Archive of SID



فصلنامهٔ علمی- پژوهشی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: www.engineresearch.ir

# جداسازی کامل و جزئی حالت‌های ارتعاشی موتور ملی حول محور گشتاور غلتشی

حمید اسفندیاری[۱]، وحید فخاری[۲*]، علی رضا شوشتری[۳]

[۱] دانشگاه بوعلی همدان، همدان، ایران، h. sfandiyari91@basu.ac.ir

[۲] دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، تهران، ایران، v_fakhari@sbu.ac.ir

[۳] دانشگاه بوعلی همدان، همدان، ایران، shooshta@basu.ac.ir

[*] نویسندهٔ مسئول، شمارهٔ تماس: ۰۲۱ -۷۳۹۳۲۷۰۵

## چکیده

موتور خودرو از منابع مهم تولید ارتعاش در خودرو است. از این رو، تعیین مقادیر مناسب سختی، موقعیت و زاویهٔ قرارگیری نگهدارنده‌های آن باعث کاهش ارتعاشات موتور و همچنین کاهش نیروی منتقل شده به شاسی و افزایش آرامش سرنشینان خودرو می‌گردد. در این مقاله، در نظر است که مقادیر مناسب سختی نگهدارنده‌های موتور ملی به منظور بهبود رفتار ارتعاشی آن تعیین گردد. به این منظور، در ابتدا سعی می‌گردد که با استفاده از روش جداسازی کامل حالت‌های ارتعاشی موتور حول محور گشتاور غلتشی، ضرایب مناسب سختی نگهدارنده‌ها تعیین گردند. ولی، محاسبات نشان می‌دهند که امکان دستیابی به جداسازی کامل حالت‌های ارتعاشی تنها با تغییر سختی نگهدارنده‌ها و با توجه به محدودیت‌های طراحی وجود ندارد. از این رو، با استفاده از روش بهینه‌سازی به جداسازی جزئی حالت‌های ارتعاشی موتور حول محور گشتاور غلتشی پرداخته می‌شود. به این منظور، سختی نگهدارنده‌ها به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و با انجام تحلیل حساسیت، تنها متغیرهایی که بیشترین تأثیر را بر تابع هدف دارند، انتخاب می‌گردند. بهینه‌سازی به روش وراثت و با قید مناسب انجام می‌پذیرد. در نهایت، مقایسهٔ نمودارهای پاسخ بسامدی حالت‌های معمول و بهینه نشان می‌دهد که با به کارگیری سختی‌های به دست آمده از بهینه‌سازی، نه تنها ارتعاشات موتور کاهش می‌یابد، بلکه مقدار نیروی منتقل شده به شاسی هم کاهش می‌یابد که به معنای افزایش آرامش سرنشینان خودرو است.

## اطلاعات مقاله

*تاریخچهٔ مقاله:*

دریافت: ۳۰ آذر ۱۳۹۴

پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۳۹۴

*کلیدواژه‌ها:*

نگهدارندهٔ موتور

ارتعاشات

موتور ملّی

بهینه‌سازی

محور گشتاور غلتشی

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

www.SID.ir

Archive of SID



## ۱- مقدمه

امروزه شرکت‌های خودروسازی، در راستای اهداف تحقیقاتی خود، در حال پژوهش برای یافتن راهکارهایی به منظورکاهش هرچه بیشتر ارتعاشات موتور خودرو اند. در این موضوع نگهدارنده‌های موتور (دسته موتورها)[۱] وظیفه کاهش حرکات اضافی موتور و همچنین کاهش ارتعاشات منتقل شده به شاسی را بر عهده دارند.

نگهدارنده‌های کشسانی موتور از سال ۱۹۳۰ تاکنون برای جداسازی ارتعاشات موتور از بدنه خودرو به کار گرفته شده‌اند. این نگهدارنده‌ها حجم کم، قیمت و طول عمر مناسبی دارند و نیازی به تعمیر و نگهداری ندارند. برای سالیان متمادی، نگهدارنده‌های کشسانی به طور موفقیت آمیزی به عنوان نگهدارنده‌های موتور خودرو به کار گرفته شده‌اند.

با پیشرفت‌هایی مانند سبک سازی خودروها، محرک بودن چرخ‌های جلو و همچنین توسعهٔ موتورهایی که در حالت خلاص دور کند دارند، لازم است عملکرد نگهدارنده‌های موتور در کاهش ارتعاشات موتور بیش از پیش بهبود یابد.

از طرفی، یک نگهدارندهٔ آرمانی باید خواص سختی و میرایی وابسته به بسامد و دامنه تحریک داشته باشد. همین امر سبب ایجاد و توسعهٔ نگهدارنده‌های هیدرولیکی شده است. اخیراً به منظور بهبود عملکرد نگهدارنده‌ها در شرایط مختلف کاری موتور، نگهدارنده‌های نیمه‌فعال[۲] و فعال[۳] نیز توسعه داده شده اند.

یکی از راهکارهای بهبود رفتار ارتعاشی موتور بر روی نگهدارنده‌ها این است که ضرایب سختی نگهدارنده‌ها به گونه ای تعیین گردد که حالت‌های ارتعاشی[۴] موتور به طور کامل یا جزئی از یکدیگر مجزا[۵] گردند. از این رو، تاکنون پژوهش‌هایی برای جداسازی حالت‌های ارتعاشی موتور انجام شده است.

جک و پاتون [۱] بیان کردند اگر راستای محور گشتاور غلتشی با راستای یکی از حالت‌های طبیعی ارتعاش منطبق شود، جسم فقط یک چرخش صلب در راستای بردار آن حالت خواهد داشت و پاسخ، صرف‌نظر از بسامد تحریک، چرخش حول محور گشتاور غلتشی خواهد بود.

جئونگ و سینگ [۲] با استفاده از شبیه‌سازی شش درجه آزادی موتور و استفاده از روش جداسازی کامل حالت‌ها حول محور گشتاور غلتشی سختی، موقعیت و زاویهٔ قرارگیری نگهدارنده‌ها را تعیین و پاسخ بسامدی را در حالات مختلف رسم نمودند. سپس، به این نتیجه رسیدند که با جداسازی کامل حالت‌های ارتعاشی موتور حول محور گشتاور غلتشی، رفتار ارتعاشی موتور بهتر خواهد شد.

ونگ [۳] با استفاده از روش بهینه‌سازی، حالت‌های ارتعاشی موتور را حول محور اصلی سامانهٔ نگهدارندهٔ موتور یک خودرو سنگین جداسازی جزئی نمود و سختی و زاویهٔ قرارگیری نگهدارنده‌ها را محاسبه نمود. سپس، نشان داند که با بهتر شدن درصد جداسازی حالت‌ها، شتاب جستن صندلی راننده کاهش یافته است.

