

تحلیل عددی رفتار دینامیکی دو شفت متداخل در موتور دوار زوج روتور

علی باقری زیده سرایی^۱، محمدرضا زمانی^{۲*}

^۱ ایران، تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۷۷۴۱۵۸۷۵، دانشجوی کارشناسی ارشد

^۲ ایران، تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۷۷۴۱۵۸۷۵، استادیار

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a_mrzamani@mut.ac.ir

چکیده

موتور دوار زوج روتور؛ مولد قدرت احتراق داخلی پیشرفته، با حجم و ابعادی کوچکتر از موتورهای پیستونی متداول و کارآمدتر از موتور وانکل است. در موتور دوار موردنظر، پیستونها، متصل به دو روتور هستند که در یک جهت حول محوری واحد، دوران هارمونیک دارند. ویژگیهای منحصر به فرد اعم از سبکی، ابعاد کوچک، قطعات بسیار کمتر از موتورهای متداول، راندمان مکانیکی و حرارتی بالا، مصرف سوخت پایین در عین داشتن توان بالا و بهره‌مندی از مکانیزمهای پیشرفته تولید توان و تبدیل و انتقال با سطح بالای فناوری، زمینه پژوهشی گسترده‌ای را برای جایگزینی در صنایع پیشرفته هوایی، دریایی، زمینی و... فراهم می‌کند. هدف اصلی در این مقاله بررسی رفتار دینامیکی دو شفت متداخل در موتور دوار زوج روتور، با در نظرگیری واحد تولید توان و رابط مکانیزم دیفرانسیلی موتور برای استخراج فرکانسهای طبیعی و دور بحرانی شفتها می‌باشد. ابتدا به معرفی واحدهای تشکیل دهنده موتور و نحوه کارکرد آن پرداخته شده و سپس مدل شفت‌های متداخل با یاتاقانها و جرم‌های متصل، از مقاله مرجع، استخراج و با کمک نرم‌افزار المان محدود انسیس^۳، با تحلیل و نتایج آن صحت‌گذاری شده است. سپس مدل هندسی شفت‌های متداخل در موتور دوار زوج روتور به همراه جرم‌های متصل به آن، در نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی شد و فرکانسهای طبیعی و دور بحرانی شفتها استخراج گردید. نتایج نشان داد که موتور دوار زوج روتور در مودهای ارتعاشی اول و دوم دارای تداخل بوده و دچار تشدید شده است که عامل اصلی آن مناسب نبودن یاتاقانهای میانی برای سرعت‌های بالای ۲۵۰۰ رادیان بر ثانیه است. همچنین موتور تا ۲۵۰۰ سرعت رادیان بر ثانیه برای مدل اولیه طراحی شده بدون هیچ نقصی، به خوبی عمل می‌کند.

کلمات کلیدی: موتور دوار زوج روتور؛ شفت‌های متداخل؛ روتوردینامیک؛ نمودار کمپبل؛

¹ Advance Rotary Engine (ARE)

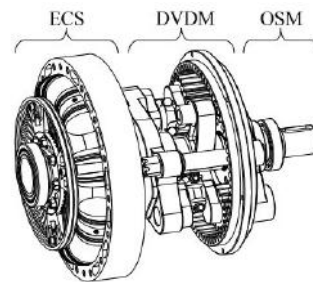
² Felix Wankel

³ ANSYS/Workbench

۱- مقدمه

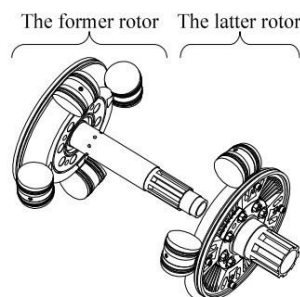
موتور دوار زوج روتور مولد قدرتی است با حجم و ابعادی کوچک‌تر از موتورهای پیستونی و کارآمدتر از موتور وانکل که جایگزین مناسبی برای این‌گونه موتورها می‌باشد. مصرف سوخت پایین در عین داشتن توان بالا، تعداد قطعات متحرک کمتر و در نتیجه اتلاف انرژی کمتر، گشتاور یکنواخت‌تر، احتراق متعدد در هر دور، عدم نیاز به مکانیزم تبدیل حرکت خطی به دورانی شامل میل‌لنگ، شاتون و... و طول عمر بالای موتور به واسطه آب‌بندی مناسب از ویژگی‌های بارز این موتور می‌باشد.

