



دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مکانیک

موضوع سمینار: مدلسازی عددی نوسانات تراست و گشتاور پروانه کشتی

نگارش
حمید باب

استاد راهنما
دکتر محمد سعید سیف

خرداد 1402

چکیده:

ارتعاشات پروانه‌ها از جمله موارد بسیار مهم و پر اهمیت برای کشتی سازان می‌تواند باشد، زیرا که اتفاقاتی همچون خرابی، خستگی و تکان خوردن‌های شدیدی که سبب آزار و اذیت خدمه و کارکنان شناور یا باعث تضعیف عملکرد سیستم‌های شناور را دارند باعث می‌شود.

به همین دلیل بررسی و ارزیابی ارتعاشاتی شناور بسیار مورد اهمیت است، از سمتی به دلیل آنکه غالب این ارتعاشات توسط سیستم‌های پیشرانش مانند پروانه ایجاد می‌شود بررسی ارتعاشاتی پروانه پر اهمیت است.

در این سمینار ابتدا به بررسی صنعت حمل و نقل دریایی و اهمیت آن می‌پردازیم؛ انواع کشتی‌ها را معرفی می‌کنیم و حوزه‌های کاربردی هر یک را بیان می‌کنیم؛ در ادامه تجهیزات مختلف شناور از جمله بدنه، موتور، پروانه و ... را معرفی می‌کنیم تا با آشنایی بهتری با کشتی، وارد شناخت عمیقت‌تری در حوزه پروانه شویم.

اهمیت پروانه از نظر ارتعاشی در پروانه سبب شده است که نحوه عملکرد پروانه، شکل ظاهری آن و مشخصه‌های عملکردی آن را معرفی کنیم تا از این موارد در بخش‌های بعدی برای مدلسازی و تخمینات استفاده کنیم؛ همچنین پروانه‌های مختلف را از نظر کارکرد معرفی می‌کنیم.

در فصل سوم مفاهیم ارتعاشی پایه‌ای را معرفی می‌کنیم، ابتدا نیروهای تحریک در محیط دریا از جمله موج و ... را تشریح و دلایل ایجاد نیروهای نوسانی را توضیح می‌دهیم، در ادامه نوسانات تراست و گشتاور، دیاگرام کمپل و safe را معرفی می‌کنیم.

بعد از معرفی‌های لازم، در بخش اصلی سمینار به مدلسازی و تحلیل ارتعاشی پروانه پرداخته ایم و توانستیم با ساخت و مدلسازی یک پروانه نمونه، نوسانات تراست و گشتاور، تحلیل تنش‌های دینامیکی و دیاگرام کمپل را برای تعیین محدوده عملکردی مناسب انجام دهیم.

