

تحلیل ارتعاشات پیچشی مجموعه میل لنگ موتور دیزل شش استوانه خطی و صحه گذاری نتایج آن

مصطفی حسینعلی پور^۳ و حمیدرضا چمنی^۴

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه علم و صنعت

مهدی تاجداری^۲

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات اراک

سعید شجاعی^۱

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۴/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۰)

چکیده

در تحقیق حاضر تحلیل ارتعاشات پیچشی مجموعه میل لنگ موتور دیزل OM457 با کمک نرم افزار AVL\EXCITE انجام گرفته است. این تحلیل به صورت خطی انجام گرفته و مدل محاسبه، یک سامانه جرم- فنر است که روند تحلیل آن بر پایه روش هولزر است. پارامترهایی از قبیل فرکانس های طبیعی پیچشی سامانه، گشتاورهای پیچشی نوسانی وارد بر اجزاء مختلف میل لنگ، جابه جایی زاویه ای سر آزاد میل لنگ، شرایط احتراق ناقص، اتلاف توان حرارتی در میراگر و گشتاور انتقالی به چرخ طیار از جمله مواردی هستند که در این تحقیق مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته اند. به منظور محاسبه سختی پیچشی یک لنگ از میل لنگ، از تحلیل اجزاء محدود استفاده شده است. به منظور صحه گذاری مدل سازی، نتایج حاصل از شبیه سازی ارتعاشات پیچشی مجموعه میل لنگ موتور با نتایج حاصل از آزمون ارتعاشات پیچشی موتور OM457 مقایسه و ارائه شده است. مقایسه نتایج، حاکی از دقت خوب این نرم افزار و همچنین صحت مدل سازی تحلیل ارتعاشات پیچشی موتور می باشد.

واژه های کلیدی: ارتعاشات پیچشی، موتور دیزل، سختی پیچشی

Torsional Vibrations Analysis of the Set of Linear Six Cylinder Diesel Engine Crankshaft and Validation of Its Results

S. Shojaei

Mechanical Engineering Department
Shahid Rajaei Teacher Training
University

M. Tajdari

Mechanical Engineering Department
Arak Science and Research Branch
Islamic Azad University

M. Hoseinalipur and H. Chamani

Mechanical Engineering Department
University Science and Technology

(Received: 19 July, 2013; Accepted: 31 December, 2013)

ABSTRACT

Torsional vibrations analysis of the crankshaft at the diesel engine set is accomplished by AVL \ EXCITE software based on Holzer method. The parameters such as natural frequencies of torsional system, oscillating torsional torques operated on the divers components of crankshaft, angular displacement of crankshaft in free condition from one side, misfiring conditions, heat dissipated power in damper and transitional torque to the flywheel have been investigated in this research. Simulation results of torsional vibrations in the crankshaft of engine are compared with the experimental results. This comparison illustrates a good accuracy in the results of torsional vibrations modelling.

Keywords: Torsional Vibrations, Diesel Engine, Torsional Stiffness

۱- دانشجوی دکترا: saeed_shojaei8@yahoo.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): m.tajdari@srbiau.ac.ir

۳- دانشیار: alipour@iust.ac.ir

۴- دانشجوی دکترا: h.chamani@gmail.com

۱- مقدمه

تحلیل ارتعاشات پیچشی یک عمل نرمال مهندسی در روند طراحی سامانه‌های شفت دارای حرکت در موتورهای احتراق داخلی رفت و برگشتی است [۱].

کدهای متفاوتی که به‌عنوان روش‌هایی برای حل ارتعاشات پیچشی ارائه می‌گردند، اکثراً بر پایه روش هولزر می‌باشند [۱]. شرکت‌های زیادی با توسعه این کدها و صحت‌گذاری آنها از طریق مقایسه با نتایج تجربی [۲]، توانسته‌اند به‌صورت تجاری از آنها استفاده کنند. اجزاء مختلفی در سامانه پیچشی وجود دارند که تأثیر مستقیم روی این سامانه می‌گذارند مثل دمپر، کوپلینگ، جرم‌های موازنه شده و فلاپویل. در طراحی سامانه ارتعاشات پیچشی این اجزاء طراحی یا انتخاب می‌گردند. مقادیر این اجزاء تأثیرات مختلفی روی سامانه پیچشی، گشتاورهای ایجاد شده و دامنه ارتعاشات دارند [۳].

محققان بسیاری تحلیل ارتعاشات پیچشی، روش‌ها و عوامل مؤثر در آن را مورد بررسی قرار داده‌اند. درامینسکی^۱ [۴] یکی از اولین محققینی بود که درباره این اثر مطالعه کرده است. هسترمن و استون^۲ [۵] اثرات تغییر اینرسی را مورد توجه قرار داده‌اند. پاسریشا^۳ [۶] به تأثیرات ناشی از نیروهای اینرسی که برای میل لنگ بیش از اندازه خطرناک است، می‌پردازد. سانگ^۴ [۷] با تحلیل، تأثیر کوپلینگ را روی ارتعاشات محوری و پیچشی در میل‌لنگ‌ها بررسی کرده است. ضرایب دمپینگ پیچشی در موتورهای احتراق داخلی اولین بار توسط هارتوگ^۵ [۸] و ویلسون^۶ [۹] از طریق محاسبات تجربی تخمین زده شد. محققین زیادی از جمله ایواموتو و واکابایاشی^۷ [۱۰]، وانگ و لیم^۸ [۱۱] و مندز و میرلس^۹ [۳] در بررسی‌هایی که روی دمپینگ مطلق انجام انجام داده‌اند مقدار آن را فارغ از سرعت‌های موتور و همچنین در هر موقعیت میل‌لنگ، ثابت در نظر گرفته‌اند. در مطالعه و تحلیل ارتعاشات پیچشی روی یک موتور دیزل شش سیلندر که توسط هوندا و سایتو^{۱۰} [۱۲] انجام گرفته، کاهش اثرات ارتعاشی با