این موتور احتراق داخلی^۴ به دلیل ویژگی‌های خاص در نحوه تولید و انتقال قدرت، ابعاد کوچک، سهولت در تعمیر و نگهداری، توان وزنی بسیار بالا، گشتاور بالا در دور پایین، سبکی، راندمان مکانیکی و حرارتی بالا، هزینه تعمیر و نگهداری پایین و بهره‌مندی از مکانیزم پیچیده و پیشرفته بالا همراه با تعداد قطعات بسیار کمتر در مقایسه با سایر موتورها، قابلیت استفاده در صنایع حمل‌ونقل به‌خصوص صنایع هوایی، دریایی و حتی زمینی را دارد [۱ و ۲]. مکانیزم تبدیل و انتقال پیشرفته در این موتور، حرکت دو روتور هم‌محور را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کند تا کم و زیاد شدن حجم فضای محبوس بین دو پیستون مجاور را کنترل کند و با سرعت متناوب اما غیریکنواخت بچرخند [۳]. موتور دوار زوج روتور از دو بخش اصلی واحد تولید توان^۵ (ECS) و واحد تبدیل و انتقال قدرت^۶ (DVDM) و در نهایت خروجی^۷ (OSM) تشکیل شده است که نتیجه همبستگی و هماهنگی دو واحد تولید توان و واحد تبدیل و انتقال قدرت، عملکرد صحیح موتور دوار مدنظر را در پی خواهد داشت (شکل ۱) [۴].



شکل ۱. ساختار موتور دوار زوج روتور [۵].

واحد تولید توان متناسب با نوع طراحی و کاربرد موتور، شامل چهار یا هشت پیستون و دو روتور می‌باشد. در شکل ۲، نمونه‌ای از موتور دوار با هشت پیستون ارائه شده که چهار پیستون به یک روتور و مابقی به روتور دیگر متصل می‌باشد. در مجموعه‌ی این موتور، روتورها دارای سرعت متغیر بوده، به‌طوری که نمودار سرعت آن‌ها به‌صورت منحنی هارمونیک می‌باشد، به این صورت که سرعت یک روتور در موقعیت زاویه‌ای خاصی صفر شده و روتور دیگر در حال چرخش است و وقتی پیستون روتور متحرک نزدیک به پیستون روتور ثابت می‌شود، روتور ثابت شروع به حرکت کرده و روتور متحرک متوقف می‌شود [۴ و ۶ و ۷].



شکل ۲. ساختار روتورها و پیستون‌ها [۵].

⁴ Internal Combustion Engine

⁵ Energy Conversion System

⁶ Differential Velocity Drive Mechanism

⁷ Output Shaft Mechanism

۲- بیان مسئله پژوهش

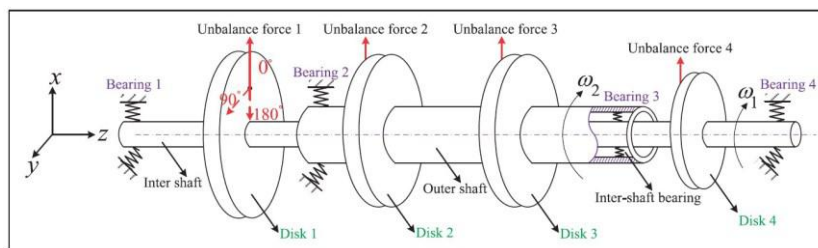
به دلیل مکانیزم خاص و نو پا بودن این موتور، گلوگاه‌های زیادی از جمله پیچیدگی تحلیل‌های عملکردی، دینامیکی، ترمودینامیکی موتور، انتخاب مواد اجزا و قطعات تحت تنش‌های حرارتی بحرانی و محیط خورنده، فناوری ساخت اجزا و قطعات، مونتاژ زیرسامانه‌های موتور (بنا به تفرانس‌های دقیق) و ... وجود دارد. یکی از گلوگاه‌ها (بحث اصلی این پژوهش)، رفتار دینامیکی شفت‌های متداخل است.