کلید واژه‌ها: کشتی، پروانه، ارتعاشات، نوسانات

فهرست مطالب

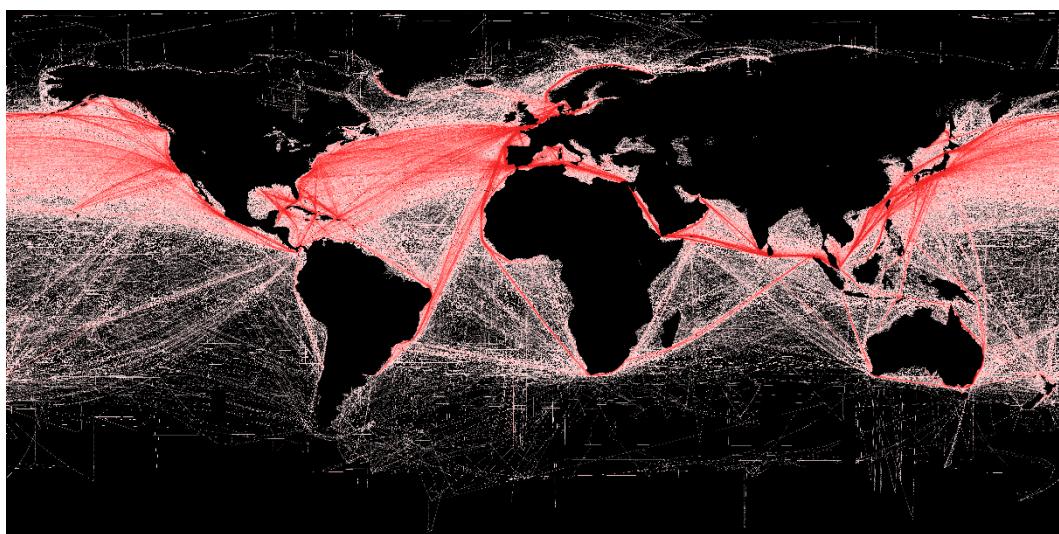
۲	چکیده.....
۶	فصل ۱: کشتی.....
۶	۱- صنعت حمل و نقل دریایی
۸	۱-۲- انواع کشتی ها
۹	۱-۲-۱- تجهیزات مختلف کشتی.....
۱۱	فصل ۲: پروانه کشتی
۱۲	۱-۲- کارکرد پروانه
۱۳	۱-۲- شکل ظاهری پروانه
۱۵	۱-۲- مشخصه های عملکردی پروانه
۱۷	۱-۲-۴- انواع پروانه ها
۲۰	فصل ۳: مفاهیم ارتعاشاتی.....
۲۰	۱-۳- نیرو های تحریک در محیط دریا
۲۵	۲-۳- (مفاهیم اولیه ارتعاشات
۲۵	۲-۳- ۱- نوسانات نیروی تراست و گشتاور پروانه
۲۹	۲-۳- ۲- دیاگرام کمپل
۳۲	۲-۳- ۳- دیاگرام safe
۳۶	فصل ۴: مدلسازی و تحلیل ارتعاشی پروانه
۳۶	۱-۴- مدلسازی پروانه
۳۸	۲-۴- محاسبات عددی با استفاده از سری های استاندارد
۴۰	۳-۴- تحلیل های ارتعاشی
۴۲	۱-۳-۴- نوسانات تراست و گشتاور
۴۳	۲-۳-۴- تحلیل تنش و جابجایی
۴۴	۳-۳-۴- ارزیابی سهم دوران در تنש و جابجایی
۴۶	۴-۳-۴- دیاگرام کمپل

۵۲	۴-۳-۵ تنش دینامیکی
۵۳	پیوست
۵۴	منابع

فصل ۱ : کشتی

۱-۱) صنعت حمل و نقل دریایی :

حمل و نقل دریایی^۱ به جابجایی افراد، کالاها و ... بهوسیله انواع شناور ها از روی دریاهای، اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها، کانال‌ها و رودخانه‌ها کالاهايی که از طریق دریا حمل می‌شوند گفته می‌شود، معمولاً این بارها دارای حجم و وزن زیادی می‌باشند. حمل و نقل در دریا امروزه از اهمیت بالایی برخوردار است، دریا گذرگاه مناسبی برای اهداف مختلف و متنوعی است که با کشتی‌ها انجام می‌شود.^{۲۰} درصد تجارت جهانی از طریق این نوع حمل و نقل صورت می‌گیرد بنابراین حمل و نقل دریایی قلب اصلی اقتصاد و تجارت جهانی است.



تصویر ۱-۱ : ترافیک دریایی در جهان

اهمیت این صنعت بگونه‌ای است که کشورها در روابط دیپلماتیک به دنبال ارتباط گرفتن و ذینفع شدن از آن هستند، کشورهای محصور خشکی^۳ که با دریای آزاد در ارتباط نیستند به دنبال برقراری ارتباط با جهان توسط دریاها و اقیانوس‌ها هستند. کشور ما از نظر جغرافیایی در یکی از استراتژیک‌ترین مکان‌های جهان قرار گرفته است؛ ما هم از شمال، به دریای خزر و از جنوب به خلیج فارس و دریای عمان متصل هستیم. این را می‌توان دلیل آن دانست که جهان، ایران را از نظر استراتژیک پراهمیت می‌داند.

حمل و نقل دریایی نسبت به بقیه روش‌ها ارزانتر بوده و به همین دلیل صاحبان کالا و شرکت‌های تجاری ترجیح می‌دهند کالای خود را از طریق مسیرهای آبی حمل کنند. از طریق کشتی‌ها حمل کالا با حجم بالا ممکن است. از طریق آب‌های آزاد محموله‌های نسبتاً سنگین تا حدود ۲۰۰ تا ۵۰۰ هزار تن را به سهولت می‌توان با یک کشتی از بندری به بندر دیگر جابه‌جا کرد که قابل مقایسه با هیچ ابزار حمل و نقلی دیگری نیست.

