مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات، تابستان ۱۳۹۷، دوره ۹، شماره ۲، ص‌ص ۲۰-۲۵

فصلنامه

مهندسی مکانیک و ارتعاشات

jvibme.semnaniau.ac.ir

تحلیل ارتعاشی پوسته جعبه دنده ماشین سنگین با استفاده از روش اجزا محدود

حسام تراب زاده کاشی[۱]، محسن مردانی[۲*]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، **دانشکده فنی دانشگاه تهران**، تهران

۲- استادیار، **سازمان جهاددانشگاهی صنعتی شریف**، تهران

* تهران، صندوق پستی۶۸۶- ۱۳۴۴۵ ، Mardani@jdsharif.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۳ فروردین ۱۳۹۷

پذیرش: ۳۱ خرداد ۱۳۹۷

ارائه در سایت: ۱۵ مرداد ۱۳۹۷

کلیدواژگان

تحلیل ارتعاشی

روش اجزا محدود

پوسته جعبه دنده

ماشین سنگین

خواص مواد

چکیده

در این این مقاله بررسی تاثیر خواص مواد مختلف بر روی فرکانسهای طبیعی و شکل مود ارتعاشی پوسته دیفرانسیل نوعی ماشین سنگین مورد بررسی قرار گرفته است. خواص مکانیکی مواد مختلف نقش بسزایی در تعیین فرکانسهای خروجی و تغییر شکلهای ارتعاشی در یک سیستم ایفا میکنند. به این منظور در نرم افزار طراحی CATIA مدل دیفرانسیل ایجاد و به نرم افزار شبیه ساز ABAQUS وارد شده است که قابلیت بالایی در تخمین رفتار دینامیکی سیستم‌های مختلف دارد. موادی نظیر چدن خاکستری با قابلیت جذب ارتعاش بالا، فولاد با چگالی و صلبیت زیاد و آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم با چگالی پایین برای پوسته دیفرانسیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج بررسی نشان داد که محدوده فرکانس طبیعی پنج مود اول ارتعاشی در این مواد با یکدیگر متفاوت و انتخاب چدن خاکستری می‌تواند ضمن کاهش ارتعاش از ایجاد پدیده تشدید جلوگیری نماید. بخش دیگری از شبیه‌سازی عددی به بررسی تاثیر نوع اتصال بین دو قسمت دیفرانسیل بر روی رفتار دینامیکی اختصاص یافته است. به این منظور یکی از پیچ‌های اتصال دو قسمت دیفرانسیل به صورت محکم نشده در نرم افزار وارد شد، عیبی که ممکن است در هنگام تعمیرات توسط اپراتور ایجاد شود. نتایج شبیه‌سازی عددی حاکی از اینست که با محکم نکردن تنها یکی از پیچ‌های اتصال، فرکانس‌های طبیعی حدود ۳ تا ۴ درصد کاهش می‌یابد که این امر می‌تواند احتمال ایجاد پدیده تشدید را افزایش دهد..

Vibration analysis of heavy machine gearbox housing using Finite Element Method

Hessam Torabzadeh Kashi[1], Mohsen Mardani[2*]

1- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran.

2- Sharif University of Technology branch of ACECR(Academic Center for Education, Culture and Research), Tehran, Iran.

* P.O.B. 686- 13445 Tehran, Iran, Mardani@jdsharif.ac.ir.

Article Information

Original Research Paper

Received 12 April 2018

Accepted 13 June 2018

Available Online 6 August 2018

Keywords

Vibration Analysis

Finite Element Method

Gearbox Housing, Heavy Machine

Properties of Materials

ABSTRACT

In this paper the influence of various properties of materials on the natural frequencies and vibration mode shapes in a differential casing for the heavy car is studied. Mechanical properties play an important role in determining the output frequencies and vibrational deformations. For this purpose, the differential model was designed in software CATIA and entered in simulation software ABAQUS which has the high ability to estimate the dynamic behavior of different systems. Materials such as gray cast iron with high vibration damping, steel with high density and rigidity, aluminum and magnesium alloys with low density were evaluated for the differential casing. The results showed that the natural frequency of the first five vibrational modes differ in the materials and by choosing gray cast iron can prevent a resonance phenomenon. Another part of the numerical simulation is dedicated to the effect of connection type between two parts of differential on the dynamic behavior. For this purpose, one of the screws for connecting the two parts of the differential was not secure, a defect that may be caused

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Hessam Torabzadeh Kashi, Mohsen Mardani, Vibration analysis of heavy machine gearbox housing using Finite Element Method, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 9, No. 2, pp. 20-25, 2018 (In Persian)

by an operator when repairs. For one bolt loosened condition natural frequency decreases about 3 to 4 percent. This can increase the chance of a resonance effect.