سو و همکاران [۴] نشان دادند با بهبود درصد جداسازی حالت‌ها احساس آرامش و راحتی سرنشینان با کاهش شتاب عمودی میل فرمان و کف صندلی خودرو افزایش می‌یابد. ایشان محاسبات را در محدودهٔ دور آرام موتور (۲۰ تا ۳۴ هرتز) انجام دادند.

کلته و همکاران [۵] با شبیه‌سازی سامانهٔ نگهدارندهٔ موتور دیزل تک و سه استوانه در نرم افزار متلب[۶] و استفاده از روش جداسازی حالت‌ها حول محور گشتاور غلتشی، محل قرارگیری و سختی نگهدارنده‌های موتور را محاسبه نمودند.

چن و همکاران [۶] با در نظر گرفتن شبیه‌سازی شش درجه آزادی سامانهٔ نگهدارندهٔ موتوردر نرم‌افزار انسیس[۷] حالت‌های ارتعاشی سامانه را تعیین نمودند. سپس، با تغییر مقادیر سختی و موقعیت نگهدارنده‌ها بالاترین درصد جداسازی حالت‌ها را محاسبه و مقادیر بهینه سختی و موقعیت را تعیین نمودند.

کمار و همکاران [۷] با استفاده از شبیه‌سازی شش درجه‌آزادی سامانهٔ انتقال قدرت و نگهدارنده یک وسیلهٔ سه چرخ الگوی ریاضی ارائه کردند و با ترکیب جدید از متغیرهای طراحی نگهدارنده سامانه نشان دادند که پاسخ ارتعاشات ۴۰ درصد در حالت دور آرام و ۶۰ درصد در محدودهٔ دور کاری موتور نسبت به پیکربندی قبل کاهش پیدا کرده است.

هدف از این مقاله، تعیین مقادیر مناسب سختی نگهدارنده‌های موتور ملی به منظور بهبود رفتار ارتعاشی آن است. به این منظور، ابتدا جداسازی کامل حالت‌های ارتعاشی موتور ملی حول محور گشتاور غلتشی بررسی می‌گردد.

ملاحظه می‌شود که با توجه به محدودیت‌های طراحی از جمله ثابت ماندن موقعیت نگهدارنده‌ها، امکان جداسازی کامل حالت‌های ارتعاشی موتور ملی حول محور گشتاور غلتشی تنها با تغییر سختی نگهدارنده‌ها وجود ندارد. از این رو به کمک روش بهینه‌سازی وراثت، حالت‌های ارتعاشی موتور حول محور گشتاور غلتشی جداسازی جزئی می‌شود.

به این منظور، پس از انتخاب تابع هدف مناسب، با انجام تحلیل حساسیت، متغیرهای تأثیرگذار بهینه‌سازی انتخاب می‌گردند. بهینه‌سازی با روش وراثت و با انتخاب قید و محدودهٔ مناسب تغییرات متغیرهای بهینه‌سازی انجام می‌گردد.

[1] Engine mounts
[2] Semi-active
[3] Active
[4] Vibration modes
[5] Decouple

[6] Matlab
[7] Ansys

www.SID.ir

Archive of SID



در نهایت، نمودارهای پاسخ بسامدی برای جابجایی ها و چرخش‌های موتور و همچنین نیروهای منتقل شده بـه شاسـی بـرای حالـت‌هـای معمول و بهینه مقایسه و بحث شد.

## ۲- نظریهٔ موضوع

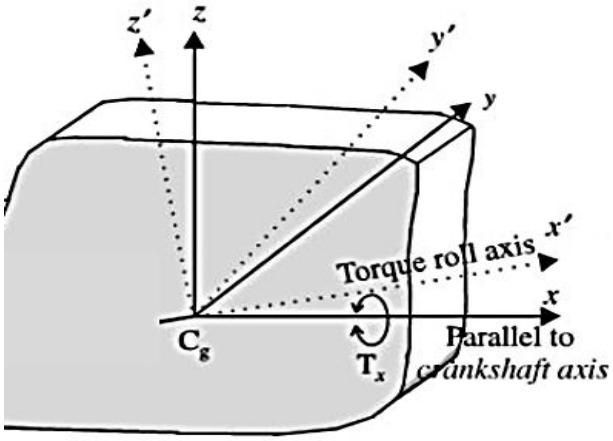
### ۲-۱- جداسازی کامل حالت‌ها حول محور گشتاور غلتشی

اگر به یک جسم صلب آزاد، گشتاوری در جهت دلخواه اعمـال شـود، جسم حول محـوری خـاص چـرخش خـالص دارد کـه بـه آن محـور گشتاور غلتشـی[1] گوینـد [۱]. سـامانهٔ مختصـات هندسـی $(x,y,z)$ و سامانهٔ مختصات حاوی محور گشتاور غلتشی $(x',y',z')$ در شـکل ۱ نشان داده شده است. محور $x'$ نمایانگر محور گشتاور غلتشی است.

در این بخش برای سامانهٔ نگهدارندهٔ موتور ملّـی مقـادیر سـختی بـه گونه‌ای تعیین می‌شود که یکی از شـکل حالـت‌هـای سـامانه، دوران حول محور گشتاور غلتشی باشد. در واقع بـا ایـن کـار بـرای سـامانهٔ نگهدارنده حول محور گشتاور غلتشی جداسازی کامل حالت‌ها صورت می‌گیرد.

خاصیت جداسازی کامل حالت‌های سامانه حول محور گشتاور غلتشی این است که در پاسخ آن سامانه به گشتاور وارده حول محور میل‌لنگ (محور $x$)، تنها آن حالت وجـود خواهـد داشـت و سـایر حالـت‌هـای ارتعاشی در پاسخ اثری نخواهند داشت.

نحوهٔ تعیین موقعیت محور گشتاور غلتشی و همچنین تعیـین ضـرایب سختی نگهدارنده‌ها برای جداسازی کامل حالت‌های سامانهٔ نگهدارنده حول آن محور در ادامه توضیح داده شده است.




شکل ۱: سامانهٔ مختصات هندسی و سامانهٔ مختصات شامل محور گشتاور غلتشی [۲]

### ۲-۲- سامانهٔ نگهدارندهٔ موتور ملّی

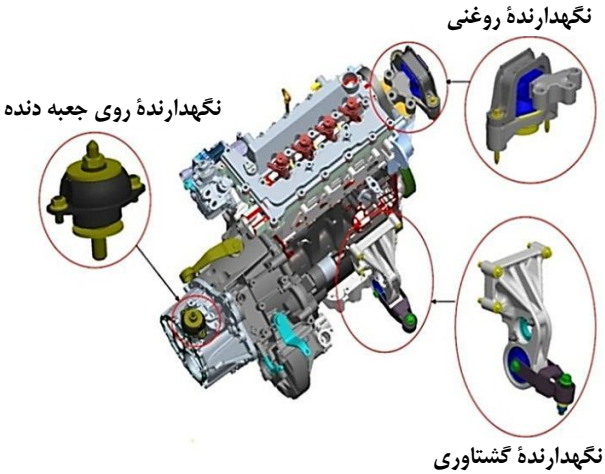
موتور ملّی بر روی سه نگهدارنده قرار دارد. یکی از نگهدارنده‌ها هیدرولیکی و دوتای دیگر کشسانی اند. شکل ۲، نمایی از موتور ملّی همراه با نگهدارنده‌های آن را نمایش می‌دهد. مقادیر جرم، گشتاورهای لختی جرمی و موقعیت نگهدارنده‌های موتور ملی در ضمیمه آمده اند.