^۱ Maritime Transportation

^۲ LandLock

در این بخش مزیت های بسیار حمل و نقل دریایی توسط کشتی ها نسبت به حمل و نقل های دیگر اشاره می شود :

- ۱) قیمت پایینتر نسبت به سایر وسایل حمل و نقل
- ۲) ظرفیت بالای بارگیری
- ۳) تقریبا عدم نیاز به سرمایه گذاری در زمینه زیر ساخت در دریا
- ۴) ایمن تر بودن حمل و نقل دریایی
- ۵) نیروی کار کمتر

با ادامه رشد جمعیت جهان ، به ویژه در کشورهای در حال توسعه ، حمل و نقل دریایی با هزینه کمتر ، کارآمد و آسان تر نقشی اساسی در رشد و توسعه پایدار جوامع دارد. علاوه بر آنکه حمل و نقل از طریق آب همانطور که گفتیم ، آسان تر و ارزان تر است چالش های متنوعی همچون چالش های صنعتی مربوط به کشتیرانی و چالش های اقتصادی مربوط به بنگاه های اقتصادی را در پی دارد.



تصویر ۲-۱ : خروج گاز های آلاینده از اگزوز یک کشتی

یکی از چالش های اساسی آلودگی محیط زیست ناشی از سوخت کشتی ها دانست که بر محیط دریا تاثیر بسزایی می گذارد؛ در نتیجه فرآیند های احتراق در موتور کشتی ، آلاینده های مختلف را در جو منشر می کنند که اصلی ترین آنها اکسیدهای گوگرد (SO_x)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، ذرات معلق (PM) و مونوکسید کربن (CO) هستند.

در حال حاضر کشتی ها مسئول بیش از ۳٪ از انتشار گازهای گلخانه ای جهانی هستند، اگر این آلاینده ها به عنوان یک کشور گزارش می شد ، حمل و نقل دریایی هشتاد و پنجم تولید کننده بزرگ آلاینده اروپا است.

۱-۲) انواع کشتی ها



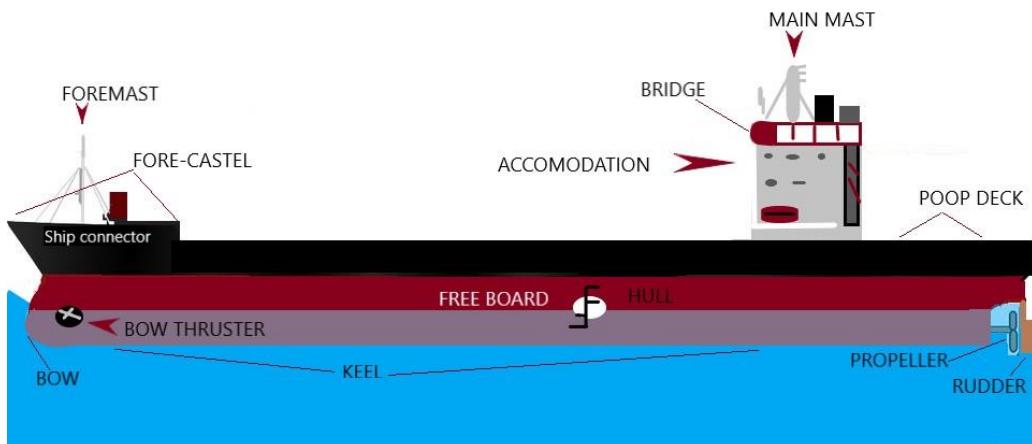
تصویر ۱-۳ : انواع کشتی های دنیا

کشتی ها کاربرد های گسترده ای در اکتشاف ، تجارت ، جنگ ، مهاجرت ، استعمار ، حمل سکوهای (حفاری یا استخراج نفتی) و ... دارند که بسته به کاربرد آنها انواع مختلفی در جهان ساخته شده است که میتوان به انواع و کاربرد و ظرفیت هر یک از آنها در جدول ۱-۱ اشاره کرد :

نام کشتی	کاربرد	حداکثر ظرفیت
Container	حمل کانتینر ها – بزرگترین شناور تجاری	۲۴۰۰۰ TEU
Bulk carriers	حمل فله های بسته بندی نشده مانند غلات ، زغال سنگ و ...	400000 DWT
Tanker	ذخیره یا حمل ، مایعات و گازها	DWT ۱۲۰,۰۰۰
General Cargo	حمل کالا های بسته بندی شده مانند مواد غذایی ، ماشین آلات ، پوشاش و ...	۲۲,۰۰۰ .TEU
O.B.O	حمل ترکیبی بار های مایع و خشک مانند نفت ، زغال سنگ ، روغن و ...	۱۰۰,۰۰۰ DWT
RO-RO	حمل وسایل چرخدار مانند اتومبیل ، کامیون ، تریلر و قطار و ..	۸۰۰۰ Vehicles
Cruise ship	جنیه گردشگری و جابجایی مسافران در هتل های لوکس و ...	passenger ۵۴۰۰