در این موتور حرکت دورانی مستقیماً از طریق محوری از روتور به مکانیزم تبدیل و انتقال قدرت و سپس به‌وسیله نقلیه منتقل می‌شود، این بدین معنی است که تمامی اجزا موتور اعم از: پیستون‌ها، بخش‌هایی از مکانیزم انتقال قدرت، سیستم خنک‌کاری و روان‌کاری وابسته به کارکرد صحیح محور اصلی موتور می‌باشد. این محور اصلی متشکل از دو شفت متداخل همراه با الگوی حرکتی منحصربه‌فرد خود است [۸]. با توجه به این‌که بخش‌هایی از اجزاء واحد تولید و انتقال قدرت در موتور دوار مدنظر بر روی شفت‌های متداخل نصب می‌شوند و عملکرد موتور را میسر می‌نمایند، انجام تحلیل‌های دینامیکی و سرعت بحرانی بسیار ضروری و حائز اهمیت می‌باشد. پارامترهایی نظیر نوع تماس بین شفت‌ها (یاتاقانی، روغنی، خشک و ...)، جرم‌های متمرکز و غیرمتمرکز، هم‌محور بودن شفت‌ها، ابعاد هندسی، سرعت و شتاب زاویه‌ای شفت‌ها و ... از موارد مهم در بررسی رفتار دینامیکی شفت‌های متداخل در کاهش دامنه و تعداد پیک‌های تشدید برای جلوگیری از آسیب در سیستم می‌باشد [۹-۱۱].

بر اساس جست‌وجوهای انجام شده، پژوهشی در زمینه بررسی رفتار دینامیکی شفت‌های متداخل این موتور دوار یافت نشده است. در ادامه به صحت سنجی مدل بازتحلیل المان محدود موجود در مقاله مرجع و تحلیل رفتار دینامیکی (استخراج نمودار کمپل و سرعت‌های بحرانی) مدل اصلی در شفت‌های متداخل موتور دوار با کمک نرم‌افزار انسیس پرداخته شده است. مقادیر هندسی، جرم‌های متمرکز، نوع یاتاقان‌ها و مش‌بندی در بخش‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

۳- بازتحلیل مدل المان محدود مرجع

در این بخش، مدل روتور دینامیکی ارائه شده در مقاله‌ی پژوهش مرجع [۱۲] در نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از باز تحلیل آن استخراج گردیده است. این صحنه‌گذاری منجر به ایجاد اطمینان خاطر نسبت به نتایج تحلیل عددی مدل شبیه سازی شده از شفت‌های متداخل موتور دوار زوج روتور خواهد شد. در شکل ۳ نمایی از مدل شبیه‌سازی شده در مقاله صحت سنجی مشاهده می‌شود.



شکل ۳. نمایی از شفت‌های متداخل ارائه شده در مقاله صحت‌سنجی [۱۲].

همچنین اطلاعات مربوط به جرم و ممان اینرسی دیسک‌ها و ابعاد هندسی شفت‌ها به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ قابل مشاهده است.

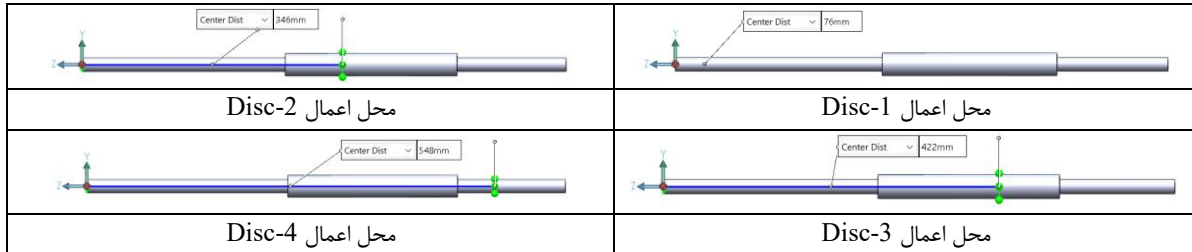
جدول ۱. اطلاعات مربوط به جرم و ممان اینرسی اجرام متمرکز شکل ۳ [۱۲].

دیسک‌ها	۱	۲	۳	۴
جرم m (kg)	۲/۰۳۵	۰/۹۶۸	۲/۰۵۳	۲/۰۷۳
ممان J _d (kgm ²)	۲/۲۹×۱۰ ^{-۳}	۱/۲۳×۱۰ ^{-۳}	۲/۴۹×۱۰ ^{-۳}	۲/۴۶×۱۰ ^{-۳}
ممان J _p (kgm ²)	۴/۴۴×۱۰ ^{-۳}	۲/۴۴×۱۰ ^{-۳}	۴/۸۲×۱۰ ^{-۳}	۴/۷۷×۱۰ ^{-۳}

جدول ۲. ابعاد هندسی شفت‌ها [۱۲].

