سختی دینامیکی می‌شود. بر اساس شکل متاثرترین ناحیه، فرکانس‌های نزدیک به رزونانس هستند. به عبارتی این افزایش موجب محدود شدن حرکت سیال و هموارتر شدن نمودار و پاسخ کلی سیستم می‌شود؛ همچنین سختی به سوی مقداری ثابت همگرا می‌شود. با توجه به شکل می‌توان عنوان نمود که اختلاف فاز با افزایش مقاومت کاهش می‌یابد.

#### ۴-۴- تغییرات میرایی و سختی خطی

با توجه به کوچک بودن میرایی از اثر آن بر سیستم چشم‌پوشی می‌شود. با توجه به شکل ۷، افزایش در سختی لاستیک، سختی دینامیکی را افزایش و اختلاف فاز را کاهش می‌دهد. با وجود آنکه بر اساس شکل‌های زیر تغییر در سختی لاستیک نقش بسزایی در سختی دینامیکی سیستم دارد، اما انتخاب آن به صورت مستقیم متاثر از تحمل بار استاتیکی دسته‌موتور است. افزایش حرارت بوجود آمده در طی شرایط اوج کاری می‌تواند سبب افت سختی ذاتی سیستم و در نتیجه افزایش سختی دینامیکی شود. این موضوع در فرکانس‌های بالا به نوعی نامطلوب حساب می‌شود و عیب محسوب می‌شود. کاهش ضریب فنریت به نوعی مبین بروز عیوب حرارتی است.

#### ۴-۵- تغییرات سطوح موثر پمپاژ و عملگر

از آنجایی که سطوح موثر پمپاژ و عملگر تنها روی نیروی وارده بر سیال اثر می‌گذارد، افزایش آن موجب افزایش در نیروی محرک و حرکت سیال خواهد بود. این موضوع سبب افزایش فشار محفظه بالایی و به دنبال آن افزایش فاز و سختی دینامیکی خواهد شد. همانطور که از شکل‌های ۸ و ۹ مشخص است، افزایش مقاومت بر فرکانس گوشه‌ای سیستم اثری ندارد. با توجه به آن‌که سطح پمپاژ از سطح عملگر بزرگ‌تر است، تغییرات قابل ملاحظه‌تری نیز خواهد داشت. در پایان باید اشاره گردد که کاهش سطح مقطع پمپاژ، به نوعی مبین خوردگی است.

تحلیل رزونانس بهره برد. بهره‌گیری از هر روش بر اساس نوع سیستم و عیوب تعیین می‌گردد و ممکن است نیاز به استفاده از چند روش باشد [۱۳]. در این تحقیق از عیب‌یابی به کمک ارتعاشات با استفاده از دیاگرام بوده و تحلیل فرکانسی و زوایای فاز بهره برداری شده است. علت این امر راحتی دسترسی به این دیاگرام در این مسئله در کنار محدودیت‌های فیزیکی استفاده از دیگر روش‌های عیب‌یابی در سیستم مورد بررسی است.

#### ۴-۱- تغییرات انعطاف پذیری حجمی

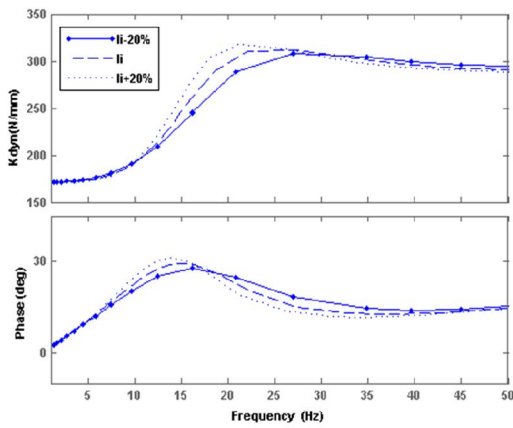
در بررسی این پارامتر تنها ضریب انعطاف حجمی محفظه بالایی، مورد بررسی قرار می‌گیرد، چرا که نسبت به محفظه میانی بسیار کوچک‌تر است و اثر بیشتری روی پارامترهای دیگر سیستم دارد. شکل ۴ تغییرات سیستم را بر اثر تغییرات ضریب انعطاف حجمی نشان می‌دهد. بر این اساس با افزایش این ضریب، فرکانس تشدید کاهش یافته و در فرکانس‌های بالاتر سختی دینامیکی نیز کم می‌شود. در منحنی زاویه فاز نیز نقطه بیشینه کاهش یافته و اختلاف فاز در فرکانس‌های پایین، کمتر می‌شود.