۱- مقدمه

کاهش ارتعاشات و لرزش در اتومبیل‌ها یکی از اهداف مهم مهندسان در شرکت‌های تولید خودرو محسوب می‌شود. این موضوع در ماشین‌آلات سنگین به علت افزایش قدرت انتقالی و نیروهای وارده از اهمیت بیشتری برخوردار است. تحقیقی مفید جهت شناخت عوامل ارتعاش و روش‌های کاهش آن در جعبه دنده‌ها توسط توما انجام شده است[۱]. عوامل زیادی از قبیل خطای انتقال در چرخدنده‌ها، اصطکاک بیش از حد و گشتاور خمشی باعث ارتعاش و لرزش و درنهایت خرابی جعبه دنده‌ها می‌شود[۲]. تیموثی و همکاران بر روی منشا ایجاد ارتعاش تحقیق گسترده‌ای انجام دادند که در این تحقیقات تاثیر سطح تماس جاده بر روی ارتعاشات مورد بررسی قرار گرفته است[۳]. پژوهشی در جهت تحلیل تئوری و عملی پاسخ فرکانسی جعبه دنده خودرو انجام گرفته که اطلاعات مفیدی از تاثیرات خواص فیزیکی بدست می‌دهد[۴]. فوجین و همکاران بر روی جعبه دنده تحقیقاتی انجام دادند تا بتوانند ساختاری بهینه جهت کاهش ارتعاشات طراحی نمایند[۵]. بخشی از ارتعاشات اضافی در ماشین‌آلات به جنس مورد استفاده در پوسته جعبه‌دنده و طریقه قید و بند آن مرتبط می‌شود. جنس‌های متنوعی جهت میرایی و حذف ارتعاشات در جعبه دنده‌ها معرفی شده است [۶, ۷] که با توجه به شرایط باید جنس مورد نظر استفاده شود. وجود شوک در انتقال قدرت عامل بسیار مهمی در ایجاد ارتعاشات ضربه‌ای است که عامل تخریب پوسته جعبه‌دنده محسوب می‌شود[۸, ۹].