شفت‌ها	طول شفت (میلی‌متر)	قطر خارجی (میلی‌متر)	قطر داخلی (میلی‌متر)
شفت داخلی	۶۴۳	۱۸	۰ (توپر)
شفت خارجی	۲۲۸	۲۴	۳

اطلاعات هندسی موجود در مقاله برای شبیه‌سازی، موقعیت قرارگیری شفت‌های متداخل نسبت به یکدیگر و موقعیت استقرار جرم‌های متمرکز (دیسک‌ها) طبق بررسی‌های انجام در مقاله مرجع برآورد شده است. لذا بر اساس شکل‌های شماتیک موجود در مقاله (شکل ۳)، ابعاد و موقعیت قرارگیری یاتاقان‌ها استخراج گردید که در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. ابعاد هندسی برآورد شده از مقاله مرجع.

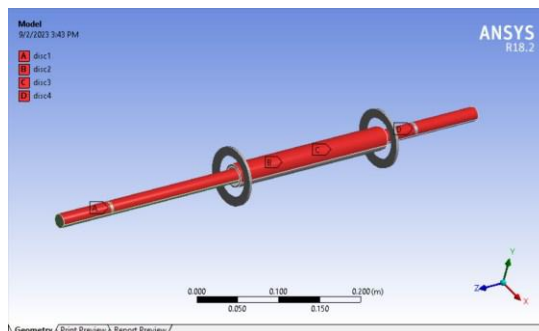
اطلاعات دینامیکی یاتاقان‌های موجود در سیستم شفت‌های متداخل در جدول ۳ نشان داده شده است. فرضیات زیر برای یاتاقان‌ها در نظر گرفته شده است:

- یاتاقان‌ها به صورت متقارن در نظر گرفته شده است و $K_{xx}=K_{yy}$.
- اثرات برهم‌کنش^۸ نیز برای یاتاقان‌های در نظر گرفته نشده است و $K_{xy}=K_{yx}=0$.
- میرایی یاتاقان‌ها صفر است: $C_{xx}=C_{yy}=C_{xy}=C_{yx}=0$.
- سفتی دینامیکی یاتاقان‌ها ثابت در نظر گرفته شده است و با سرعت تغییر نمی‌کند. این فرضیه در مورد یاتاقان‌های ساچمه‌ای^۹ صحیح و قابل قبول است.

جدول ۳. پارامترهای دینامیکی یاتاقان‌های مورد استفاده در مقاله صحت‌سنجی [۱۲].

یاتاقان‌ها	۱	۲	۳	۴
سفتی (N/m)	$۶/۱۱ \times ۱۰^۶$	$۵/۰۲ \times ۱۰^۶$	$۳/۵۸ \times ۱۰^۶$	$۴/۳۸ \times ۱۰^۶$

با استفاده از اطلاعات ارائه شده در جداول ۱ تا ۳ و تعیین محل قرارگیری یاتاقان‌ها، مدل روتوردینامیکی شفت‌های متداخل در محیط نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی شد. چهار دیسک به صورت چهار جرم متمرکز در مدل روتوردینامیکی اعمال گردید که نتیجه نهایی در شکل ۵ نشان داده شده است. باید در نظر داشت که دیسک ۱ و ۴ بر روی داخلی و دیسک ۲ و ۳ بر روی بیرونی قرار گرفته است.

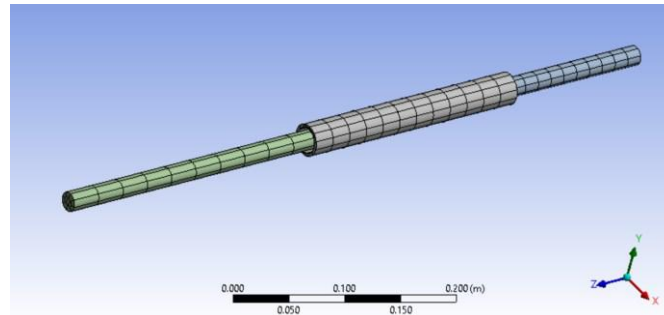


شکل ۵. نتیجه نهایی اعمال جرم‌های متمرکز در چهار نقطه از شفت‌ها.

^۸ Cross Coupling

^۹ Ball bearing

به دلیل عدم پیچیدگی خاص مدل هندسی، از مش بندی ساده و خودکار نرم‌افزار (Structured hexahedral Mesh) برای تحلیل روتوردینامیکی استفاده شده است که در شکل ۶ نمایی از این مش بندی نشان داده شده است.