همچنین محدوده مکانی فرکانس گوشه‌ای،<sup>۱</sup> یکی از نمودهای سیستم‌های دینامیکی است و جابجایی مکانی آن نمایشگر انعطاف دسته‌موتور در تنظیم پارامترها است. به عبارتی این فرکانس، منحنی پاسخ فرکانسی را به دو بخش ناحیه فرکانسی پایین و بالا تقسیم می‌کند. تغییر انعطاف پذیری حجمی بر فرکانس گوشه‌ای، تاثیر کمی داشته و تنها آن را اندکی به سمت راست منتقل می‌کند.

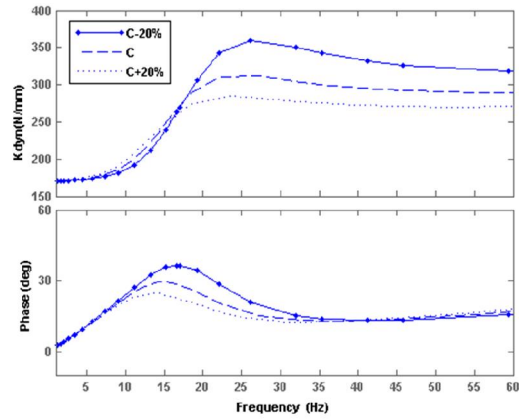
#### ۴-۲- تغییرات اینرسی سیال

افزایش اینرسی باعث افزایش دامنه حرکت سیال در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس گوشه‌ای شده که دلیل افزایش اختلاف فاز است؛ همچنین با توجه به شکل ۵، افزایش اینرسی باعث کاهش فرکانس گوشه‌ای می‌شود. همچنین سختی به سوی مقداری ثابت همگرا می‌شود.

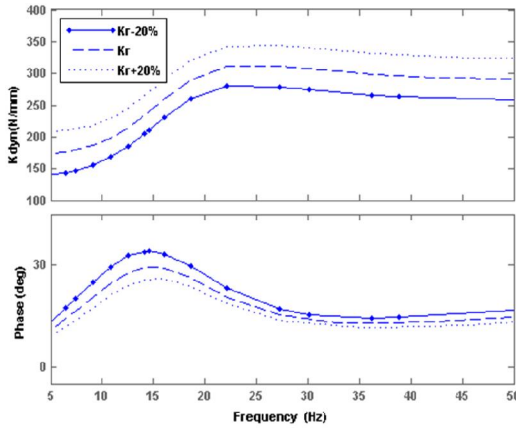
<sup>1</sup> Notch Frequency



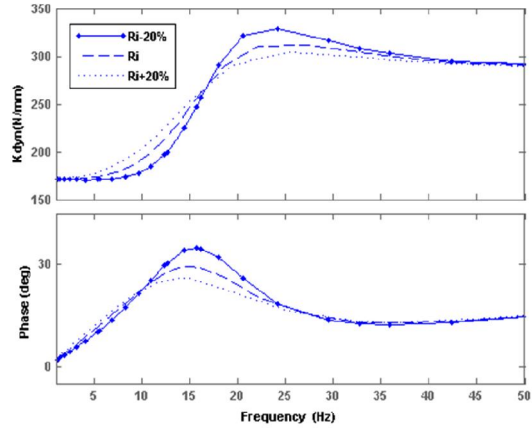
شکل ۵- تغییرات سیستم بر اثر تغییرات اینرسی سیال