استفاده از دمپر اصطکاکی مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن حاکی از نقش عمده سختی پیچشی یک دمپر اصطکاکی در ارتعاشات پیچشی موتور است. مندز و میرلس [۳] دیگر محققینی بودند که روی ارتعاشات پیچشی موتور دیزل شش سیلندر کار کرده و قیاسی از کاربرد دو نوع دمپر اصطکاکی و ویسکوز را انجام داده‌اند.

در تحقیق حاضر تحلیل ارتعاشات پیچشی یک موتور دیزل شش سیلندر خطی به کمک نرم‌افزار AVL EXCITE با توجه به مشخصات موتور موجود انجام شده است. موتور مورد استفاده در تحلیل موتور OM457 می‌باشد. این موتور از نوع دیزلی، چهارزمانه و خطی بوده و جزء موتورهای تولیدی شرکت دایملر کرایسلر قلمداد می‌گردد و مشخصات آن در جدول ۱ آمده است.

جدول (۱): مشخصات موتور OM457 [۱۳].

تعداد سیلندر	۶	
قطر سیلندر	۱۲۸	میلی‌متر
کورس پیستون	۱۵۵	میلی‌متر
حجم هر سیلندر	۲	لیتر
نسبت تراکم	۱۷/۲۵	-
حداکثر توان موتور(در ۲۰۰۰ دور در دقیقه)	۳۱۶(۴۳۰)	کیلووات (اسب بخار)
حداکثر گشتاور موتور (در ۱۱۰۰ دور در دقیقه)	۲۰۰۰	نیوتن متر
ترتیب جرعه	۱-۵-۳-۶-۲-۴	-
ممان اینرسی مجموعه فلاپویل	۰/۷۲۴	کیلوگرم مترمربع
ممان اینرسی رینگ دمپر	۰/۶	کیلوگرم مترمربع
فشار مؤثر متوسط	۲۱	بار

۲- تحلیل ارتعاشات پیچشی

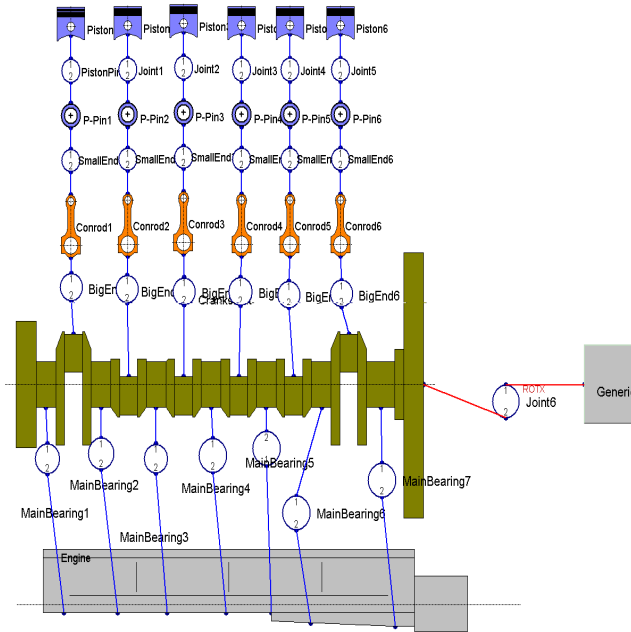
در تجزیه و تحلیل موتورهای رفت و برگشتی، کمپرسورها یا پمپ‌ها با تمام لنگ‌هایشان، پیستون‌ها، فلاپویل و قسمت‌های متحرک که می‌بایست حرکتی داده شوند، لازم است به‌شرح زیر عمل گردد. ابتدا با تعویض پیستون‌ها و شاتون‌های متصل به پین لنگ^{۱۱} و محور اصلی^{۱۲} متصل به بدنه موتور با دیسک‌های معادل

11- Crankpin
12- Mainjournal

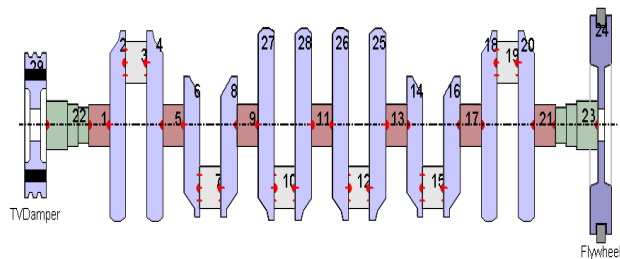
1-Draminski
2-Hestermann and Stone
3-Pasricha
4-Song
5-Hartog
6- Wilson
7- Iwamoto and Wakabayashi
8- Wang and lim
9- Mendes and Meirelles
10- Honda and Saito

هندسی و جرمی خواسته شده برای هر قسمت موتور به عنوان ورودی به نرم افزار داده شود.