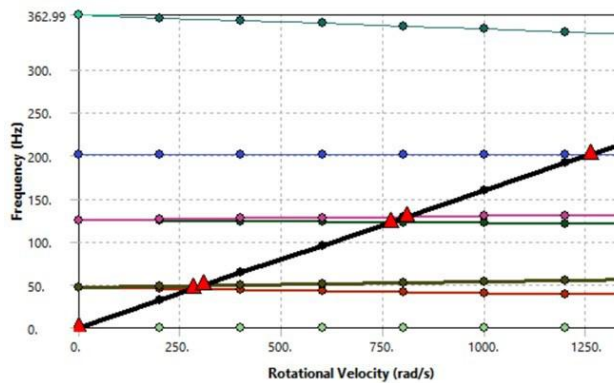
شکل ۶. شبکه‌بندی مورد استفاده برای تحلیل روتوردینامیکی شفت‌های متداخل.

در شکل ۷ نتایج مربوط به فرکانس‌های طبیعی سیستم غیر دوار ارائه شده است که ستون سمت راست از مقاله مرجع [۱۲] استخراج شده و ستون چپ نتایج شبیه‌سازی مدل بازتحلیل آن است که تطابق بسیار خوبی با نتایج مقاله مرجع دارد.

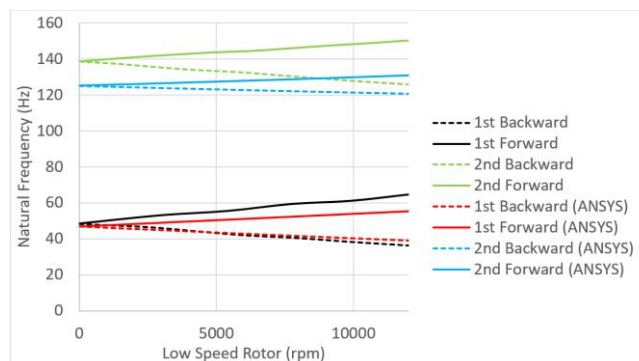
نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار ANSYS/Workbench	نتایج مقاله
<p>1st Natural frequency = 46.932 Hz</p>	<p>1st Natural Frequency = 48.701 Hz</p>
Error = 3.6%	
<p>2nd Natural frequency = 125.17 Hz</p>	<p>2nd Natural Frequency = 139.73 Hz</p>
Error = 10.4%	
<p>3rd Natural Frequency = 362.75 Hz</p>	<p>3rd Natural Frequency = 359.05 Hz</p>
Error = 1.0%	
<p>4th Natural Frequency = 363.07 Hz</p>	<p>4th Natural Frequency = 361.63</p>
Error = 0.4%	

شکل ۷. مقایسه نتایج تحلیل روتوردینامیکی مقاله مرجع و بازتحلیل آن در نرم‌افزار انسیس.

برای مقایسه فرکانس‌های طبیعی سیستم دوار از نمودار کمپبل استفاده شده است. شکل ۸ نمودار کمپبل موجود در مقاله مرجع را نشان می‌دهد. مقایسه نمودارهای مقاله مرجع و بازتحلیل المان محدود آن در شکل ۹ همراه با مودهای Backward و Forward نشان داده شده است.



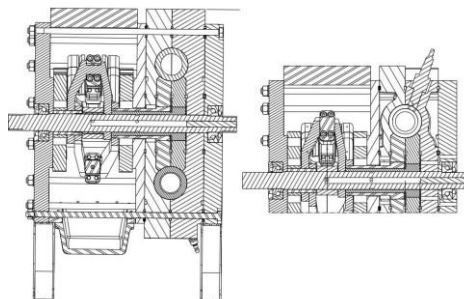
شکل ۸. نمودار کمپبل تحلیل روتوردینامیکی شفت‌های متداخل موجود در مقاله مرجع [۱۲].



شکل ۹. مقایسه نمودار کمپبل تحلیل روتوردینامیکی شفت‌های متداخل (مقاله صحت‌سنجی و تحلیل انیسی).