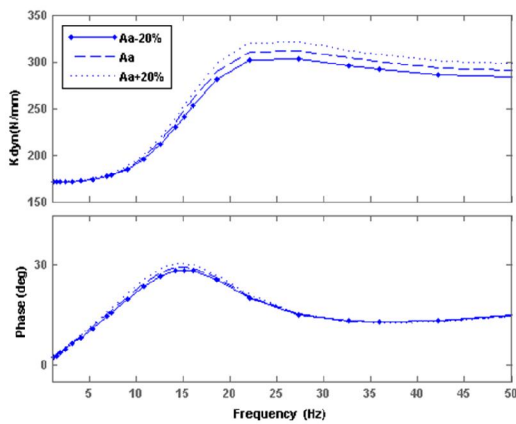
شکل ۴- تغییرات سیستم بر اثر تغییرات ضریب انعطاف حجمی



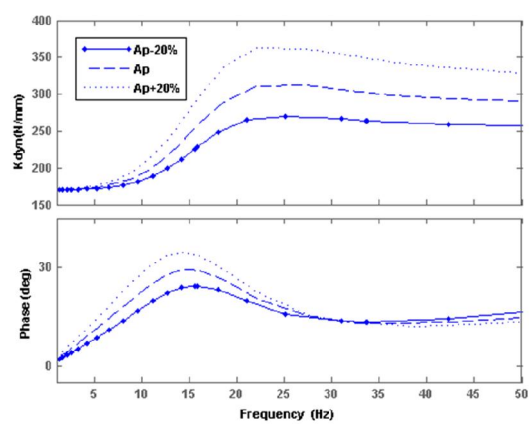
شکل ۷- تغییرات سیستم بر اثر تغییرات سختی خطی



شکل ۶- تغییرات سیستم بر اثر تغییرات مقاومت سیال



شکل ۹- تغییرات سیستم بر اثر تغییرات سطح موثر عملگر



شکل ۸- تغییرات سیستم بر اثر تغییرات سطح موثر پمپاژ



### ۵- بردار مشخصه‌ی عیب‌یابی

جهت تحلیل عیوب دسته‌موتور مورد بررسی، نیاز به تبیین مشخصه‌های مناسب در قالب درایه‌های بردار مشخصه است. از جمله این عوامل، فرکانس و مقدار ماکزیمم سختی دینامیکی، فرکانس و مقدار ماکزیمم فاز، مقدار سختی دینامیکی انتهای بازه فرکانسی، مقدار سختی دینامیکی ابتدای بازه فرکانسی خواهند بود. البته عوامل دیگری نیز، قابلیت در نظر گرفتن دارند؛ اما با توجه به آن که به کمک همین موارد قابلیت تمیز دادن عیوب مد نظر این گزارش وجود دارد، به همین عناوین بسنده می‌شود. به طور مثال اگر نمودار عیب مجهول همراه با کاهش در فرکانس ماکزیمم سختی دینامیکی و افزایش در مقدار ماکزیمم سختی دینامیکی باشد، بر اساس جدول‌های ۲ و ۳ کاهش مقاومت سیال رخ داده است. در ادامه به کمک کد نوشته شده در نرم افزار متلب نتایج عددی بدست آمده، به صورت کمی در

جدول ۲ و به صورت کیفی در جدول ۳ ارائه می‌گردد که مبنای شناسایی عیوب به صورت مجزا به کمک نمودار بوده خواهد بود. باید اشاره شود که کاهش سطح مقطع پمپاژ مبین خوردگی، کاهش ضریب فنریت، نشان دهنده اثرات مخرب بر بخش‌های لاستیکی دسته‌موتور و نهایتاً کاهش ضریب مقاومت سیال، بیان کننده تغییر خواص سیال داخل دسته‌موتور است.