یکی از قسمت‌های مهم در مدل سازی، مجموعه میل لنگ است که به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است. از عوامل مهم و مؤثر در ارتعاشات پیچشی می‌توان به اینرسی قطعات و ضرایب دمپینگ و سختی اشاره کرد. نحوه محاسبه آنها در ادامه به تفصیل توضیح داده می‌شود.



شکل (۲): مدل شماتیک موتور OM457 در نرم افزار AVL EXCITE

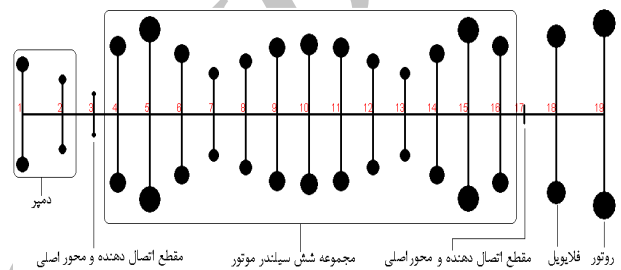


شکل (۳): مدل شماتیک مجموعه میل لنگ، فلاپویل و دمپر موتور OM457

۲-۱- محاسبه اینرسی

با توجه به اینکه اجزای موتور در نرم افزار Catia مدل سازی شده‌اند، با دانستن جنس ماده به کار رفته در آنها اینرسی قابل محاسبه است. به عنوان نمونه شکل ۴ میل لنگ موتور OM457

با جرم و ممان اینرسی و همچنین تعویض لنگ‌ها با قطعات معادل شفت مستقیم و قابلیت انعطاف پیچشی (فترهای پیچشی)، موتور و اجزاء بعد از آن تا اندازه‌ای ساده می‌گردد [۱۴]. روش حاضر برگرفته از روشی است که به وسیله چرچ [۱۵] تشریح شده است. بنابراین، موتور و اجزاء بعد از آن (مثل کوپلینگ، پروانه و...) می‌بایست به مجموعه‌ای معادل، متشکل از یک شفت مستقیم با مقطع یکنواخت حامل تعدادی دیسک تبدیل گردد. مثلاً در شکل ۱ شفتی با ۱۹ دیسک نشان داده شده است که مجموعه معادل موتور OM457 بوده و قرار است ارتعاشات پیچشی آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

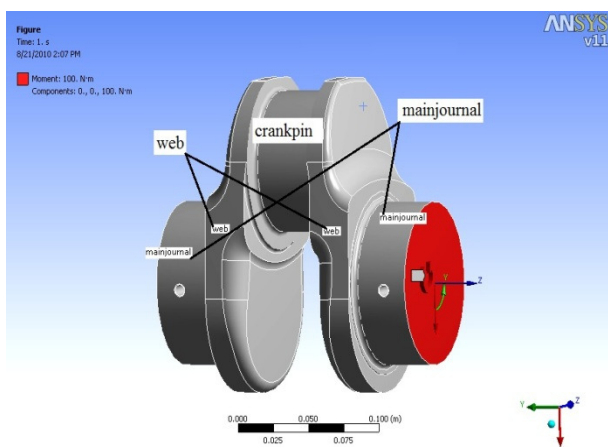


Inertia of Nodes [kgm ²]		Stiffness of Elements [Nm/rad]	
1	DamperRing1	1-2	Damper1
2	DamperHub	2-3	Segment1
3	Segment1-MainJournal1	3-4	Half_MainJournal1
4	MainJournal1	4-5	Web1
5	CrankPin1	5-6	Web2
6	MainJournal2	6-7	Web3
7	CrankPin2	7-8	Web4
8	MainJournal3	8-9	Web5
9	CrankPin3	9-10	Web6
10	MainJournal4	10-11	Web7
11	CrankPin4	11-12	Web8
12	MainJournal5	12-13	Web9
13	CrankPin5	13-14	Web10
14	MainJournal6	14-15	Web11
15	CrankPin6	15-16	Web12
16	MainJournal7	16-17	Half_MainJournal7
17	MainJournal7-Segment2	17-18	Segment2
18	Flywheel	19-18	Joint6
19	Generic		

شکل (۱): مدل ارتعاشات پیچشی موتور OM457

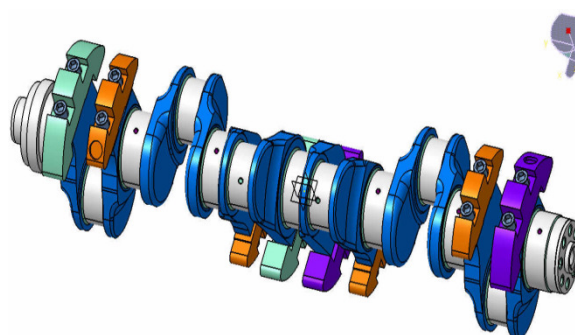
یکی از روش‌های مورد استفاده برای تعیین فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات پیچشی یک مجموعه چند جرمی، روش هولزر می‌باشد.

برای دستیابی به نتایج تحلیل ارتعاشات پیچشی موتور OM457 در نرم افزار AVL EXCITE باید ابتدا خود مدل موتور در این نرم افزار مطابق شکل ۲ ساخته شود، برای این منظور بعد از ساختن شماتیک مدل موتور در نرم افزار، می‌بایست مشخصات



شکل (۶): نحوه محاسبه سختی پیشگی در نرم افزار Ansys ضرایب دمپینگ و سختی دمپر و کوپلینگ در کاتالوگ شرکت های سازنده آورده می شود.