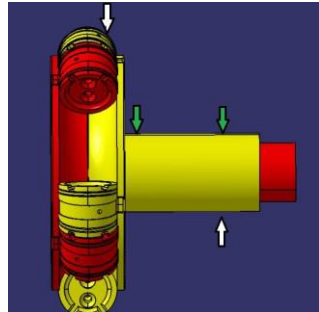
۴- تحلیل المان محدود شفت‌های متداخل موتور دوار زوج روتور

در بازنگری مدل المان محدود مرجع، نحوه مدل‌سازی هندسه شفت‌ها، جرم‌های متمرکز، پارامترهای ورودی و نتایج شبیه‌سازی به تفصیل شرح داده شد. در این بخش، فرآیند شبیه‌سازی و پارامترهای ورودی مانند سفتی یا تاقان‌ها همانند قبل خواهد بود، با این تفاوت که شفت‌ها، دیسک‌ها و جرم‌های متمرکز از نظر جنس و ابعاد با مدل هندسی موتور دوار زوج روتور جایگزین شده و ممان اینرسی اجزای مکانیزم تبدیل و انتقال در موتور که به‌طور مستقیم بر نتیجه تحلیل شفت‌ها تأثیر دارند ساده‌سازی شده و به‌صورت جرم متمرکز اعمال شدند. در شکل ۱۰ نمای برش خورده از موتور دوار زوج روتور قابل مشاهده است.



شکل ۱۰. نمای جانبی و نمای از بالا به‌صورت برش خورده [۴].

همچنین در شکل ۱۱ مدل هندسی شفت‌ها و روتورهای متصل به آن قابل مشاهده است که محل قرارگیری یاتاقان‌های میانی با رنگ سفید و یاتاقان‌های خارجی با رنگ سبز مشخص شده است (بخش‌های هم‌رنگ به یکدیگر کوپل هستند). قابل ذکر است که اجزای مدنظر در مکانیزم تبدیل و انتقال قدرت موتور دوار، به‌منظور ساده‌سازی، در مدل المان محدود به‌صورت جرم متمرکز شبیه‌سازی شده‌اند.



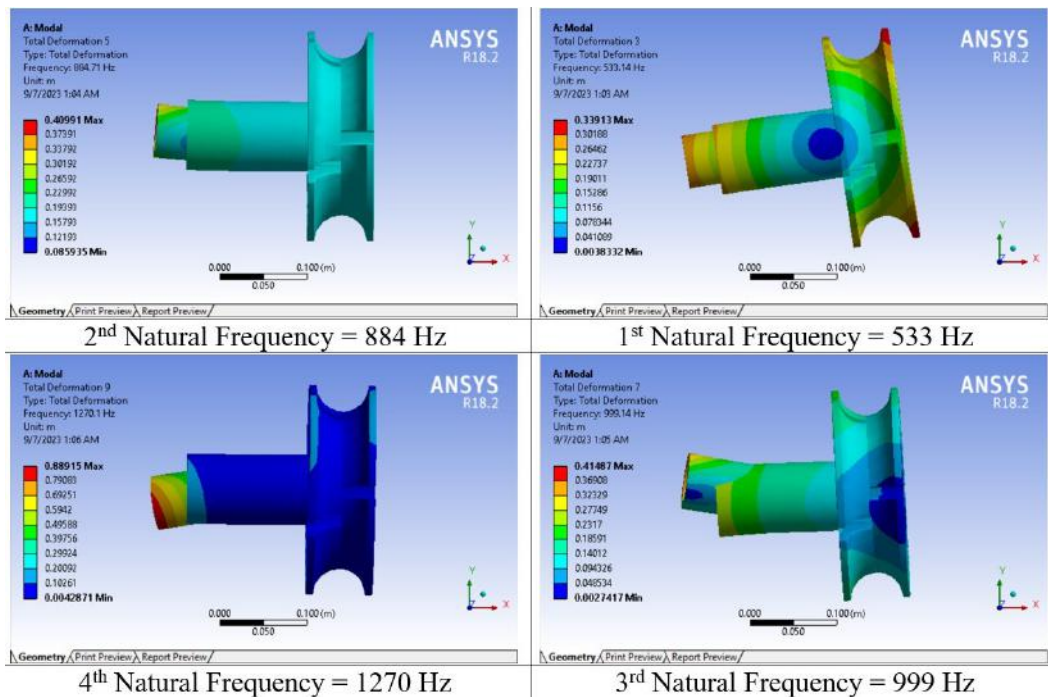
شکل ۱۱. نمایی از شفت‌های متداخل همراه با دیسک‌ها و یاتاقان‌ها.

در جدول ۴ ابعاد هندسی شفت‌های موتور دوار زوج روتور قابل مشاهده است.

جدول ۴. ابعاد هندسی شفت‌ها.