### ۲-۳- تعیین ماتریس سختی

ماتریس سختی برای یک موتور که بر روی تعدادی نگهدارنـده قـرار گرفته به صورت معادلهٔ (۱) است [۲].

$$K=\sum_{i=1}^{n}K_i=\sum_{i=1}^{n}\begin{bmatrix}k_{gi} & k_{gi}B_i^T\\ \left(k_{gi}B_i^T\right)^T & B_ik_{gi}B_i^T\end{bmatrix} \quad (۱)$$

که در آن $n$ تعداد نگهدارنده‌های موتور است و $B_i$ با توجه به موقعیت نگهدارنده‌ها به صورت معادلهٔ (۲) تعیین می‌گردد.




شکل ۲: وضعیت قرارگیری نگهدارنده‌ها در موتور ملّی

$$B_i=\begin{bmatrix}0 & -a_{zi} & a_{yi}\\ a_{zi} & 0 & -a_{xi}\\ -a_{yi} & a_{xi} & 0\end{bmatrix} \quad (۲)$$

$a_{zi},a_{yi},a_{xi}$ موقعیت مکانی هر یک از نگهدارنده‌ها نسبت به مرکـز جرم موتور در سه راستا است. همچنین $k_{gi}$ مـاتریس سـختی محلـی نگهدارنده‌ها است.

از آنجا که نگهدارنده‌های موتور ملّی زاویه دار نیستند، ماتریس سختی هر یک تنها در راستاهای انتقالی تعریف می‌شود و سایر مقادیر سختی برابر با صفر است. بنابراین می‌توان نوشت:

$$k_{gi}=\begin{bmatrix}k_{xi} & 0 & 0\\ 0 & k_{yi} & 0\\ 0 & 0 & k_{zi}\end{bmatrix} \quad (۳)$$

### ۲-۴- تعیین ماتریس جرم

ماتریس جرم برای یک موتور که دارای سه نگهدارنـده اسـت، شـامل لختی انتقالی $M_w$ و لختی چرخشی $M_\theta$ است که بترتیب در معادلات (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند. همچنین ماتریس جرم کل سامانه شامل

[1] Torque roll axis(TRA)

www.SID.ir

Archive of SID



موتور و نگهدارنده‌ها به صورت معادلهٔ (۶) در نظر گرفته می‌شود [۲، ۸]:

$$M_w = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$M_\theta = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_w & 0 \\ 0 & M_\theta \end{bmatrix} \quad (۶)$$

که $m$ جرم موتور و $I_{ij}$ گشتاور لختی[1] جرمی موتور است.

## ۲-۵- تعیین راستای محور گشتاور غلتشی

در موتورهای احتراق داخلی گشتاور اصلی وارد شده به سامانه، حول محور میل‌لنگ $(x)$ است. از این رو، گشتاور خارجی تناوبی[2] به صورت $T_x(t) = T_x e^{i\omega t}$ در جهت محور $x$ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین معادله گشتاور به صورت معادلهٔ (۷) خواهد بود [۲]:

$$M_\theta \ddot{\theta}_g(t) + \dot{\theta}_g(t) \times M_\theta \dot{\theta}_g(t) = [T_x \quad 0 \quad 0]^T e^{i\omega t} \quad (۷)$$

که در آن $\dot{\theta}_g(t)$ سرعت زاویه‌ای دستگاه مختصات $(xyz)$ حول مرکز جرم، $M_\theta$ لختی چرخشی و × علامت ضرب خارجی است.

با فرض ارتعاشات خطی، جملهٔ دوم سمت راست معادلهٔ (۷) حذف خواهد شد. به دلیل آنکه تحریک تناوبی است، بنابراین پاسخ نیز به صورت تناوبی فرض می‌شود. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} \theta_g(t) = Ae^{i\omega t} \\ \ddot{\theta}_g(t) = -\omega^2 e^{i\omega t} \end{cases} \quad (۸)$$

با جایگذاری معادلهٔ (۸) در معادلهٔ (۷)، راستای بردار محور گشتاور غلتشی در سامانهٔ شش درجه آزادی موتور ملّی به صورت معادلهٔ (۹) به دست می‌آید. صفر بودن سه سطر اول به علّت عبور راستای محور گشتاور غلتشی از مرکز جرم موتور است.

$$q_{TRA} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.98 \\ 0.079 \\ -0.181 \end{bmatrix} \quad (۹)$$

## ۳- محاسبات

بر اساس مطالب ارائه شده در بخش‌های قبل، اگر راستای یکی از حالت‌های ارتعاشی سامانهٔ همراستای محور گشتاور غلتشی گردد، در پاسخ سامانه فقط اثر آن حالت دیده می‌شود و بقیه حالت‌ها اثری در پاسخ نخواهند داشت که این امر بیانگر جداسازی کامل حالت‌های ارتعاشی حول محور گشتاور غلتشی است.

به بیان ریاضی، با برقراری معادلهٔ (۱۰) بردار محور گشتاور غلتشی یکی از شکل حالت‌های سامانه خواهد بود [۱۱، ۲]. بنابراین، به منظور دستیابی به جداسازی کامل حالت‌های ارتعاشی حول محور گشتاور غلتشی، مقادیر سختی نگهدارنده‌ها باید به گونه‌ای تعیین شوند که معادلهٔ (۱۰) برقرار گردد.

$$Kq_{TRA} = \omega^2 M q_{TRA} \quad (۱۰)$$

که در آن، $K$ ماتریس سختی (معادلهٔ (۱)) و $q_{TRA}$ بردار محور گشتاور غلتشی (معادلهٔ (۹)) و $M$ ماتریس جرم (معادلهٔ (۶)) اند. همچنین، بسامد طبیعی سامانه به ازای حالت محور گشتاور غلتشی است که برای جلوگیری از پدیدهٔ تشدید در شرایط کاری موتور باید کمتر از ۱۰۰ رادیان بر ثانیه (حدود ۱۶ هرتز) باشد. (بسامد کاری موتور بالاتر از حدود ۱۲۵ رادیان بر ثانیه یعنی ۲۰ هرتز است).