کومار و همکاران تاثیر مواد مختلف بر روی فرکانس طبیعی نوعی از جعبه دنده را بررسی کرده‌اند و بازه تغییرات فرکانس ارتعاشی را بدست آورده‌اند[۱۰]. شبیه‌سازی عددی یکی از راه‌های موثر جهت تشخیص رفتار دینامیکی اجزای انتقال قدرت است. شبیه‌سازی ارتعاشی اجزایی شامل چرخدنده، یاتاقان و پوسته جعبه‌دنده تاثیر دینامیکی قطعات را بر کل سیستم مشخص می‌کند. شبیه‌سازی عددی جهت تشخیص فرکانس‌های طبیعی و شکل مود ارتعاشی جعبه دنده‌ها با انتقال قدرت زیاد مانند جعبه دنده بالگرد نیز با موفقیت انجام شده است[۱۱]. همچنین به‌کارگیری شبیه‌سازی می‌تواند باعث پیش‌بینی شرایط خرابی کل سیستم و کاهش هزینه‌ها می‌شود. مدلسازی دینامیکی روشی مفید جهت مشاهده پاسخ فرکانسی یک سیستم دوار در حضور اجزای مکانیکی مختلف در سیستم است. سیگنال‌های ارتعاشی حاصل از یک سیستم معیوب این امکان را فراهم می‌سازد تا مکان و میزان عیب در سیستم را تشخیص داده بدون اینکه فرآیند خرابی حقیقی در سیستم دوار تجربه شود که مستلزم صرف هزینه و وقت زیادی است. نقص مکانیکی در جعبه دنده از عمده دلایل ایجاد ارتعاش و صدا محسوب می‌شود. پوسته جعبه دنده یکی از اجزای بحرانی سیستم انتقال قدرت در ماشین‌های سنگین محسوب می‌شود. پوسته جعبه دنده دو وظیفه مهم بر عهده دارد: یکی حفاظت از چرخدنده‌های محرک قدرت و دیگری محفظه روغن به صورت آب‌بندی شده تا بتواند وظیفه روانکاری را بخوبی انجام دهد. پیش بینی رفتار کلی پوسته جعبه دنده در شرایط درگیری چرخدنده‌ها، بار وارده از طرف موتور و ارتعاشات ناشی از موتور اهمیت بسیار بالایی دارد[۱۲]. با شبیه‌سازی شرایط مشابه واقعیت در نرم افزارهای اجزا محدود نظیر آباکوس می‌توان به اطلاعات مفیدی از تاثیر عیوب مختلف بر پاسخ فرکانسی یک سیستم دست یافت. در این مقاله شرایط ارتعاشی دیفرانسیل عقب بنز Axor به همراه شکل مود ارتعاشی آنها برای جنس‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور پنج مود ارتعاشی اول جعبه دنده در جنس‌های مختلف شبیه‌سازی خواهد شد. در مرحله بعد به بررسی تغییرات رفتار ارتعاشی جعبه‌دنده به صورتیکه یکی از پیچها به درستی بسته نشوند، پرداخته خواهد شد. یکی از علل عمده در ارتعاشات غیرعادی جعبه دنده‌ها اتصال نامناسب دو قسمت جعبه دنده به همدیگر است که در این حالت پیچها به درستی بسته نشده‌اند.

۲- مدل سه بعدی پوسته جعبه دنده

مدل پوسته دیفرانسیل که طراحی دقیق آن تاثیر بسزایی در پاسخ فرکانسی گیربکس دارد، با استفاده از نرم افزار CATIA که قابلیت بالایی در رسم اشکال هندسی پیچیده دارد، طراحی شد.

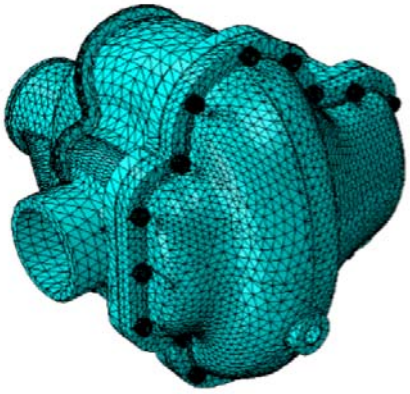
محیطها و ابزارهای مختلف موجود در این نرم افزار این توانایی را به طراح می‌دهد تا هندسه مورد نظر خود را به درستی ترسیم نماید[۱۳]. ابعاد هندسی دیفرانسیل مورد نظر از روی نمونه موجود در پژوهشکده توسعه تکنولوژی سازمان جهاد دانشگاهی صنعتی شریف ثبت شده است. شکل ۱ پوسته طراحی شده دیفرانسیل با استفاده از نرم افزار CATIA را نشان می‌دهد.

۳- شبیه سازی المان محدود

جهت تحلیل عددی از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است که ضمن ارتباط مطلوب با نرم افزار CATIA قابلیت بسیار خوبی در شبیه‌سازی رفتار دینامیکی اجزای مکانیکی مختلف دارد[۱۴].