در بررسی ترکیبی عیوب به کمک جدول کمی عیب‌یابی (جدول ۲)، به وزن هر عامل در تشخیص عیب توجه می‌شود. البته با توجه به جدول کمی عیب‌یابی می‌توان مشاهده نمود، برخی عیوب مانند، کاهش مقاومت سیال و کاهش سطح مقطع عملگر با وجود تغییرات ۲۰ درصدی، تغییرات چندانی در نمودار بوده نسبت به حالت سالم ایجاد نمی‌کنند؛ همچنین کاهش ضریب انعطاف حجمی هر چند تغییرات زیادی نسبت به نمودار سالم از خود نشان می‌دهد، اما در

جدول ۲- مقادیر کمی عیب‌یابی تفکیکی

حالات مختلف	فرکانس ماکزیمم سختی دینامیکی	مقدار ماکزیمم سختی دینامیکی	فرکانس ماکزیمم فاز	مقدار ماکزیمم فاز	مقدار سختی دینامیکی انتهای بازه فرکانسی	مقدار سختی دینامیکی ابتدای بازه فرکانسی
حالت سالم	24.5360	313.7834	14.9315	29.5545	290.3305	171.0225
کاهش ضریب فنریت ( $K_f$ )	24.2404	281.5934	14.4882	34.0573	257.4833	137.0398
کاهش مقاومت سیال ( $R_f$ )	23.3046	329.0361	15.6703	34.7839	290.7779	170.9484
کاهش ضریب انعطاف حجمی (C)	26.4076	359.6854	16.6554	36.4254	322.9250	170.9948
کاهش اینرسی سیال ( $I_f$ )	28.2300	308.8346	16.2121	27.7960	293.4483	171.0555
کاهش سطح مقطع عملگر ( $A_a$ )	24.5852	304.4685	15.0300	28.5164	283.0885	170.9529
کاهش سطح مقطع پمپاژ ( $A_p$ )	24.9300	270.3289	15.6211	24.3334	256.9188	170.7003

جدول ۳- مقادیر کیفی عیب‌یابی تفکیکی

حالات مختلف	فرکانس ماکزیمم سختی دینامیکی	مقدار ماکزیمم سختی دینامیکی	فرکانس ماکزیمم فاز	مقدار ماکزیمم فاز	فرکانس ماکزیمم سختی دینامیکی	مقدار ماکزیمم سختی دینامیکی
حالت سالم	24.5360	313.7834	14.9315	29.5545	290.3305	171.0225
کاهش ضریب فنریت ( $K_r$ )	کاهش	کاهش	کاهش	افزایش	کاهش	کاهش
کاهش مقاومت سیال ( $R_f$ )	کاهش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	کاهش
کاهش ضریب انعطاف حجمی (C)	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	کاهش
کاهش اینرسی سیال ( $I_f$ )	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش	افزایش	افزایش
کاهش سطح مقطع عملگر ( $A_a$ )	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش	کاهش	کاهش
کاهش سطح مقطع پمپاژ ( $A_p$ )	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش	کاهش	کاهش

جدول ۴- مقادیر کیفی عیب‌یابی ترکیبی

حالات مختلف	فرکانس ماکزیمم سختی دینامیکی	مقدار ماکزیمم سختی دینامیکی	فرکانس ماکزیمم فاز	مقدار ماکزیمم فاز	فرکانس ماکزیمم سختی دینامیکی	مقدار ماکزیمم سختی دینامیکی
حالت سالم	24.5360	313.7834	14.9315	29.5545	290.3305	171.0225
کاهش ضریب فنریت ( $K_r$ )	ثابت	کاهش	ثابت	افزایش	کاهش	ثابت
کاهش اینرسی سیال ( $I_f$ )	افزایش	ثابت	افزایش	ثابت	ثابت	ثابت
کاهش سطح مقطع پمپاژ ( $A_p$ )	ثابت	کاهش	ثابت	کاهش	کاهش	ثابت

صحه‌سنجی گردید. در نهایت مدل بدست آمده به جهت استفاده در فرآیند عیب‌یابی تشریح شد. در گام بعد، عیوب مختلفی که سیستم با آن‌ها مواجه می‌گردد، دسته‌بندی شدند. سه دسته اصلی عیوب عبارتند از: عیوب ناشی از حرارت بر بخش‌های پلاستیکی که منجر به تغییر خواص سیال داخل دسته‌موتور و تغییرات در ضریب سختی و ضریب ارتجاع بخش لاستیکی می‌شوند. خوردگی که باعث تغییرات در سطوح مقطع عملگر و پیستون می‌شود و نهایتاً نشتی. بر اساس این دسته‌بندی، ۶ حالت رایج‌تر در توصیف عیوب معرفی گردیدند.