با جایگذاری ماتریس جرم (معادلهٔ (۶)) در معادلهٔ (۱۰)، ۶ معادله با ۹ مجهول (مقادیر سختی نگهدارنده‌ها) به دست می‌آید. ۶ معادله و ۹ مجهول جواب‌های بیشماری دارد، اما با جایگذاری متغیر یک سختی‌ها مشخص شد که در هر صورت حداقل یکی از سختی‌های نگهدارنده منفی است.

در واقع در صورتی جداسازی کامل صورت می‌گیرد که یکی از سختی‌ها منفی باشد که واقعیت فیزیکی ندارد. به عبارت دیگر، تنها با تغییر در سختی‌های موجود نمی‌توان برای سامانهٔ نگهدارندهٔ موتور ملّی به جداسازی کامل حالت‌ها حول محور گشتاور غلتشی دست یافت.

با تغییر در محل نگهدارنده‌ها (معادلهٔ ۲) امکان دسترسی به جداسازی کامل امکان پذیر است، امّا به دلیل محدودیت‌های جانمایی و عدم صرفهٔ اقتصادی برای تغییر احتمالی در شاسی خودرو، امکان تغییر در محل نگهدارنده‌ها وجود ندارد.

## ۳-۱- جداسازی جزئی حالت‌ها حول محور گشتاور غلتشی

همان طور که در بخش قبل مشاهده شد، برای سامانهٔ نگهدارندهٔ موتور ملّی امکان جداسازی کامل حالت‌ها حول محور گشتاور غلتشی وجود ندارد. از این رو، باید با تعیین مقادیر مناسب سختی نگهدارنده‌ها، حتی الامکان یکی از حالت‌ها را به محور گشتاور غلتشی نزدیک نمود (جداسازی جزئی حالت‌ها حول محور گشتاور غلتشی). به این منظور از روش‌های بهینه‌سازی استفاده می‌گردد.

در این بخش، ابتدا مفهوم درصد جداسازی حالت‌ها ارائه و سپس تابع هدف مورد نظر که برای بهینه‌سازی درصد جداسازی معرفی شد. با

[1] Inertia moment
[2] Harmonic

www.SID.ir

Archive of SID



استفاده از تابع هدف، حالت بهینه ایجاد شده که با رسم پاسخ بسامدی، حالت بهینه با حالت معمول مقایسه می‌گردد.

## ۳-۲- توزیع انرژی جنبشی حالت‌ها و حالت بهینه

برای مشخص شدن درصد جداشدن حالت‌ها از یکدیگر باید توزیع انرژی جنبشی حالت‌ها را محاسبه نمود. در واقع ماتریس ارتعاشی[1] با استفاده از معادلهٔ (۱۱)، به یک ماتریس دیگر به نام ماتریس انرژی جنبشی حالت‌ها تبدیل می‌شود که هر یک از مؤلفه‌های آن نسبت مقدار درصد انرژی جنبشی هر یک از درجات آزادی به کل انرژی جنبشی آن حالت را تشکیل می‌دهد که بیانگر مقدار درصد مشارکت آن مؤلفه در حالت مورد نظر است. توزیع انرژی جنبشی حالت‌ها به طور معمول، درصد جداسازی تعریف می‌شود و برای سامانهٔ شش درجه آزادی بدین صورت محاسبه می‌گردد [۹، ۱۰].

$$E(n,i)=\varphi_{ni}\sum_{l=1}^{6} m_{nl}\varphi_{li}\Big/\varphi_i^T M\varphi_i \qquad (۱۱)$$

که $m$ ماتریس جرم و $\varphi=[\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4 \quad \varphi_5 \quad \varphi_6]^T$ ماتریس ۶ در ۶ حالت‌ها است که $\varphi_i$ نشان‌دهندهٔ بردار هریک از حالت‌ها است. $\varphi_{ni}$ نیز نشان دهنده‌ی عضو سطر n‌ام و ستون i‌ام ماتریس حالت‌ها و $m_{nl}$ نشان دهنده‌ی عضو سطر n‌ام و ستون $l$‌ام ماتریس جرم و $E(n,i)$ عضو سطر n‌ام و ستون i‌ام ماتریس توزیع انرژی جنبشی حالت‌ها است.

برای نشان دادن درصد جداسازی حول محور گشتاور غلتشی باید ماتریس‌های سختی و جرم را در مختصاتی که یکی از محورهای آن محور گشتاور غلتشی است، محاسبه نمود.

مختصات مورد نظر منحصر بفرد نیست. در واقع با پیدا کردن دو بردار عمود بر محور گشتاور غلتشی این مختصات تعیین می‌شود. ماتریس‌های جرم و سختی در مختصات محور گشتاور غلتشی ( $M'$ و $K'$) با استفاده از معادلهٔ (۱۲) دست می‌آیند:

$$\begin{cases} M'=RMR^T \\ K'=RKR^T \end{cases} \qquad (۱۲)$$

که در آن $M$ و $K$ بترتیب ماتریس‌های جرم و سختی در مختصات هندسی اند. همچنین، $R$ بردار انتقال از مختصات هندسی به مختصات محور گشتاور غلتشی است.

با استفاده از معادلهٔ (۱۲)، ماتریس‌های جرم و سختی در مختصات محور گشتاور غلتشی محاسبه می‌شوند. با استفاده از این مقادیر و همچنین استفاده از برنامهٔ نوشته شده در نرم افزار متلب، بسامدهای طبیعی و شکل حالت‌های سامانه (ماتریس $\varphi'$) در مختصات محور گشتاور غلتشی محاسبه می‌شوند.

ماتریس توزیع انرژی جنبشی حالت‌ها در مختصات محور گشتاور غلتشی با استفاده از معادلهٔ (۱۲) محاسبه و در معادلهٔ (۱۳) نشان داده شده است.

$$\begin{bmatrix} E_{x'i} \\ E_{y'i} \\ E_{z'i} \\ E_{\theta x'i} \\ E_{\theta y'i} \\ E'_{\theta z}i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.72 & 0.039 & 3.09 & 4.95 & 90.58 & 0.63 \\ 0.32 & 0.29 & 1.41 & 4.57 & 0.02 & 93.39 \\ 2.41 & 2.22 & 18.28 & 63.64 & 7.55 & 5.91 \\ 30.1 & 22.87 & 25.74 & 20.99 & 0.25 & 0.04 \\ 2.32 & 70.64 & 24.85 & 2.12 & 0.07 & 0.01 \\ 64.13 & 3.94 & 26.63 & 3.73 & 1.53 & 0.03 \end{bmatrix} \qquad (۱۳)$$

با توجه به مقادیر مؤلفه‌های این ماتریس، می‌توان مشاهده نمود که مجموع درایه‌های هر ستون از ماتریس برابر ۱۰۰ (درصد انرژی جنبشی کل هر حالت) است. همچنین، مؤلفه‌های هر ستون، درصد مشارکت هر راستا در حالت مورد نظر را نشان می‌دهند.