شکل ۱ مدل CAD پوسته دیفرانسیل در نرم افزار CATIA

شکل۲ نمایی از مش بندی پوسته دیفرانسیل را نشان می‌دهد که از ۴۲۱۷۵ گره و ۱۶۶۸۲۷ المان تشکیل شده است. المان‌ها از نوع هرمی با ۴ گره انتخاب شده است. از آنجا که بخشی از تحلیل عددی به بررسی تاثیر جنس پوسته بر روی فرکانس‌های طبیعی و شکل مود ارتعاشی اختصاص دارد، از مواد مختلف در شبیه‌سازی استفاده شده است. چدن خاکستری، فولاد، آلیاژ آلومینیوم و آلیاژ منیزیم مواد مورد نظر مولفین بوده است که خواص آنها برای شبیه‌سازی ارتعاشی در جدول۱ آورده شده است. در انتخاب مواد هدف اصلی تنها بررسی تغییرات رفتار دینامیکی پوسته بوده و جنبه ساخت نمونه بررسی نشده است. شرایط مرزی به گونه‌ای که دیفرانسیل مورد نظر بر روی شاسی اتومبیل ثابت نگه داشته شود در نرم افزار وارد شده است. اعمال شرایط مرزی به صورت جابجایی صفر باعث حذف فرکانس‌های پایین شده که از این رو احتمال ایجاد پدیده تشدید کاهش می‌یابد[۱۵]. توجه شود که با استفاده از پیچ‌های اتصال دو بخش دیفرانسیل بهم متصل شده‌اند. در مرحله اول که هدف از شبیه‌سازی بررسی تاثیر جنس‌های مختلف پوسته می‌باشد، پیچ های اتصال محکم بسته شده‌اند و اتصال بین دو قسمت دیفرانسیل بخوبی برقرار است. در مرحله بعد که هدف از شبیه‌سازی بررسی تاثیر شل بستن پیچ‌های اتصال است، یکی از پیچ‌ها به گونه‌ای شبیه‌سازی شده است که نقشی در اتصال دوقسمت دیفرانسیل نداشته باشد. جهت اعمال این کار در نرم افزار با انجام پارتیشن بندی، بخشی از ناحیه تماس بین دو قسمت دیفرانسیل، به یکدیگر پیوند داده نمی‌شود که نشانگر شل بستن پیچ اتصال در آن ناحیه است.



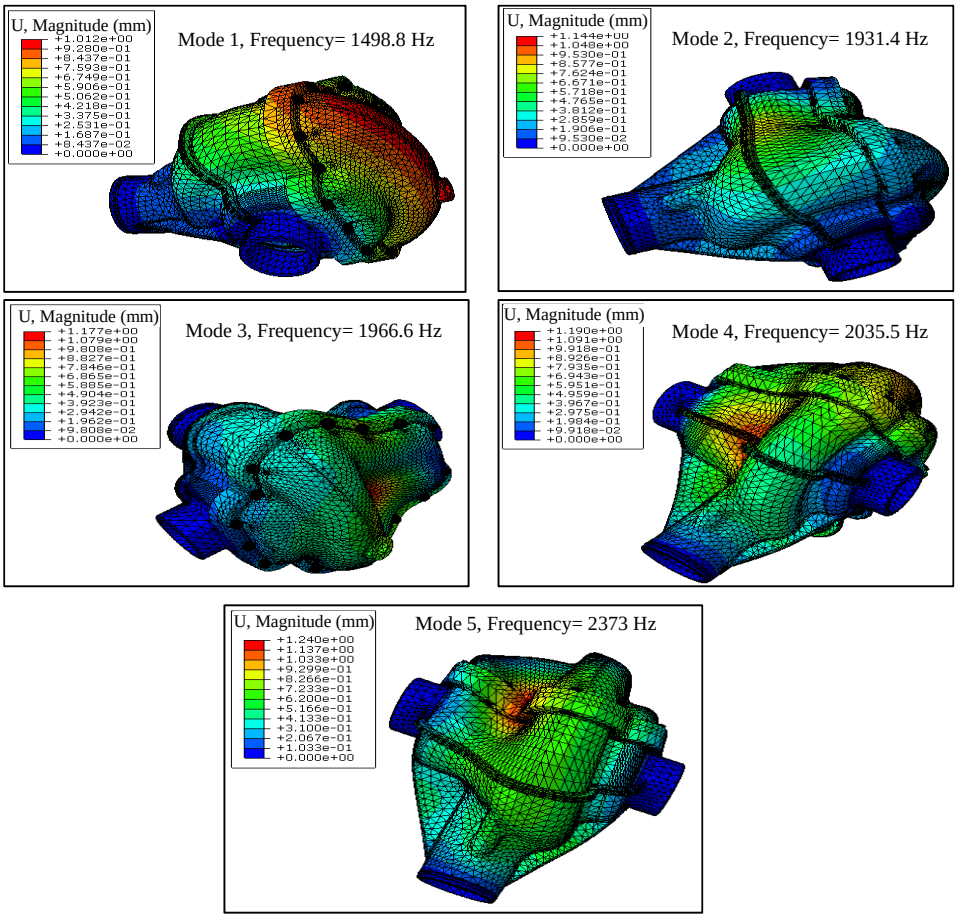
شکل ۲ مش بندی پوسته دیفرانسیل در نرم افزار ABAQUS