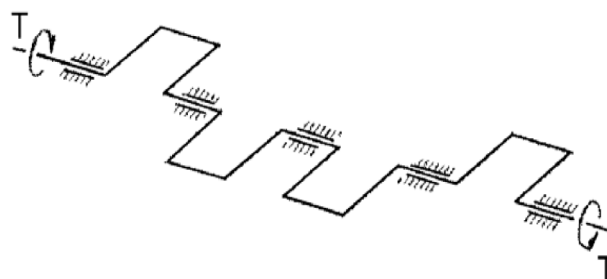
می باشد که در نرم افزار Catia مدل سازی شده است. اینرسی اجزاء میل لنگ به عنوان یکی از خروجی های این نرم افزار قابل استخراج است.



شکل (۴): مدل میل لنگ موتور OM457 در نرم افزار Catia.

۲-۲- محاسبه ضرایب دمپینگ و سختی

برای به دست آوردن سختی پیشگی میل لنگ، روش های گوناگونی مطرح شده است، از آن جمله می توان به دو روشی که بر پایه روش گرامل^۱ [۱۶] به دست آمده اند اشاره کرد: یکی فرمول های تجربی که بر اساس اولین نمونه گرامل، طبق شکل ۵ استخراج شده و دیگری روشی است به نام (بی.آی.سی.ای.آر.ای)^۲ که بر اساس هندسه قطعه به دست آمده است [۱۶].



شکل (۵): پیشگی میل لنگ بر اساس اولین نمونه گرامل [۱۶].

۲-۳- شرایط احتراق ناقص^۳

بررسی های نظری و همچنین بهره گیری از نتایج آزمایشات تجربی، در عمل این واقعیت را که در پاره ای از شرایط کاری موتور تفاوت های اساسی با شرایط عملکردی نرمال موتور وجود دارد را آشکار ساخته است، در مجموع این شرایط را میس فایرینگ یا احتراق ناقص و یا حریق غیر تعادلی می نامند [۲]. این حالت ممکن است در پی پاشیده شدن مقادیر خیلی کم سوخت در هر سیکل رخ دهد، که از عوامل تشدید کننده این حالت دماهای پایین محیط می باشد [۱۷]. این حالت هنگامی که خط انژکتور می شکند یا پمپ انژکتور غوطه ور می گردد در موتور دیزل رخ می دهد، همچنین بسته شدن سوپاپ نازل و یا شکستن فنر انژکتور ممکن است احتراق آشفته (مختل) را به وجود آورد. در این حالت ممکن است شکست هایی در سوپاپ و بدنه آن صورت گیرد [۱۱]. در این تحقیق با ایجاد حالت احتراق ناقص در یکی از سیلندرها به تأثیر آن بر روی دامنه پیشگی و گشتاورهای پیشگی میل لنگ و دیگر اجزاء در مقایسه با حالت نرمال پرداخته می شود.

۳- نتایج

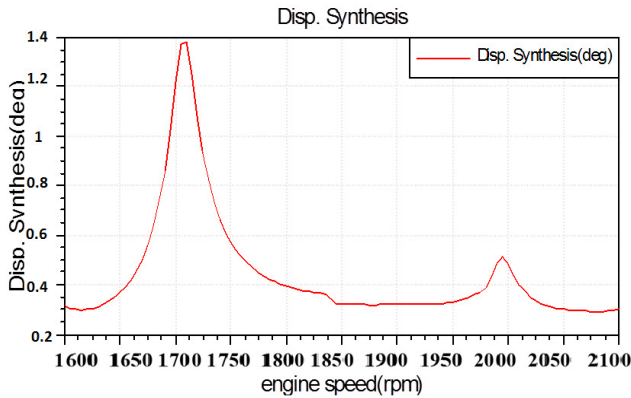
در جدول ۲ پنج فرکانس طبیعی و سرعت های دورانی معادل با آنها به منظور بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل ارائه شده است.

در مقاله حاضر، برای محاسبه سختی پیشگی وبها و شفت های متصل کننده آنها، مطابق شکل ۶ قسمتی از مدل میل لنگ را به نرم افزار Ansys منتقل و با اعمال گشتاور ثابت به یک طرف و ثابت کردن طرف دیگر مدل اجزاء محدود مربوط به آن، میزان زاویه پیشگی به دست می آید. از این طریق می توان برای هر یک از بخش های مدل میل لنگ، سختی پیشگی را به دست آورد [۲].

3- Misfiring

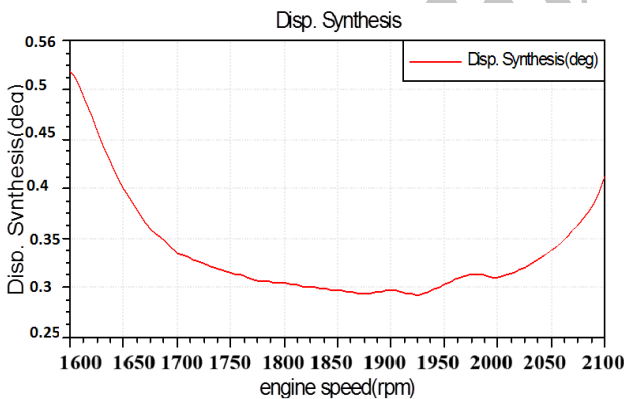
1-Grammel
2- B.I.C.E.R.A

۲-۳- مقایسه تأثیر دو وضعیت با دمپر و بدون دمپر روی میزان جابه‌جایی زاویه‌ای سر آزاد میل‌لنگ
میزان جابه‌جایی زاویه‌ای سر آزاد میل‌لنگ در حالت بدون دمپر در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل (۸): میزان جابه‌جایی زاویه‌ای سر آزاد میل‌لنگ در حالت بدون دمپر.