تابع هدف مورد نظر بیشینه درصد جداسازی حالت‌ها حول محور گشتاور غلتشی است که بالاترین مقدار در سطر چهارم ماتریس معادلهٔ (۱۳) است. در واقع، هدف از بهینه‌سازی، بیشینه نمودن درصد جداسازی مذکور است. بالاترین مقدار درصد جداسازی حالت‌ها حول محور گشتاور غلتشی در حالت معمول با توجه به معادلهٔ (۱۳)، ۳۰,۱ درصد است که در حالت بهینه سختی‌ها باید به گونه‌ای تعیین شوند که این مقدار را بیشینه نمایند.

## ۳-۳- تحلیل حساسیت

برای آنکه بهینه‌سازی بهتر و سریعتر به جواب برسد، تحلیل حساسیت برای متغیرهای ورودی که همان سختی نگهدارنده‌ها در ۳ راستای مختلف موتور است، انجام می‌گیرد. سختی نگهدارنده‌های موتور ملّی به صورت جدول ۱ است که برای هر نگهدارنده سه سختی در هر سه راستا در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: سختی‌های در نظر گرفته شده برای نگهدارنده‌ها

| نگهدارنده | $k_x$ | $k_y$ | $k_z$ |
|---|---|---|---|
| نگهدارندهٔ هیدرولیکی | $k_1$ | $k_2$ | $k_3$ |
| نگهدارندهٔ گشتاوری | $k_4$ | $k_5$ | $k_6$ |
| نگهدارندهٔ روی جعبه دنده | $k_7$ | $k_8$ | $k_9$ |

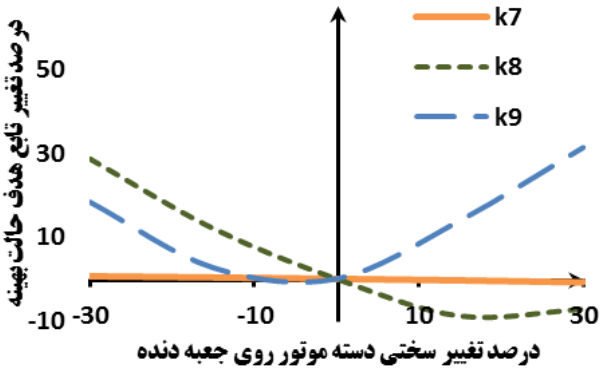
[1] Modal matrix

www.SID.ir

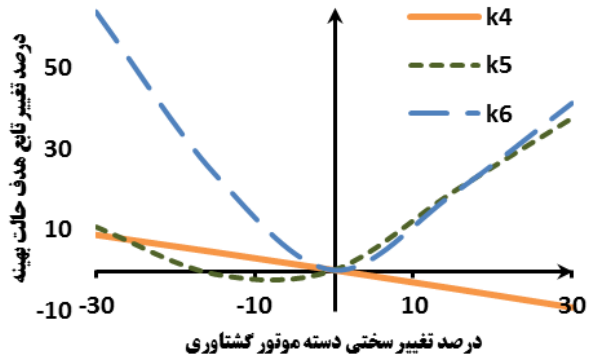
Archive of SID



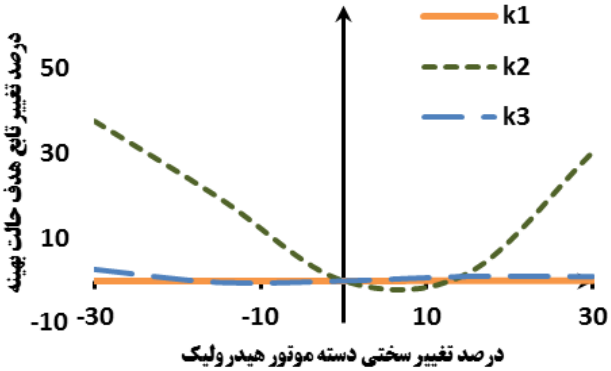
اشکال ۳ تا ۵ بترتیب تأثیر تغییرات سختی نگهدارندهٔ هیدرولیکی، نگهدارنده گشتاوری و نگهدارندهٔ روی جعبه دنده را بر تابع هدف نمایش می‌دهند. نتایج به دست آمده از بررسی اشکال ۳ تا ۵ در جدول ۲ نشان داده شده است.




شکل ۳: تأثیر نگهدارندهٔ هیدرولیکی بر تابع هدف




شکل ۴: تأثیر نگهدارندهٔ گشتاوری بر تابع هدف




شکل ۵: تأثیر نگهدارندهٔ روی جعبه دنده بر تابع هدف

جدول ۲: نتایج حاصل از تحلیل حساسیت

| متغیرهای با تأثیر کم | متغیرهای با تأثیر زیاد |
|---|---|
| $k_1, k_3, k_7$ | $k_2, k_4, k_5, k_6, k_8, k_9$ |

## ۴- بهینه‌سازی

در این پژوهش، به منظور انجام بهینه‌سازی از نرم‌افزار مدفرانتیر[1] استفاده شده است و برنامهٔ نوشته شده در نرم‌افزار متلب به نرم افزار مذکور وصل شده است. با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده در بخش قبل، تنها سختی‌های $k_1$ ، $k_3$ و $k_7$ به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند و محدودهٔ تغییرات آن ها برای انجام بهینه‌سازی، سی درصد بزرگتر و سی درصد کوچک‌تر از مقدار موجود در نظر گرفته می‌شود.

روش مورد استفاده در بهینه‌سازی، روش وراثت[2] است. بسامدهای طبیعی سامانه باید به گونه‌ای باشد که از محدودهٔ ۲۰ هرتز بزرگتر نشوند. زیرا این امر باعث ایجاد تشدید در سرعت کاری موتور می‌گردد. قرار داشتن بسامدهای طبیعی موتور بر روی نگهدارنده‌ها در محدودهٔ مذکور، به عنوان قید بهینه‌سازی اعمال می‌گردد. ماتریس توزیع انرژی جنبشی حالت‌ها در مختصات محور گشتاور غلتشی بعد از انجام بهینه‌سازی بدین صورت است:

$$\begin{bmatrix} E_{x'i} \\ E_{y'i} \\ E_{z'i} \\ E_{\theta x'i} \\ E_{\theta y'i} \\ E'_{\theta z}i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.26 & 1.85 & 0.69 & 18.31 & 76.19 & 1.69 \\ 2.71 & 0.84 & 0.07 & 80.22 & 16.16 & 0 \\ 1.8 & 2.38 & 22.48 & 0.43 & 2.1 & 70.81 \\ 3.4 & 3.68 & 71.39 & 0 & 0.19 & 21.34 \\ 33.59 & 61.82 & 0.26 & 0.07 & 0 & 4.27 \\ 57.25 & 29.43 & 5.11 & 0.97 & 5.36 & 1.89 \end{bmatrix} \quad (۱۴)$$

با توجه به معادلات (۱۳) و (۱۴) و مقایسهٔ آن ها ملاحظه می‌شود که بالاترین مقدار درصد جداسازی حالت‌ها حول محور گشتاور غلتشی در حالت معمول برابر با ۳۰,۱ درصد و در حالت بهینه برابر با ۷۱,۳۹ درصد است که نشان می‌دهد با انجام بهینه‌سازی، تابع هدف نسبت به حالت معمول تقریباً ۲,۵ برابر شده است.