پس از آن به کمک پاسخ فرکانسی در قالب نمودارهای بده سیستم، به شناسایی و دسته‌بندی عیوب به صورت تفکیکی اقدام شد. مشخصه‌های مورد استفاده در این تحلیل شامل، فرکانس و مقدار ماکزیمم سختی دینامیکی، فرکانس و مقدار ماکزیمم فاز، مقدار سختی دینامیکی انتهای بازه فرکانسی، مقدار سختی دینامیکی ابتدای بازه فرکانسی بوده‌اند.

با توجه به حساسیت خوب مشخصه‌های عنوان شده نسبت به وجود عیب، تغییرات نمودارهای مختلف سیستم حول ۲۰ درصد تغییرات نسبت به حالت سالم مورد ارزیابی قرار گرفته و با مثال واکاوی گردید. بر این اساس ۶ عنوان عیب تفکیکی به کمک نمودار بده مورد شناسایی می‌تواند قرار گیرد. در نهایت نیز عیوب ترکیبی جهت شناسایی دسته‌بندی و با مثال تشریح گشتند. در این بررسی، به سه عیب کاهش سطح مقطع پمپاژ (خوردگی)، کاهش اینرسی سیال (تغییر خواص سیال) و کاهش ضریب فنریت (تغییر ساختار الاستیک) پرداخته شد.

#### ۷- فهرست علائم

$N_{smm}^{-1}$	$b$	میرایی،
$m$	$C$	انعطاف پذیری حجمی،
$N$	$F$	نیرو،
$kgm^{-4}$	$I$	اینرسی،
$Nmm^{-1}$	$K$	سختی خطی،

عمل به دلیل محدودیت‌های طراحی، بخش‌های لاستیکی به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که اجازه این چنین تغییرات گسترده‌ای را در محدوده کاری دسته‌موتور نداشته باشند؛ لذا در بررسی ترکیبی عیوب پیشنهاد می‌شود، تنها به سه عامل کاهش سطح مقطع پمپاژ، کاهش اینرسی سیال و کاهش ضریب فنریت اکتفا شود. در این چنین موارد باید به تاثیر وزنی هر پارامتر و توجه به دیگر پارامترها در مجموع دقت کرد. به طور مثال اگر فرکانس ماکزیمم سختی دینامیکی در نمودار عیب مجهول، افزایش یافته بود و مقدار سختی دینامیکی انتهای بازه فرکانسی کاهش چشم‌گیر از خود نشان داد، وجود هر سه عیب عنوان شده قابل تایید است. در این تحلیل باید به تاثیر کاهش ضریب سختی که بیشتر از اثر کاهش ضریب سختی و اثر کاهش سطح مقطع پمپاژ است، توجه داشت. به عبارتی این کاهش از هر دو این منابع ناشی می‌شود. جدول ۴ در تشخیص عیوب ترکیبی، مورد استفاده قرار خواهد گرفت. باید اشاره نمود، در این جدول تغییرات مختصر پارامترها، ثابت در نظر گرفته شده است. در انتها به کمک جداول عیب‌یابی کیفی معرفی شده می‌توان عیوب عنوان شده در این گزارش را به تفکیک و یا به صورت ترکیبی شناسایی نمود؛ اما باید اشاره نمود، تاثیر برخی دیگر عیوب نظیر نشتی نیز، می‌توانند در مطالعات آتی مورد بررسی قرار گیرند.

#### ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به کمک ارزیابی ارتعاشات به وسیله نمودارهای بده، روش جدیدی برای عیب‌یابی دسته‌موتور ارائه گشت؛ همچنین برای اولین بار به موضوع عیب‌یابی دسته‌موتورهای فعال الکترومغناطیسی پرداخته شد.

در گام اول معرفی ساختار دسته‌موتور نوین چند محفظه‌ای با قابلیت خنک کاری صورت گرفت. بر این اساس، محفظه سومی جهت بهبود عملکرد حرارتی دسته‌موتور، به مدل پیشین آن افزوده گردید.