در شکل ۹ مشاهده میزان جابه‌جایی زاویه‌ای سر آزاد میل‌لنگ در حالت با دمپر نشان داده شده است. به‌وضوح تأثیر دمپر را روی نقاطی که دامنه جابه‌جایی در آنجا زیاد است می‌توان مشاهده کرد.



شکل (۹): میزان جابه‌جایی زاویه‌ای سر آزاد میل‌لنگ در حالت با دمپر.

۳-۳- منحنی توان

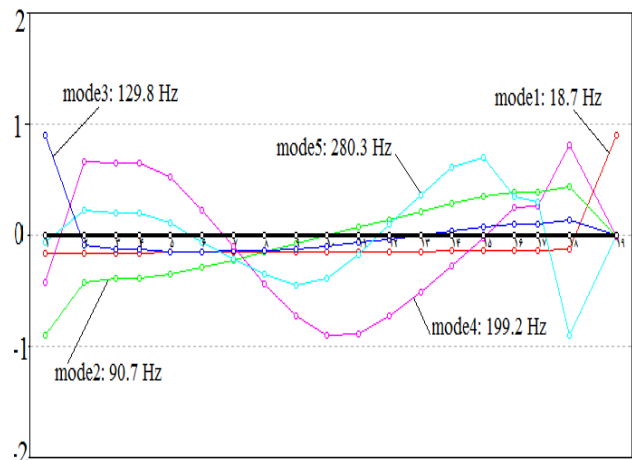
یکی از منحنی‌هایی که رفتار آن در تحلیل و بررسی نتایج بسیار حائز اهمیت می‌باشد، منحنی توان^۱ است. این منحنی براساس قانون پروانه [۱۷ و ۱۸] به‌دست می‌آید. در شکل ۱۰ منحنی توان

جدول (۲): فرکانس‌های طبیعی موتور OM457.

سرعت دورانی معادل (Rpm)	فرکانسهای طبیعی (HZ)
۱۱۲۲	۱۸/۷
۵۴۴۲	۹۰/۷
۷۷۸۸	۱۲۹/۸
۱۱۹۵۲	۱۹۹/۲
۱۶۸۱۸	۲۸۰/۳

۱-۳- مدهای ارتعاشی

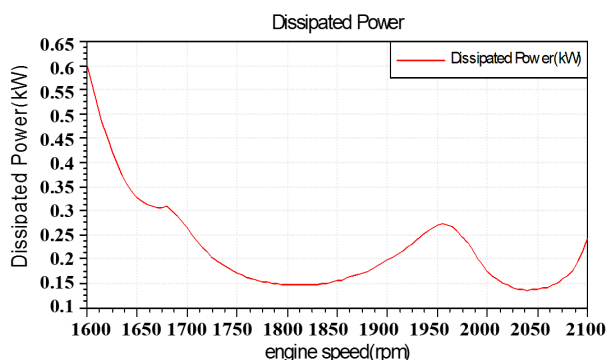
همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد، شکل مدهای ارتعاشی برای پنج فرکانس اول موتور OM457 نشان داده شده است. مد اول تنها در کوپلینگ (Joint6) رخ می‌دهد، به این صورت که همه اجزاء مدل ارتعاشی به‌صورت یکنواخت پیچش دارند و تنها در کوپلینگ به‌دلیل تأخیر در حرکت، این مد مشاهده می‌گردد. مد دوم در همه اجزاء مدل ارتعاشی دیده می‌شود، اما در مد سوم تقریباً بیشترین تأثیر را در دمپر می‌توان مشاهده کرد، چون بعد از مد دوم نقش دمپر بیشتر نمایان می‌گردد. در بقیه مدها تغییرات در کل مجموعه مدل ارتعاشی دیده می‌شود. از شکل مدهای ارتعاشی برای تحلیل نتایج حاصل از تحلیل ارتعاشات پیچشی موتور استفاده می‌گردد.



شکل (۷): شکل مدهای ارتعاشی در موتور OM457.