سختی‌های بهینه به دست آمده از بهینه‌سازی در نرم افزار مدفرانتیر در جدول ۳ نشان داده شده اند.

بعد از تعیین مقادیر سختی بهینه، به منظور ارزیابی مقدار بهبود رفتار ارتعاشی موتور بر روی نگهدارنده‌ها نمودارهای پاسخ بسامدی سامانه به ازای ورودی واحد گشتاور حول محور میل‌لنگ برای حالت‌های بهینه و معمول استخراج و مقایسه شد.

نمودارهای پاسخ بسامدی برای مقدار جابه‌جایی مرکز جرم در سه راستای $(x, y, z)$ و چرخش موتور در سه راستا $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ و

[1] Mode frontier
[2] Genetic Algorithm

www.SID.ir

Archive of SID



همچنین نیروهای منتقل شده در محل نگهدارنده‌ها به شاسی در هر سه راستا $(F_x, F_y, F_z)$ استخراج می‌گردند.

در واقع، نمودارهای پاسخ بسامدی جابه‌جایی و چرخش موتور نمایانگر مقدار ارتعاشات موتور و نمودارهای پاسخ بسامدی نیروی منتقل شده به شاسی معیاری از ارتعاشات منتقل شده به شاسی و سرنشینان اند.

جدول ۳: مقادیر سختی بهینه نگهدارنده‌ها

| سختی بهینه | متغیر | سختی بهینه | متغیر |
|---|---|---|---|
| ۱۸۴۰۰۰ | $k_۶$ | ۸۵۰۰۰ | $k_۱^*$ |
| ۳۱۳۰۰۰ | $k_۷^*$ | ۲۴۷۰۰۰ | $k_۲$ |
| ۱۵۸۰۰۰ | $k_۸$ | ۱۲۰۰۰۰ | $k_۳^*$ |
| ۲۸۶۰۰۰ | $k_۹$ | ۱۲۰۰۰۰ | $k_۴$ |
| | | ۱۷۹۰۰۰ | $k_۵$ |

بیشینه درصد جداسازی حول محور گشتاور غلتشی ۷۱,۴ درصد است.

* متغیر با تأثیر کم (از مقدار موجود استفاده شده است. )

## ۵- نتایج و تحلیل ها

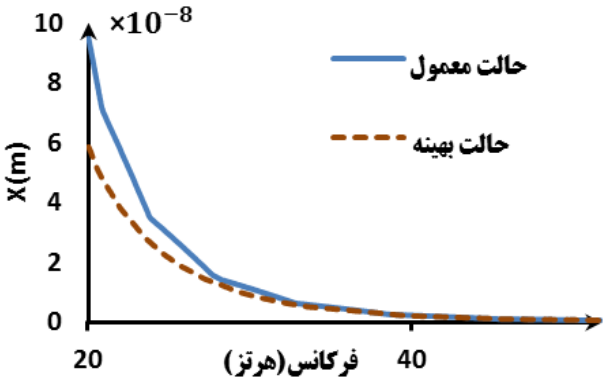
شکل‌های ۶ تا ۱۱ نمودارهای پاسخ بسامدی جابه‌جایی مرکز جرم در سه راستا و چرخش موتور حول سه محور در محل مرکز جرم موتور را نشان می‌دهند. محدودهٔ بسامدی در نظر گرفته شده در این نمودارها بین ۲۰ تا ۶۰ هرتز است.

از آنجا که بسامد ارتعاشی تحریک موتور از حدود ۲۰ هرتز شروع می‌شود، این مقدار به عنوان محدودهٔ پایین نمودارها درنظر گرفته شده است. دلیل انتخاب بسامد ۶۰ هرتز به عنوان محدوده بالا، منطبق شدن نمودارهای حالت بهینه و حالت معمول در بسامدهای بالاتر از ۶۰ هرتز است.

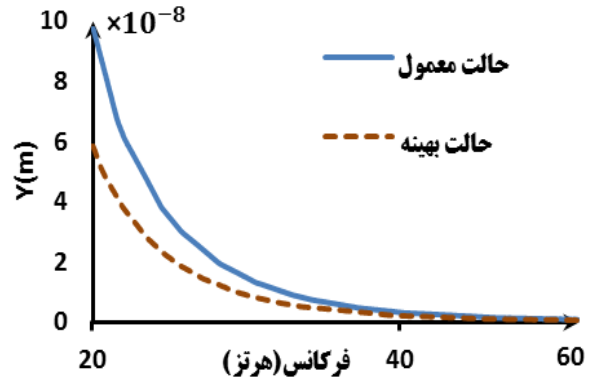
شکل‌های ۱۲ تا ۱۴نیز نمودارهای پاسخ بسامدی برآیند نیروهای منتقل شده به شاسی از طرف هر سه نگهدارنده در سه راستا را نمایش می‌دهند.

با توجه به نمودارهای پاسخ بسامدی، ملاحظه می‌شود که جابه‌جایی مرکز جرم موتور در سه راستا و همچنین چرخش موتور حول سه محور در حالت بهینه نسبت به حالت معمول کاهش پیدا کرده است که این امر نمایانگر کاهش ارتعاشات و حرکات اضافی موتور است و در افزایش عمر موتور و نگهدارنده‌های آن مؤثر است.

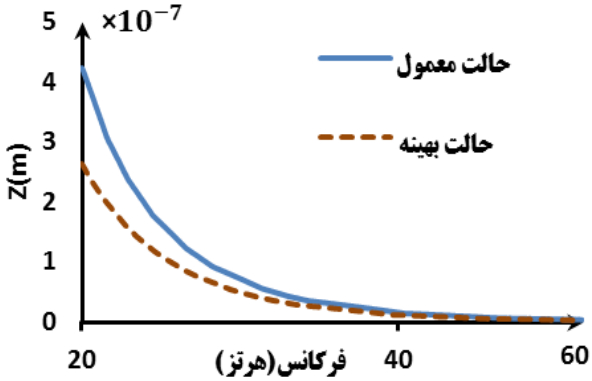
همچنین، در حالت بهینه، نیروی منتقل شده از موتور به شاسی در محل نگهدارنده‌ها نیز کاهش پیدا کرده است که این امر به معنای کاهش ارتعاشات منتقل شده به شاسی و در نتیجه افزایش آرامش سرنشینان خودرو است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که روش جداسازی جزئی حالت‌ها حول محور گشتاور غلتشی برای سامانهٔ نگهدارندهٔ موتور ملی باعث بهبود رفتار ارتعاشی موتور ملی بر روی نگهدارنده‌های آن می‌گردد.