در ادامه مدل‌سازی دینامیکی سیستم به کمک استخراج معادلات پیوستگی و مومنوم حاکم بر آن انجام شد و سپس پاسخ‌ها در حوزه فرکانس بدست آمد؛ همچنین نتایج به کمک نرم‌افزار متلب با نتایج مدل‌سازی پژوهش‌های مشابه

- |   |                                       |        |
|---|---------------------------------------|--------|
| [2] Gholami M. S (2008) linear and non-linear modelling of HEM with Simulink. Sixth International Conference on Internal Combustion, Engines & Oil, Tehran, Iran. (in Persian)  | فشار، $pa$                            | $P$    |
| [3] Feyzi T, Esfahanian M, Tikani R, Ziaei-Rad S (2011) Simulation of the dynamic behavior of the magnetorheological engine mount for automotive applications. Int J Automot Eng 1: 258-268.                                | دبی سیال، $m^{-3}s^{-1}$              | $Q$    |
| [4] Mansour H, Aezanpour S, Golnaraghi F (2012) Design of a solenoid valve based active engine mount. J Vib Control 1221-1232.  | مقاومت در برابر عبور سیال، $Nsm^{-5}$ | $R$    |
| [5] Hosseini AM, Aezanpour S, Golnaraghi F, Parameswaran AM (2013) Solenoid actuator design and modeling with application in engine vibration isolators. J Vib Control 19(7): 1015-1023.                                    | دامنه تحریک، $m$                      | $X$    |
| [6] Lee D, et al. (2012) Electromagnetic active engine mount with apparatus. US Patent No. 8100388.   | جابجایی عملگر، $m$                    | $Y$    |
| [7] Mehrkish A, Tahani M (2014) Side effects of cooling on a new type of multi chamber active engine mount with cooling function. Journal of Engine Research, IPCO. (in Persian)  | تابع جابجایی                          | $Z$    |
| [8] Alkhatib F (2013) Techniques for Engine Mount Modeling and Optimization, PhD. Thesis, University of Wisconsin-Milwaukee, United States.   | لزجت دینامیکی، $kgm^{-1}s^{-1}$       | $\mu$  |
| [9] Tikani R, Ziaei-Rad S, Vahdati N, Heydari S (2015) Design and modeling of an active hydraulic engine mount using FXLM Salgorithm for automotive applications. Modares Mechanical Engineering 15(1): 59-66. (In Persian) | چگالی، $kgm^{-3}$                     | $\rho$ |
| [10] Sariman MZ, Hafiz Harun M, Mat Yamin AK, Ahmad F, Yunos MR (2015) Magnetorheological fluid engine mounts: a review on structure design of semi active engine mounting. Int J Mater 2.                                  | محفظه بالایی                          | 1      |
| [11] Elahinia M, Ciocanel C, Nguyen TM, Wang S (2013) MR- and ER-Based semiactive engine mounts: A review. Smart Mater Res 2013.  | بخش ۱ محفظه پایینی                    | 2      |
| [12] Mehrkish A (2013) Vibrational – thermal Analysis and modeling of a new type of multi chamber active engine mount with cooling function, Msc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (in Persian)       | بخش ۲ محفظه پایینی                    | 3      |
| [13] Behzad M, et al. (2000) Monitoring and fault detection in driving machine by vibration analysis. Second Iranian Marine National Conference, Iran.  | فعال                                  | $a$    |
| [14] Mansour H (2010) Design and development of active and semi-active engine mount. Msc. Thesis, Sharif University of Technology, Mashhad, Iran.   | دی‌کاپلر                              | $d$    |
|   | باریکه اینرسی                         | $i$    |
|   | مجرای میانی سیم پیچ                   | $l$    |
|   | غیر فعال                              | $p$    |
|   | خطی                                   | $r$    |
|   | برآیند                                | $T$    |
- ۸- مراجع**
- [1] Mehrkish A, Tahani M, Zare S (2014) Introducing a novel active multi-chamber engine mount with self-cooling capability with an estimation of vibrational parameters. Indian J Sci Res 744-751.