۱-۲-۱) تجهیزات مختلف کشتی

کشتی ها مانند یک شهر شناور دارای بخش های مختلف و متفاوتی هستند؛ در تمامی کشتی های مختلف، قسمت های اصلی وجود دارند که علت وجود هر یک از آنها را باید بدانیم، در شکل ۱-۳-۱ این قسمت ها بصورت شماتیک اشاره شده اند و در ادامه به معرفی مختصر از چند قسمت مهم شناور می پردازیم.



تصویر ۱-۴: انواع قسمت های مختلف شناور ها

۱- بدن^۱: کشتی دارای یک بخش آب بندی شده است که بدن نام دارد، انواع مختلفی از شکل ظاهری بدن ها وجود دارد که هر یک کاربرد های بخصوصی را دارند، این شکل از بدن باید از نظر هزینه، ملاحظات هیدرودینامیکی (پایداری، تحمل وزن و...)، ملاحظات هیدرودینامیکی (قدرت موتور و پروانه، سرعت، مقاومت و...) مورد ارزیابی قرار بگیرد و براساس کاربردی که مدنظر سازنده است انتخاب شود.

۲- بدن فوکانی^۲: خدمه و ناوبراں کشتی که مسئولیت اصلی هدایت موقعیت کشتی در هر زمانی را دارند در محیطی به نام بدن فوکانی زندگی میکنند، این محیط دارای اتاق ناوبری، خواب و استراحت، غذا و... است.

^۱ Hull

^۲ Super Structure

۳- موتور: در شناور ها، نیروی محرکه اجزایی مثل پروانه یا برق کشتی را موتور کشتی تامنی می کند.



تصویر ۱-۵: موتور کشتی

موتور نیروی لازم برای پیش روی در دریا، مانورپذیری کشتی را فراهم می کند و از آنجایی که شرایط محیطی سخت و خشن است باید دارای ایمنی لازم برای کار کرد باشد، به همین موتور های کشتی توسط شرکت های فوق تخصصی که در طراحی و ساخت موتور های دریایی تخصصی دارند تولید می شوند مانند شرکت رولز رویس که در تصویر ۱-۵ نمونه موتور تولیدی در این شرکت نمایش داده شده است.

موتور های کشتی ها انواع مختلفی هستند که از نوع بخار، دیزل، توربین گاز و الکتریکی می توان اشاره کرد که هر یک براساس اندازه و کاربرد مورد نظر کشتی انتخاب می شوند، برای کشتی های بزرگ سرعت شفت باید ۱۰۰ دور بر دقیقه و توان موتور ۱۲۰۰ مگاوات باشد که مقادیری قابل توجه است.

۴- سکان^۱: ابزاری که در کشتی برای هدایت و مانور کشتی ها استفاده می شود، سکان که در پشت بخش پروانه قرار می گیرد روی یک محور عمودی می چرخد تا با انحراف جریان، نیروی عرضی را ایجاد کنند؛ می توان با افزایش ناحیه سکان، نوع سکان بهتر و ... اثر بخشی سکان را بهبود داد. سکان های مربوط به کشتی های VLCC یا کانتیربر بیشتر مرحله عملیاتی آنها مربوط به حفظ مسیر می باشد در نتیجه زوایای آن تا ۳۵ درجه محدود می شود ولی در بعضی شناور ها این مانور پذیری اهمیت بیشتری دارد.

۵- پروانه^۲: یکی از مهمترین بخش ها در سیستم پیش رانش شناور های دریایی پروانه ها هستند که وظیفه به حرکت در آوردن شناور را دارند. در فصل بعدی با ساختار پروانه، نحوه طراحی و انواع پروانه ها بصورت دقیق تر آشنا خواهیم شد.

^۱ Rudder

^۲ Propeller

فصل ۲ : پروانه کشتنی

پروانه های امروزی از اواخر قرن ۱۹ بصورت جامع در کشتی، زیردریایی، هواپیما، هلیکوپتر، هاورکرافت، توربین و... استفاده می شوند. اگر چه استفاده از پروانه های پیچی^۱ تاریخچه شان به قرن ۳ قبل از میلاد باز می گردد اما اولین نوع از این پروانه ها توسط جیمز وات در حدود سال ۱۷۷۰ در یکی کشتی بخار استفاده شد، در ادامه رشد بیشتری کرده است تا که امروزه در تجهیزات و ابزار هایی که با سیال سر و کار دارند استفاده می شود، در تصویر ۱-۲ انواع کارکرد های پروانه ها نمایش داده شده است.