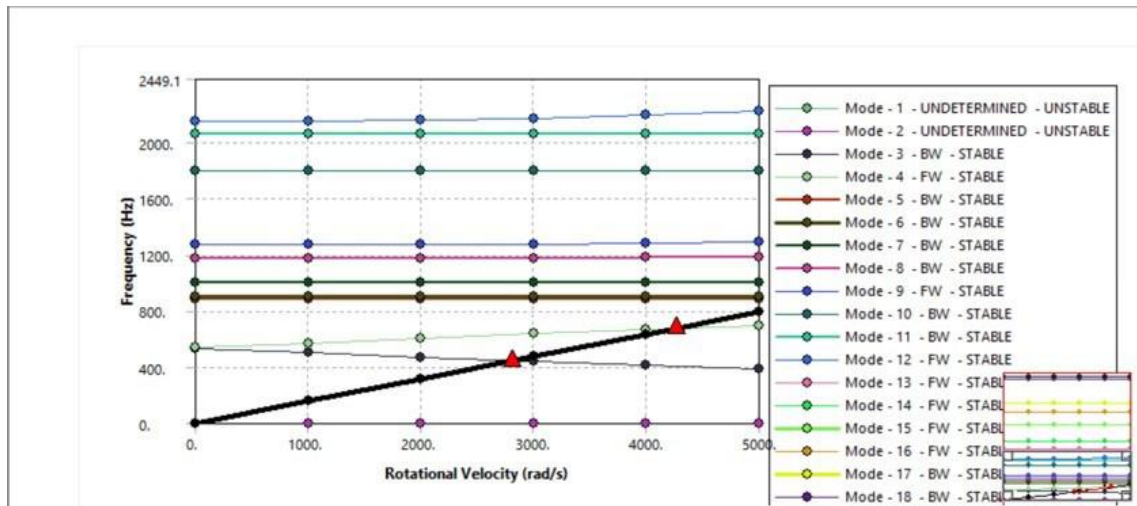
شفت‌ها	طول شفت (میلی‌متر)	قطر خارجی (میلی‌متر)	قطر داخلی (میلی‌متر)
شفت خارجی	۲۰۰	۹۰	۷۵
شفت داخلی	۲۷۰	۷۰	۵۵

بر اساس فرضیات در نظر گرفته شده برای مدل هندسی شفت‌ها، نتایج تحلیل روتوردینامیکی برای سیستم غیر دوار و دوار در نرم‌افزار انسیس ارائه می‌گردد. فرکانس‌های طبیعی سیستم غیر دوار به همراه شکل مود آن‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲. نتایج تحلیل روتوردینامیکی در نرم‌افزار انسیس.

نمودار کمپیل برای تحلیل روتوردینامیکی دو شفت متداخل در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳. نمودار کمپبل تحلیل روتوردینامیکی شفت‌های متداخل.

با استخراج نمودار کمپبل (شکل ۱۳)، نتایج آنالیز مودال به ازای ۱۸ مود ارتعاشی و سرعت‌های دورانی مختلف (صفر تا ۵۰۰۰ رادیان بر ثانیه) به دست می‌آید. فرکانس‌های طبیعی دو شفت و فرکانس تحریک در این نمودار قابل مشاهده می‌باشد. در محدوده کاری موتور نقاطی که فرکانس‌های طبیعی اول و دوم شفت‌ها با فرکانس‌های تحریک متداخل پیدا می‌کنند (مود ارتعاشی اول و دوم)، نقاطی هستند که در آن پدیده تشدید رخ می‌دهد و موجب ناپایداری سیستم در موتور دوار می‌شود. در سایر مودها وضعیت پایدار بوده و هیچ تداخلی در فرکانس‌های طبیعی و فرکانس‌های تحریک تا دور ۵۰۰۰ مشاهده نمی‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