جدو ل۱ مشخصات مواد به کار گرفته شده برای پوسته دیفرانسیل در نرم‌افزار شبیه ساز[۱۰]

ردیف	جنس	مدول الاستیک(Pa)	ضریب پواسون	چگالی(Kg/m^3)
۱	Gray cast iron	1.28e11	0.26	7200
۲	Steel	2e11	0.3	7850
۳	Al alloys	0.71e11	0.33	2770
۴	Mg alloys	0.45e11	0.36	1800

۴- نتایج و بحث

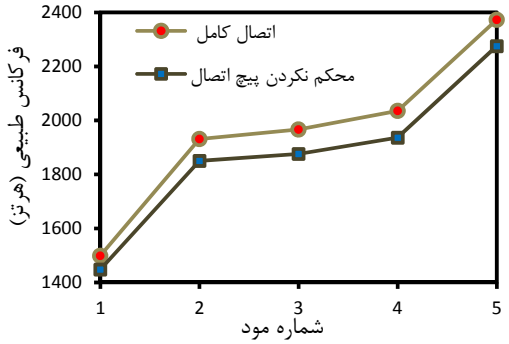
در ابتدا شبیه‌سازی به یافتن ۵ مود ارتعاشی اول پوسته و فرکانس‌های طبیعی آن اختصاص یافت. در این حالت پوسته دیفرانسیل به صورت ثابت‌شده شبیه‌سازی شد، بعلاوه اینکه پیچ‌های اتصال نیز کاملا محکم در جای خود مدل شد. در این حالت جنس مورد نظر برای پوسته از نوع چدن خاکستری در نظر گرفته شد که قابلیت بسیار خوب در میرایی ارتعاشات دارد[۱۶]. شکل۳ فرکانس‌های طبیعی و شکل ۵ مود ارتعاشی اول بدست آمده با استفاده از نرم افزار ABAQUS را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است بازه تغییرات فرکانس طبیعی بین ۱۴۹۸/۸ تا ۲۳۷۳ هرتز است. قرار گرفتن فرکانس طبیعی در بازه مذکور احتمال پدیده تشدید را در پوسته دیفرانسیل کاهش می‌دهد. ۵ شکل مود ارتعاشی اول شامل ارتعاشات پیچشی و خمش محوری هستند که از عوامل ارتعاشی مخرب در پوسته جعبه دنده‌ها محسوب می‌شوند و باعث لرزش و سرو صدای زیادی می‌شوند[۱۷]. در ارتعاشات خمشی محوری پوسته حول خط مرکزی خود دچار خمش می‌شود. ارتعاشات پیچشی سبب می‌شود تا تغییرشکل در نقطه‌ای از پوسته به شدت افزایش یابد. نوعی دیگر از ارتعاشات، ارتعاشات محوری است که تغییرشکل در خط مرکزی قطعه دارای بیشینه مقدار است[۱۴].



شکل۳ پنج مود ارتعاشی اول به همراه فرکانس طبیعی آن برای پوسته با جنس چدن خاکستری

جدو ل۲ فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از شبیه‌سازی عددی برای چهار ماده مختلف

شماره مود ارتعاشی	Gray cast iron	Steel	Al alloys	Mg alloys
۱	1498.9 Hz	1799 Hz	1767.1 Hz	1783.5 Hz
۲	1931.4 Hz	2334.1 Hz	2324.8 Hz	2334.2 Hz
۳	1966.6 Hz	2380.8 Hz	2361.1 Hz	2389.7 Hz
۴	2035.5 Hz	2455.1 Hz	2442.3 Hz	2449.8 Hz
۵	2373 Hz	2859.8 Hz	2822.2 Hz	2849.7 Hz



شکل ۴ فرکانس‌های طبیعی پوسته دیفرانسیل در دو حالت اتصال کامل و محکم نکردن یکی از پیچ‌های اتصال