تصویر ۱-۲) انواع مختلف پروانه ها: (الف) پروانه کشتی و سکان (ب) دو پروانه^۲ در هلیکوپتر های SAR (پ) پروانه هشت پره در قایق هوايی^۳ (ت) دو پروانه دو پره ای بر هواپیمای برادران رایت (ث) پروانه سه پره ای بر هواپیمای ملخی Cessna A400M 172 (ج) دو پروانه شش پره ای بر هواپیمای ATR-72 (ح) چهار پروانه scimitar-type skyhawk با توجه به کاربرد گسترده پروانه ها می توان اهمیت ویژه علم مربوط به آن را درک کرد، در صنعت دریا تمامی شناور های لازم برای حرکت نیاز به پروانه دارند و به همین دلیل یکی از بحث های مهم و حیاتی می باشد. از جمله دلایلی که تمرکز روی پروانه ها بسیار زیاد است، این نکته می تواند باشد که انرژی که به موتور داده می شود، حدود ۵۵٪ درصد از آن توسط خود موتور با توجه بازده آن اتلاف می شود (با توجه به متغیر بودن بازده این درصد می تواند در موتور های مختلف متفاوت باشد) و در نهایت ۵۰٪ درصد از به پروانه می رسد، خود پروانه بازده ای دارد که در حالت معمول ۲۵٪ درصد از آن تلف می شود، از آنجایی که تلاش کافی برای بهبود بازده موتور ها انجام شده، در صورتی که بازده پروانه حتی با درصد های کم افزایش پیدا کند، تغییرات در مقاومت، مصرف سوخت و از همه مهم تر هزینه بهره برداری بشدت کاهش می یابد، به همین دلیل مطالعه در این بخش بسیار پر اهمیت است.

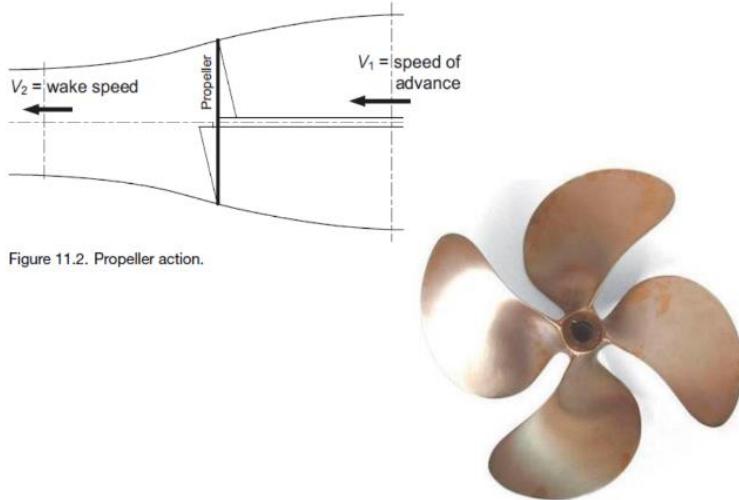
^۱ Screw Propeller

^۲ main and tail rotors

^۳ Air Boat

۲-۱) کارکرد پروانه

پروانه ها ابزاری در شناور ها هستند که به وسیله چرخش دورانی خود، به سیال اطراف نیرویی محور را وارد می کنند که سبب حرکت نسبی شناور می شود؛ این چرخش پروانه و تیغه های آن توسط یک موتور، گیربگس، شفت و ابزار های مکانیکی کنترل و ایجاد می شود.



تصویر ۲-۲) افزایش سرعت سیال طی برخورد به پروانه

بصورت دقیق تر مکانیزم کارکردی پروانه بدین صورت است که سیال با برخورد به پروانه، ممتنم می گیرد؛ در واقع سرعت سیال پشت پروانه کمتر است و بعد از برخورد به پره های پروانه این سرعت افزایش می یابد، به همین دلیل اختلاف فشاری بین سطوح جلو و عقب پره ها ایجاد می شود که سبب ایجاد نیروی رانش و جلوبرنده شناور خواهد بود.