شکل ۶: پاسخ بسامدی جابه‌جایی مرکز جرم در راستای محور x به ازاء ورودی گشتاور واحد




شکل ۷: پاسخ بسامدی جابه‌جایی مرکز جرم در راستای محور y به ازاء ورودی گشتاور واحد

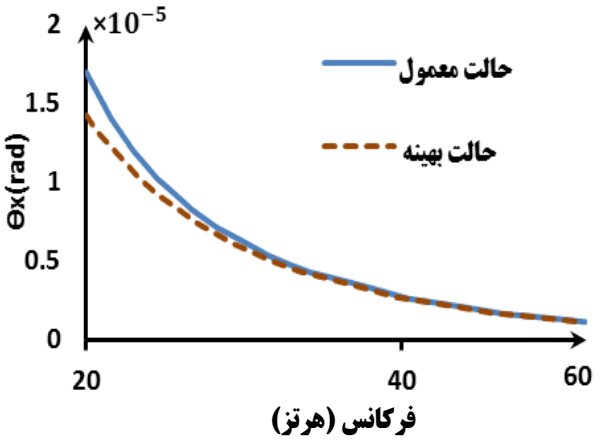



شکل ۸: پاسخ بسامدی جابه‌جایی مرکز جرم در راستای محور z به ازای ورودی گشتاور واحد

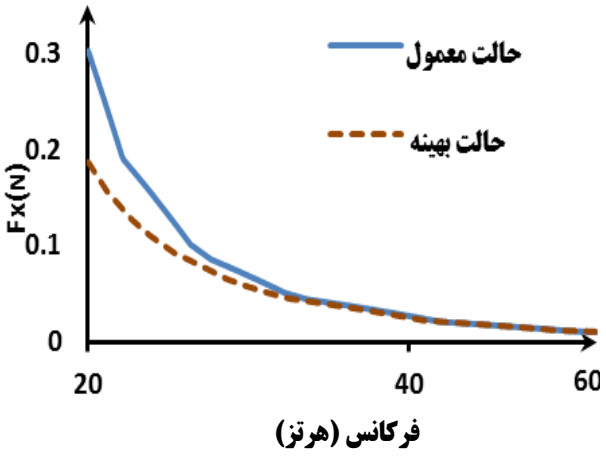
www.SID.ir

Archive of SID

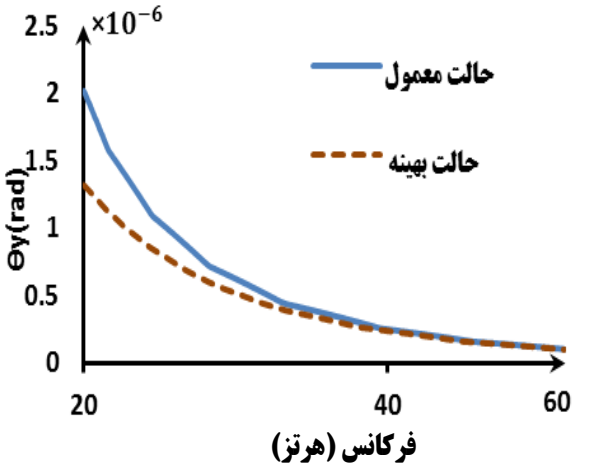




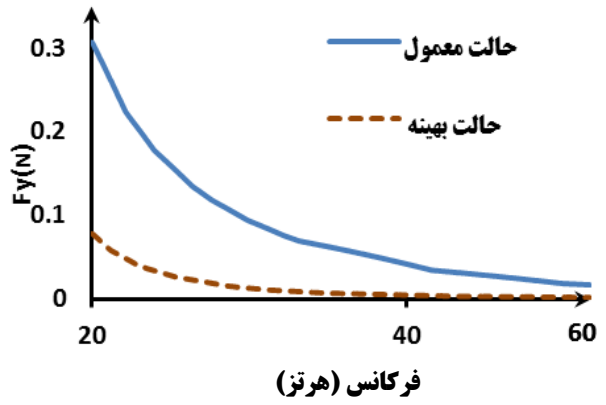

شکل ۹: پاسخ بسامدی چرخش موتور حول محور x به ازای ورودی گشتاور واحد



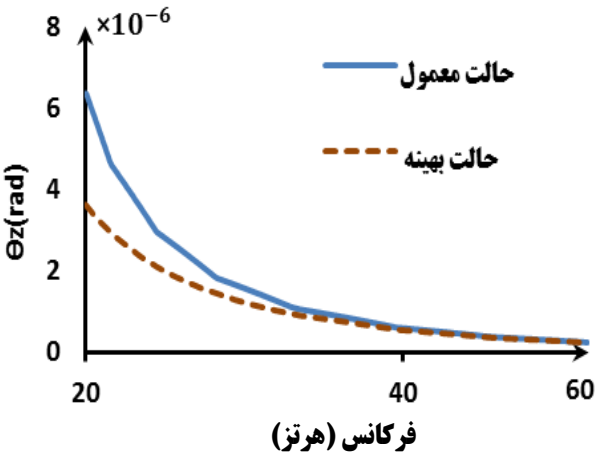

شکل ۱۲: پاسخ بسامدی برآیند نیروهای منتقل شده به شاسی در راستای محور x به ازای ورودی گشتاور واحد



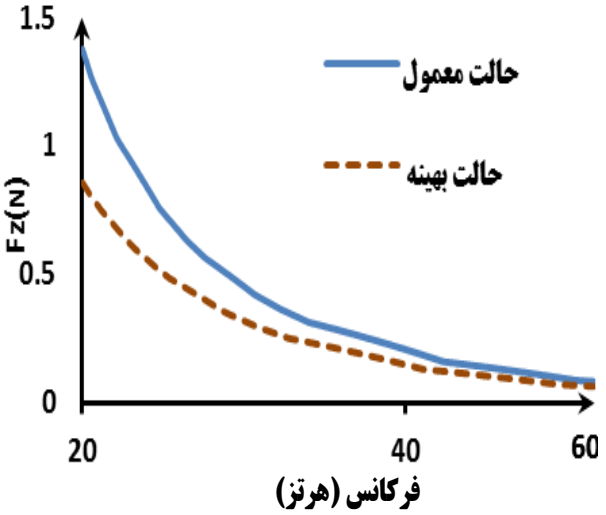

شکل ۱۰: پاسخ بسامدی چرخش موتور حول محور y به ازای ورودی گشتاور واحد




شکل ۱۳: پاسخ بسامدی برآیند نیروهای منتقل شده به شاسی در راستای محور y به ازای ورودی گشتاور واحد