جدول۲ تاثیر جنس بر فرکانس‌های طبیعی پوسته را نشان می‌دهد. بازه فرکانس‌های طبیعی پوسته از جنس چدن خاکستری، فولاد، آلیاژ آلومینیوم و آلیاژ منیزیم به ترتیب (۱۴۹۸/۹-۲۳۷۳) ، (۱۷۹۹-۲۸۵۹) ، (۱۷۶۷/۱-۲۸۲۲/۲) ، (۱۷۸۳/۵-۲۸۴۹/۷) بدست آمده است. طراحی پوسته دیفرانسیل با توجه به فرکانس‌های ارتعاشی بوجود آمده بر اثر دوران محور انتقال قدرت و سایر اجزا، انجام می‌شود. جنس انتخابی برای پوسته باید به گونه‌ای باشد که فرکانس‌های ایجاد شده به فرکانس طبیعی پوسته نرسد تا از عدم ایجاد پدیده تشدید اطمینان حاصل شود[۱۸]. تحقیقات نشان داده است که با استفاده از تحلیل المان محدود می‌توان فرکانس طبیعی پوسته را حدس زد که دقت قابل قبولی دارد[۱۹].

بخش دیگری از شبیه‌سازی به تاثیر محکم نکردن پیچ اتصال بین دو قسمت جعبه دنده اختصاص داشت که ممکن است بر اثر سهل‌انگاری هنگام تعمیرات اتفاق بیافتد. عدم اتصال کامل بین دو قسمت جعبه دنده باعث تغییر فرکانس طبیعی و شکل مود ارتعاشی پوسته خواهد شد. ایجاد صدای اضافی در حین عملکرد جعبه دنده می‌تواند نشانگر عدم قید و بند کامل آن باشد. شبیه‌سازی انجام گرفته نشان داد که در اثر محکم نکردن پیچ اتصال، فرکانس طبیعی پوسته کاهش خواهد یافت که همین امر باعث افزایش احتمال پدیده تشدید خواهد شد.

شکل۴ فرکانس‌های طبیعی پوسته را در دو حالت اتصال کامل و محکم نکردن یکی از پیچ‌ها نشان می‌دهد. با مقایسه این دوحالت کاملا مشخص است که محکم نکردن پیچ اتصال باعث می‌شود حدود ۳ تا ۴ درصد در شماره مودهای ارتعاشی مختلف از فرکانس‌های طبیعی پوسته کاسته شود. نتایج بدست آمده مشابه تحقیقات انجام شده توسط کومار و همکاران است[۱۴].

۵- جمع بندی

تحقیقات نشان داده است که ارتعاشات زیاد در جعبه دنده‌ها یکی از عوامل اصلی تخریب سیستم می‌باشد. طراحی جعبه دنده‌ها و دیفرانسیل‌ها بر اساس کمترین میزان ارتعاش و لرزش از دغدغه‌های مهندسین این امر است. از طرفی دیگر طراحی باید به گونه‌ای باشد تا پدیده تشدید به عنوان عاملی بسیار مخرب، هرگز در سیستم رخ ندهد. استفاده از جنس، هندسه و قید و بند مناسب برای پوسته جعبه‌دنده از اهمیت بالایی برخوردار است. شبیه‌سازی عددی سیستم مورد نظر قبل از ساخت، کمک شایانی به طراحان خواهد کرد تا رفتار دینامیکی سیستم را پیش‌بینی نمایند. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار آباکوس عملکرد ارتعاشی دیفرانسیل عقب بنز Axor تحت تحلیل قرار گرفت که نتایج حاصله بدین شرح است:

- بازه تغییرات فرکانس طبیعی برای پوسته دیفرانسیل از جنس چدن خاکستری بین ۱۴۹۸/۸ تا ۲۳۷۳ هرتز بدست آمد. از آنجا که فرکانس ارتعاشی تولیدی توسط دیفرانسیل‌ها معمولا به این مقدار نمی‌رسد، میتوان از عدم ایجاد تشدید اطمینان داشت.
- ۵ شکل مود ارتعاشی اول شامل ارتعاشات پیچشی و خمش محوری هستند که از عوامل ارتعاشی مخرب در پوسته جعبه دنده‌ها محسوب می‌شوند.