۳-۵- اتلاف توان حرارتی در دمپر

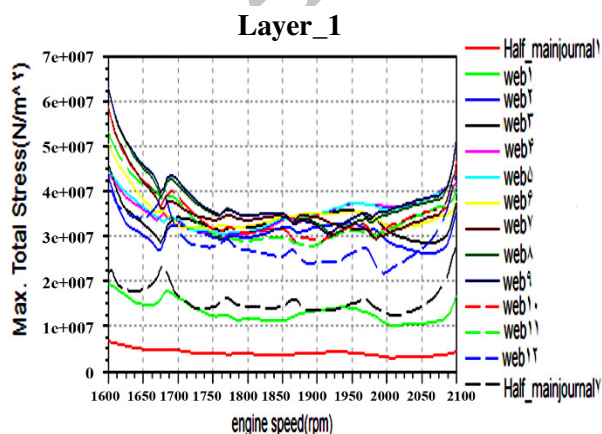
دمپر مورد استفاده در موتور OM457 از نوع ویسکوز است. نحوه رفتار منحنی اتلاف گرمایی دمپر همان گونه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است شبیه منحنی جابه‌جایی زاویه‌ای سر آزاد میل‌لنگ (شکل ۹) است و آن هم به این دلیل است که متناسب با جابه‌جایی سر آزاد میل‌لنگ و با زیاد و کم شدن این زاویه، میزان چرخش و دمپ در دمپر تغییر می‌کند، پس مشاهده می‌گردد در جایی که زاویه زیاد می‌شود اتلاف گرمایی هم زیاد می‌گردد و با کم شدن زاویه، اتلاف گرمایی هم کاهش می‌یابد.



شکل (۱۲): منحنی اتلاف گرمایی در دمپر.

۳-۶- گشتاورهای پیچشی نوسانی وارده بر اجزاء بحرانی میل‌لنگ

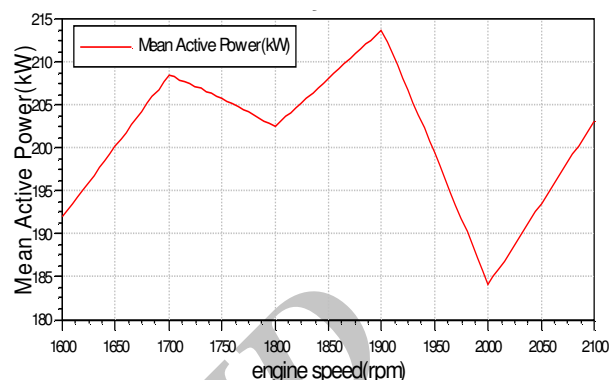
ابتدا به‌منظور پیدا کردن بحرانی‌ترین قسمت میل‌لنگ، بیشینه تنش در اجزاء مختلف میل‌لنگ همان گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌گردد، نشان داده شده است. در محدوده‌های مختلف سرعت دورانی، هر یک از اجزاء میل‌لنگ که بیشینه تنش در آن بیش از بقیه اجزاء است، مشخص می‌گردد.



شکل (۱۳): بیشینه تنش در اجزاء مختلف میل‌لنگ.

موتور OM457 نشان داده شده است. روند منحنی توان مطابق با منحنی فشار بر حسب زاویه‌ی لنگ در هر سرعت دورانی است.

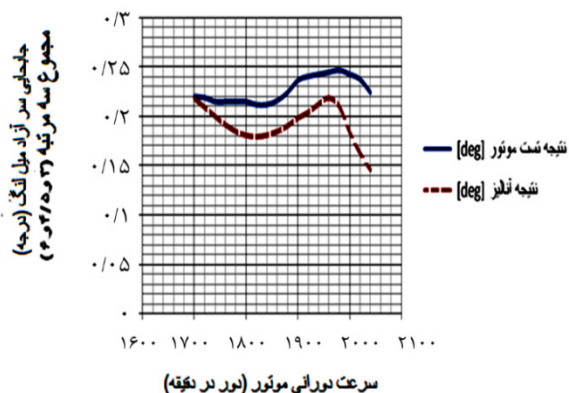
Layer_1



شکل (۱۰): منحنی توان موتور OM457.

۳-۴- مقایسه میزان جابه‌جایی زاویه‌ای سر آزاد میل‌لنگ حاصل از آزمون با نتیجه تحلیل نرم‌افزار

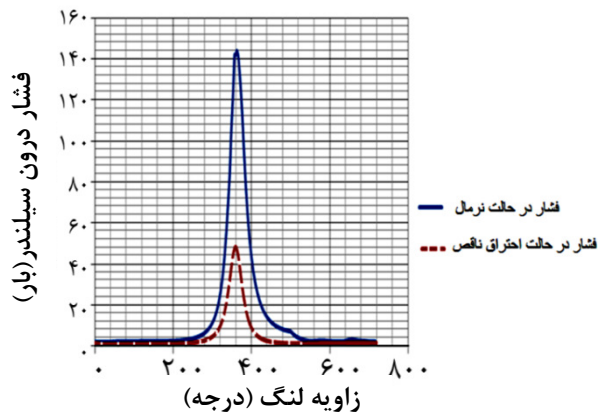
از نتایج ارائه شده این آزمون که توسط پژوهشکده قوای محرکه انجام شده، میزان جابه‌جایی زاویه‌ای سر آزاد میل‌لنگ در سه مرتبه سه، چهار و نیم و شش مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه حاصل از آزمون با نتیجه به‌دست آمده از تحلیل در شکل ۱۱ آمده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد روند تغییرات در منحنی‌ها تقریباً مشابه بوده اما با درصدی خطا همراه می‌باشد که میزان درصد خطای محاسبه شده حداکثر ۲۰٪ می‌باشد. خطای موجود را می‌توان به خطا در به‌دست آوردن منحنی فشار، به‌دست آوردن سختی پیچشی اجزاء، مشخصات هندسی اجزاء، نبود اطلاعات دقیق شرایط آزمون برای اجزاء بعد از فلاپویل و... مربوط دانست.



شکل (۱۱): مقایسه نتیجه آزمون موتور و نتیجه تحلیل موتور با نرم‌افزار AVL\EXCITE.