- ۱- با توجه به مدل استخراج شده از مقاله صحت سنجی و دستیابی به نتایج موجود در مقاله، می‌توان از صحت تحلیل انجام شده در شبیه‌سازی مدل المان محدود شفت‌های متداخل موتور دوار زوج روتور اطمینان حاصل کرد.
- ۲- با استفاده از مدل المان محدود در نرم‌افزار انسیس، مشخصات دینامیکی شفت‌های متداخل موتور دوار زوج روتور به‌طور کامل توسط نمودار کمپبل و سرعت‌های بحرانی استخراج شد.
- ۳- برای مدل اولیه طراحی شده از موتور دوار زوج روتور، برای سرعت‌های ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ رادیان بر ثانیه نتایج قابل قبولی را ارائه شده است.
- ۴- محل قرارگیری و سفتی یاتاقان‌های بیرونی برای شفت خارجی مناسب بوده و می‌تواند در پژوهش‌های بعدی نیز مورد استفاده قرار گیرد.
- ۵- با توجه به این‌که جنس و ضخامت شفت‌های متداخل در تحلیل‌های استاتیکی نتایج قابل قبولی را به همراه داشته، سفتی و محل قرارگیری یاتاقان‌ها میانی نیازمند تجدیدنظر بوده و با بررسی مجدد سفتی به پایداری دینامیکی موتور در دورهای بالاتر دست یافت.
- ۶- با توجه به جست‌وجوهای انجام شده، تحلیلی در رابطه با رفتار دینامیکی شفت‌های متداخل موتور دوار زوج روتور (ARE) یافت و یا منتشر نشده است و اغلب پژوهش‌ها در حوزه مکانیزم‌های تبدیل و انتقال قدرت موتور دوار بوده است. بنابراین این پژوهش می‌تواند مرجع قابل استنادی در پژوهش‌های آتی باشد.

مراجع

1. H. Deng, C. Y. Pan, X. J. Xu, X. Zhang, "Mathematical Modeling and Analysis of Gas Torque in Twin-Rotor Piston Engine", J. Cent. South Univ., Vol:20(12), pp:3536-3544 Doi:10.1007/s11771-013-1879-y, (2013).

2. B. Laboo, "The Massive-Yet-Tiny Engine: A comparison of OEM claims", Land Warfare Conference, (2012).
3. T. Zou, C. Pan, H. Xu, X. Zhang, H. Chen, "Numerical Calculation of Air Mass Flow in a Dual-Rotor Piston Engine", Appl. Mech. Mater, Vol:390, pp:306-312, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.390.306, (2013).
4. ع. باقری زیده سرایی, م. زمانی, م. زارع تبار, "بررسی چرخه عملکرد و مکانیزم‌های تولید توان و تبدیل و انتقال موتور دوار زوج روتور", اولین همایش بین‌المللی و سومین همایش ملی پیشرفته‌های دریایی, پژوهشکده مهندسی خودرو, دانشگاه علم و صنعت تهران, (۱۴۰۱).
5. T. Zou, H. Xu, C. Pan, X. Xu, H. Chen, "Mathematical Modeling and Analysis of Thermodynamic Processes in a Twin-Rotor Piston Engine", J. Cent. South Univ., Vol:21(11), pp:4163-4171, Doi:10.1007/s11771-014-2412-7, (2014).
6. X. Xu, H. Xu, H. Deng, F. Gu, C. Talbot, "An Investigation of a Hypocycloid Mechanism Based Twin-Rotor Piston Engine", Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J Mech. Eng. Sci., Vol:229(1), pp:106-115, doi:10.1177/0954406214532632, (2015).
7. X. Xu, H. Deng, C. Pan, H. Xu, "A Cam-Quadrilateral Mechanism for Power Transmission of a Twin-Rotor Piston Engine", J. Mech. Sci. Technol., Vo:28(3), pp:953-961, Doi:10.1007/s12206-013-1115-6, (2014).
8. B. V. Librovich, A. F. Nowakowski, "Analysis, Design, and Modeling of a Rotary Vane Engine (RVE)", J. Mech. Des. Trans. ASME, Vol:126(4), pp:711-720, Doi:10.1115/1.1711823, (2004).
9. B. Friskney, M. Mohammadpour, S. Theodossiades, C. Craig, G. Rapson, "Effects of Transmission Shaft Flexibility on Rolling Element Bearing Tribodynamics in a High-Performance Transmission", Mech. Mach. Theory, Vol:165(June):104440, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104440, (2021).
10. P. Yu, C. Wang, L. Hou, G. Chen, "Dynamic Characteristics of an Aero Engine Dual-Rotor System with Inter-Shaft Rub-impact. Mech. System Signal Process", Vol:166(June 2021), pp:108475, doi: 10.1016/j.ymsp.2021.108475, (2022).
11. P. Koutsovasilis, "Automotive Turbocharger Rotor Dynamics: Interaction of Thrust and Radial Bearings in Shaft Motion Simulation", J. Sound Vib., Vol:455, pp:413-429, doi:10.1016/j.jsv.2019.05.016, (2019).
12. N. Wang, D. Jiang, H. Xu, "Dynamic Characteristics Analysis of a Dual-Rotor System with Inter-Shaft Bearing", Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng., Vol:233(3), pp:1147-1158, doi:10.1177/0954410017748969, (2019).