- تاثیر جنس‌های مختلف بر روی فرکانس طبیعی پوسته دیفرانسیل بررسی شد که نتایج نشان می‌داد با توجه به بالا بودن فرکانس‌های طبیعی این مواد، امکان استفاده آنها در پوسته دیفرانسیل وجود دارد.
- در اثر محکم نکردن پیچ اتصال بین دو بخش دیفرانسیل، فرکانس طبیعی پوسته حدود ۳ تا ۴ درصدکاهش خواهد یافت که همین امر باعث افزایش احتمال پدیده تشدید خواهد شد.

۶- مراجع

[1] Tuma, J., Gearbox Noise and Vibration Prediction and Control. International Journal of Acoustics and Vibration, 2009. 14: p. 1-11.

[2] Åkerblom, M., Gear noise and vibration - a literature survey. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013. 5: p. 1449-1453.

[3] Timothy J. Gordon , Z., Vibration Transmission from Road Surface Features. Vehicle Measurement and Detection.Technical Report for Nissan Technical Center North America, 2007.

[4] Shawki S. Abouel-Seoud, E.S.M., Ahmed A. AbdelHamid, Ahmed S. Abdallah, Analytical Technique for Predicting Passenger Car Gearbox Structure Noise Using Vibration Response Analysis. British Journal of Applied Science & Technology, 2013. 3: p. 860-883.

[5] Fujin Yu, Y.L., Daowen Sun, Wenquan Shen and Weiqiang Xia, Analysis for the Dynamic Characteristic of the Automobile Transmission Gearbox. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013. 5: p. 1449-1453.

[6] Fan, Q.m. Modal Analysis of a Truck Transmission Based on ANSYS. in 2011 Fourth International Conference on Information and Computing. 2011.

[7] Minfeng, H., Yingchun, J, Fatigue life analysis of automobile component based on FEM. Mech. Res, 2008: p. 57-60.

[8] Velex, P. and L. Flamand, Dynamic Response of Planetary Trains to Mesh Parametric Excitations. Journal of Mechanical Design, 1996. 118(1): p. 7-14.

[9] Yu, L., Wu, G., Analysis on fatigue life of rear suspension based on virtual test tig. Comput. Aided Eng, 2006. 15: p. 128-130.

[10] Kumar, A., et al., Material-Based Vibration Characteristic Analysis of Heavy Vehicle Transmission Gearbox Casing Using Finite Element Analysis, in Intelligent Computing, Communication and Devices: Proceedings of ICCD 2014, Volume 1, C.L. Jain, S. Patnaik, and N. Ichalkaranje, Editors. 2015, Springer India: New Delhi. p. 527-533.

[11] Mohamed Slim Abbes , T.F., Mohamed Haddar, and ArefMaalej, Effect of transmission error on the dynamic behaviour of gearbox housing. Int J Adv Manuf Technol, 2007. 34: p. 211-218.

[12] Sagar Pradip Walhekar, R.R.K., Vibration Analysis for Two Wheeler Gearbox Casing using FEA. International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering, 2015. 2(8): p. 12-15.

[13] Davidoff, N.A. and A. Freivalds, A graphic model of the human hand using CATIA. International Journal of Industrial Ergonomics, 1993. 12(4): p. 255-264.

[14] Ashwani Kumar, P.P.P., Dynamic Vibration Analysis of Heavy Vehicle Truck Transmission Gearbox Housing Using FEA. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2014. 7: p. 66-72.

[15] Kumar, A., et al., Free Vibration and Material Mechanical Properties Influence Based Frequency and Mode Shape Analysis of Transmission Gearbox Casing. Procedia Engineering, 2014. 97: p. 1097-1106.

[16] James, D.W., High damping metals for engineering applications. Materials Science and Engineering, 1969. 4(1): p. 1-8.

[17] Bozca, M., Torsional vibration model based optimization of gearbox geometric design parameters to reduce rattle noise in an automotive transmission. Mechanism and Machine Theory, 2010. 45(11): p. 1583-1598.

[18] Industrial Noise Control: Fundamentals and Applications, Second Edition. 1993: Taylor & Francis.

[19] R. V. Nigade, T.A.J., A.M.Bhide, Vibration Analysis of Gearbox Top Cover. International Journal of Innovations in Engineering and Technolog, 2012. 1(4).