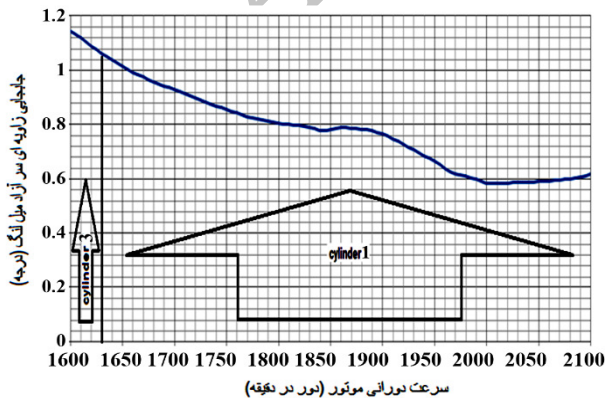
۷-۳- نتایج حاصل از وضعیت احتراق ناقص

در شکل ۱۶ تفاوت فشار درون سیلندر در حالی که احتراق صورت می‌گیرد و همچنین حالتی که احتراق صورت نمی‌گیرد یا به شکل ناقص انجام می‌گیرد نمایش داده شده است. در حالت دوم همه مراحل مکش، تراکم، انبساط و تخلیه بدون احتراق صورت می‌گیرد.



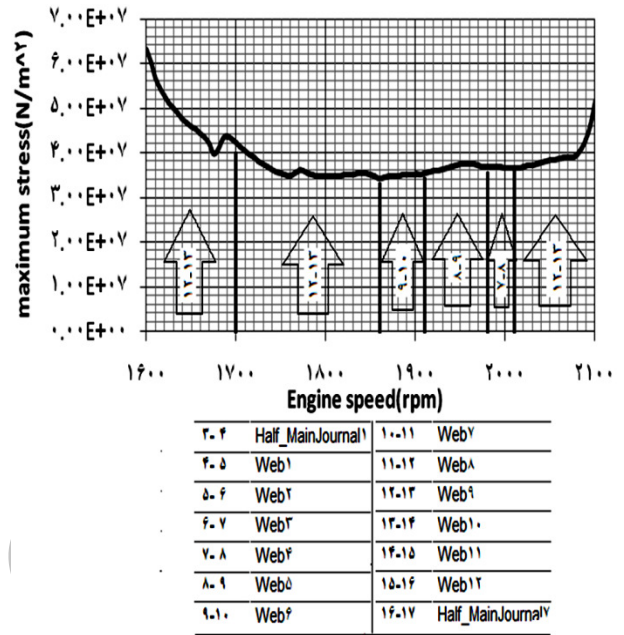
شکل (۱۶): منحنی فشار در دو حالت نرمال و احتراق ناقص [۱۹].

در شکل ۱۷ سیلندرهایی که احتراق ناقص در آنها بیشترین تأثیر را در جابه‌جایی زاویه‌ای سر آزاد میل‌لنگ دارند نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، احتراق ناقص در سیلندرهایی یک و سه در بازه سرعت دورانی بیشتری بر روی جابه‌جایی زاویه‌ای سر آزاد میل‌لنگ تأثیر می‌گذارد. به این ترتیب می‌توان تأثیرگذارترین سیلندر (سیلندر یک) در این حالت را تعیین کرد. شکل ۱۸ نیز بحرانی‌ترین اجزاء در میل‌لنگ را نشان می‌دهد.



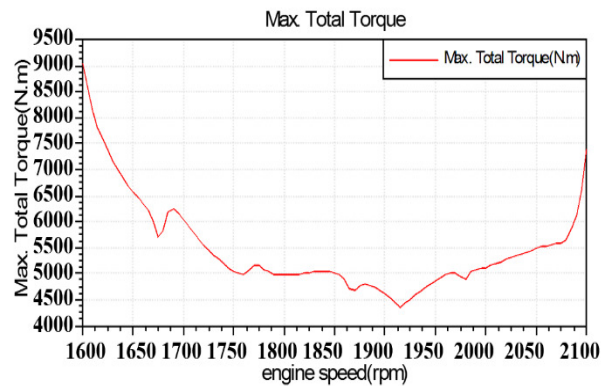
شکل (۱۷): سیلندرهایی تأثیرگذار در جابه‌جایی زاویه‌ای سر آزاد میل‌لنگ.

بر این اساس همان‌طور که در شکل ۱۴ نمایش داده شده، در هر محدوده سرعت دورانی یک قسمت از میل‌لنگ در وضعیت بحرانی‌تری قرار دارد، بنابراین از این طریق قسمت‌های بحرانی میل‌لنگ مشخص می‌گردد.



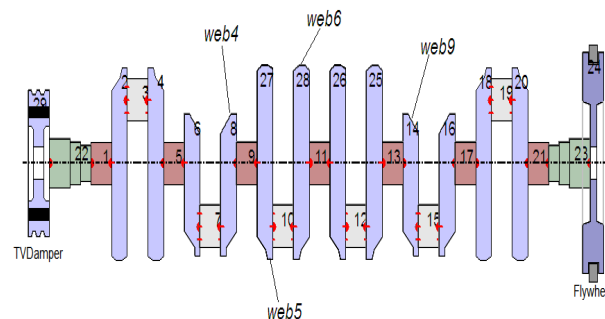
شکل (۱۴): بیشینه تنش در بحرانی‌ترین قسمت‌های میل‌لنگ.