شکل ۱۱: پاسخ بسامدی چرخش موتور حول محور z به ازای ورودی گشتاور واحد




شکل ۱۴: پاسخ بسامدی برآیند نیروهای منتقل شده به شاسی در راستای محور z به ازای ورودی گشتاور واحد

www.SID.ir

Archive of SID



## ۶- نتیجه‌گیری

مشخص شد که تنها با تغییر سختی نگهدارنده‌ها امکان جداسازی کامل حالت‌های ارتعاشی حول محور گشتاور غلتشی وجود ندارد.
از این رو، به جداسازی جزئی حالت‌های ارتعاشی حول محور مذکور با استفاده از روش بهینه‌سازی پرداخته شد.
با مقایسهٔ نمودارهای پاسخ بسامدی برای حالت معمول و بهینه، مشاهده شد که با به کارگیری سختی‌های بهینه به دست آمده نه تنها ارتعاشات موتور کاهش می‌یابد، بلکه ارتعاشات منتقل شده به شاسی هم کاهش می‌یابد که به معنای راحتی بیشتر سرنشینان خودرو است.
بنابراین، در مواردی که امکان جداسازی کامل حالت‌های ارتعاشی وجود ندارد، جداسازی جزئی حالت‌ها نیز باعث بهبود رفتار ارتعاشی موتور می‌گردد. در ضمن، بهینه‌سازی حالت‌ها حول محور گشتاور غلتشی تابع هدف مناسبی به منظور بهبود رفتار ارتعاشی سامانهٔ نگهدارندهٔ موتور است.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) برای تامین اطلاعات مورد نیاز این پژوهش مربوط به موتور ملی شامل اطلاعات جداول ضمیمه و شکل ۲، مراتب تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌نمایند.

## پیوست

مقادیر سختی نگهدارنده‌های موتور ملّی

| نوع نگهدارنده | $k_x(\times 10^3)$ | $k_y(\times 10^3)$ | $k_z\ (\times 10^3)$ |
|---|---|---|---|
| هیدرولیکی | $k_1 = 85$ | $k_2 = 190$ | $k_3 = 120$ |
| گشتاوری | $k_4 = 92$ | $k_5 = 233$ | $k_6 = 261$ |
| روی جعبه دنده | $k_7 = 31$ | $k_8 = 225$ | $k_9 = 220$ |

موقعیت نگهدارنده‌ها نسبت به مرکز جرم

| نوع نگهدارنده | $a_x(m)$ | $a_y(m)$ | $a_z(m)$ |
|---|---|---|---|
| هیدرولیکی | -۰,۴۰۵ | -۰,۰۲ | -۰,۱۸۷ |
| گشتاوری | -۰,۱۳۳ | ۰,۲۱۶ | -۰,۲۵۲ |
| روی جعبه دنده | ۰,۴۵۲ | ۰,۰۵۹ | ۰,۰۵ |

مقادیر گشتاور لختی جرمی و جرم موتور

| $I_{xx}$ | $I_{yy}$ | $I_{zz}$ | $I_{xy}$ | $I_{yz}$ | $I_{xz}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| ۶,۸۴ | ۱۲,۵ | ۱۰,۵ | ۱,۰۵ | ۰,۲۶۱ | -۱,۹۶ |

واحد $kg.m^2$ است. وزن موتور ملّی ۲۰۴,۰۱۵ کیلوگرم است.

## مراجع و منابع

[1] P. E. Geck, R. Patton, Front wheel drive engine mount optimization, SAE Technical Paper 840736, 1984
[2] T. Jeong, R. Singh, Analytical methods of decoupling the automotive engine torque roll axis, Journal of Sound and Vibration, 234, 85-114, 2000
[3] J. Weng, Robust optimization design of the power-train mounting system of the light truck, SAE Technical Paper 07010556, 2007
[4] M. Suh, M. Shim, M. Kim, and S. Hong, Multidisciplinary design optimization of engine mounts with consideration of the driveline, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 217, 107-114, 2003
[5] S. Kolte, D. Neihguk, A. Prasad, S. Rawte, A particle swarm optimization tool for decoupling automotive powertrain torque roll axis, SAE Technical Paper 14011687, 2014
[6] S. Chen, Q. Wei1, J. Huang1, G. Yin, Z. Li, An equivalent model for modal analysis of engine mounting system, 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 1128-1132, 2012
[8] J. L. Meriam, and L. G. Kraige, Engineering Mechanics, Dynamics, 5th Edn, John Wiley and Sons, Inc, 2002
[9] G. R. Parker, T. L. Rose, J. J Brown, Kinetic energy calculation as an aid to instrumentation location in modal testing, in MSC World Users Conference, 1990
[10] M. Wamsler, T. Rose, Advanced mode shape identification method for automotive application via modal kinetic energy plots assisted by numerous printed outputs, in Proceedings of the MSC-Americas users' conference, Universal City, California, 1998
[11] A. Akanda, C. Adulla, Engine mount tuning for optimal idle and road shake response of rear-wheel-drive vehicles. SAE Technical Paper, 2005

www.SID.ir

Archive of SID


The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineresearch.ir

# Complete and partial vibration mode decoupling of national engine about torque roll axis

H. Esfandiyari[1], V. Fakhari[2*], A. Shooshtari[3]

[1] *Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, h. sfandiyari91@basu.ac.ir*
[2] *Shahid Beheshti University, A. C. , Tehran, Iran, v_fakhari@sbu.ac.ir*
[3] *Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, shooshta@basu.ac.ir*
[*] *Corresponding Author, Telephone Number: +98-2173932705*

ARTICLE INFO

*Article history:*
Received: 20 December 2015
Accepted: 17 February 2016

*Keywords:*
Engine mount
Vibration
National engine
Optimization
Torque roll axis

ABSTRACT

Internal combustion engine is one of the vibration sources in an automotive. In this study, proper stiffnesses for engine mounts of national engine are determined to improve its vibration behavior. At first, complete mode decoupling about torque roll axis is considered. However, the results show that complete decoupling is impossible. Therefore, partial mode decoupling is performed about torque roll axis. In this regard, an optimization problem is solved to achieve maximum percentage of mode decoupling about the mentioned axis. Finally, frequency response diagrams for displacement and rotation of engine, as well as, for transmitted force to the chassis are presented for nominal and optimized stiffnesses. The obtained results show that the engine movements and transmitted force to the chassis are reduced and therefore vibration behavior of the engine mounting system is improved by employing the mentioned partial mode decoupling.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.

www.SID.ir