همان‌گونه که در شکل ۱۴ نشان داده شد، بحرانی‌ترین قسمت میل‌لنگ مربوط به وب نه^۱ می‌شود، پس گشتاور پیچشی نوسانی وارده به این جزء میل‌لنگ به صورت کلی مطابق شکل ۱۵ نمایش داده شده است.



شکل (۱۵): گشتاور پیچشی نوسانی وارده به وب نه.

4. Draminski, P. "Extended Treatment of Secondary Resonance. ShipBuild", Marine Eng. Int., Vol. 88, No.1, pp. 180-186, 1965.
5. Hestermann, D.C. and Stone, B.J. "Secondary Inertia Effects in the Torsional Vibration of Reciprocating Engines –A Literature Review", Proc. Instn Mech. Engrs, Part C: J. Mech. Eng. Sci., Vol. 209, No. 1, pp. 11-15, 1994.
6. Pasricha, M.S. "Effect of the Gas Forces on Parametrically Excited Torsional Vibrations of Reciprocating Engines", J. Ship Res., Vol. 45, No. 4, pp. 262-268, 2001.
7. Song, X.G., Song, T.X., Xue, D.X., and Li, B.Z. "Progressive Torsional-Axial Continued Vibrations in Crankshaft Systems: A Phenomenon of Coupled Vibration", Trans. ASME, Rotat. Mach. Veh. Dyn., pp. 319-323, 1991.
8. Den Hartog, J.P. "Mechanical Vibrations, Dover Publications", New York, 1985.
9. KerWilson, W. "Practical Solution of Torsional Vibration Problems", JohnWiley & Sons Inc., New York, 1963.
10. Iwamoto, S. and Wakabayashi, K.A. "Study on the Damping Characteristics of Torsional Vibration in Diesel Engines", (Part I). J. Marine Eng. Soc., Vol. 19, No.4, pp. 34-39, 1985.
11. Wang, Y. and Lim, T.C. "Prediction of Torsional Damping Coefficients in Reciprocating Engine". J. Sound Vibr., Vol. 238, No. 4, pp. 710-719, 2000.
12. Honda, Y. and Saito, T. "Dynamic Characteristics of Torsional Rubber Dampers and Their Optimum Tuning", SAE Technical, Vol. 18, No. 3, pp. 870580, 1987.
13. I.D.E.M institute, Catalogue of OM457 engine, pp.1-4, (In Persian).
14. Martin, A. and GeorgeHenry, B. "Kinematics and Dynamics of Machines", McGraw-Hill, New York, 1982.
15. Church, A. "Mechanical Vibrations", John Wiley and Sons, Inc., New York, 1957.
16. AVL\AWS V5.1 Manuals\EXCITE Power Unit\ EXCITE_Designer_Theory.
17. Challen, B. and Baranescu, R. "Diesel Engine Reference Book", Chapter 10, Butter Worth-Heinemann, Oxford, Second Edition, 1999.
18. Bijari, A., Keshmiri, S., and ZangoeeMotlagh, M. "Modeling of Thermoelastic Damping in Bulk-Mode Vibrations of Micromechanical Ring Resonator Using Energy Method. Aero. Mech. J. Vol. 8 No. 3, pp. 35-50, 2012 (in Persian).
19. Engine Institute, Catalogue of Torsional Tests on OM457 (in Persian).



شکل (۱۸): بحرانی ترین اجزاء در میل لنگ.

۵- پیشنهادات

- ۱- با توجه به اینکه وب نه بحرانی ترین عضو در تحلیل ارتعاشاتی مشخص شده، بهتر است در ساخت آن از مواد با مقاومت بیشتر نسبت به دیگر اعضای میل لنگ استفاده گردد تا از ایمنی و قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار گردد.
- ۲- همان گونه که عنوان گردید احتراق ناقص از جمله مواردی است که در موتورهای دیزل به وفور رخ می دهد، پس دقت نظر بیشتر روی این موضوع به طراحی بهتر خواهد انجامید. از این رو با توجه به تحلیل های انجام گرفته و نتایج حاصل، می توان روی این دو مورد برای بهبود وضعیت موجود کار کرد:
 - ۱- تغییر شکل و اندازه سوراخ نازل،
 - ۲- خط انژکتور قوی تری برای سیلندره های یک و سه انتخاب گردند.

۴- نتیجه گیری

- ۱- همان گونه که در شکل ۱۸ نمایش داده شده است، وب های ۴، ۵، ۶ و ۹ بحرانی ترین اجزاء در میل لنگ هستند.
- ۲- سیلندره های یک و سه بیشترین تأثیر را بر روی جابه جایی زاویه ای سر آزاد میل لنگ در حالت احتراق ناقص دارند.

۶- مراجع

1. Larmi, M. "Torsional Vibration Calculation Vibration and Engine Damping", CIMAC Congress, 1998.
2. Karimaei, H. and Mehrgou, M. "Study of Torsional Vibration and Crankshaft Life In a 6 Cylinder Heavy Duty Diesel Engine", Proc. of the Sixth Int. Conf. on Internal Combustion Engines, pp. 17-19, November 2009.
3. Mendes, A., Meirelles, P., and Zampieri, D. "Analysis of Torsional Vibration in Internal Combustion Engines: Modeling and Experimental Validation", JMBD126, © Imech, pp. 155-178, 2008.