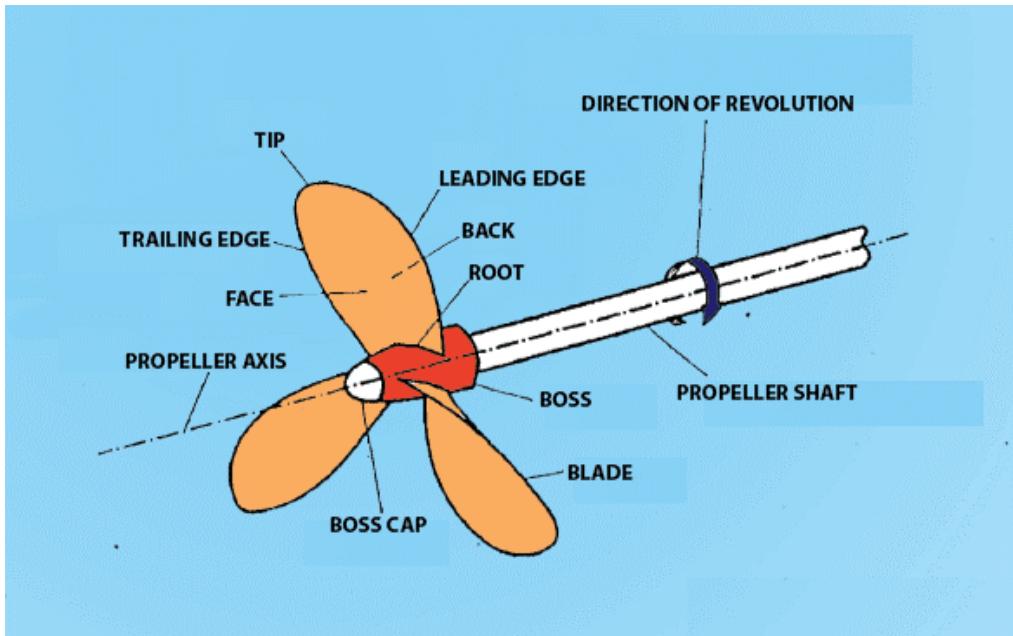
برای وسایل نقلیه ای که روی زمین حرکت می کنند، سیستم پیشرانه ای که آنها را به حرکت در می آورد متفاوت از دریا است، برای کشتی هایی که در آب جابجا می شوند، سرعت متناظر با شعاع پره پروانه می تواند متغیر باشد و بدین صورت چالش هایی از جمله اینکه گام پروانه می تواند متغیر باشد ایجاد شود که در ادامه به صورت دقیق تر این موضوع را بررسی می کنیم.

برای اینکه کشتی در جهت معکوس حرکت کند، موتور و در نتیجه پروانه در خلاف جهت عقربه های ساعت می چرخند. این کار رانش را معکوس می کند و کشتی به سمت عقب حرکت می کند.

در ادامه ویژگی های پره پروانه را بررسی می کنیم.

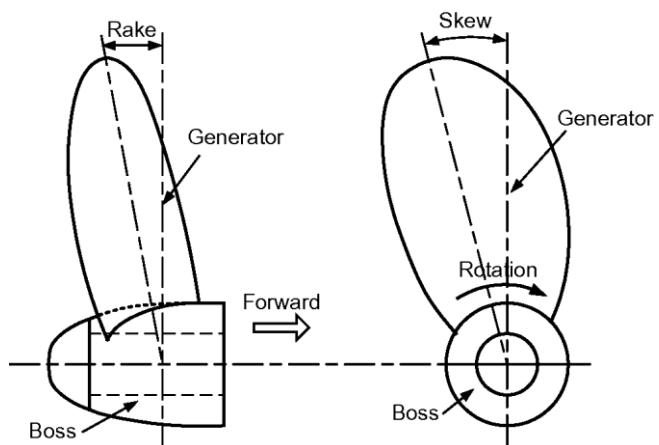
۲-۲) شکل ظاهری پروانه

برای آشنایی بیشتر با بخش های مختلف پروانه در این بخش به این موضوع می پردازیم، پروانه باید یک شکل ظاهری را داشته باشد تا در کنار آنکه تراست مناسبی را تولید کند، با بازده مناسب مصرف سوخت کمتری را داشته باشد.



تصویر ۳-۲) قسمت های مختلف پروانه

در تصویر ۳-۲ قسمت های مختلف پروانه مشخص شده اند بصورتی که بخش سمت شناور پروانه را Back و سمت خارجی آن Face نام دارد، همچنین همانطور که مشخص است پروانه توسط یک شفت به موتور که گشتاور و توان مورد نیاز را ایجاد میکند متصل است.

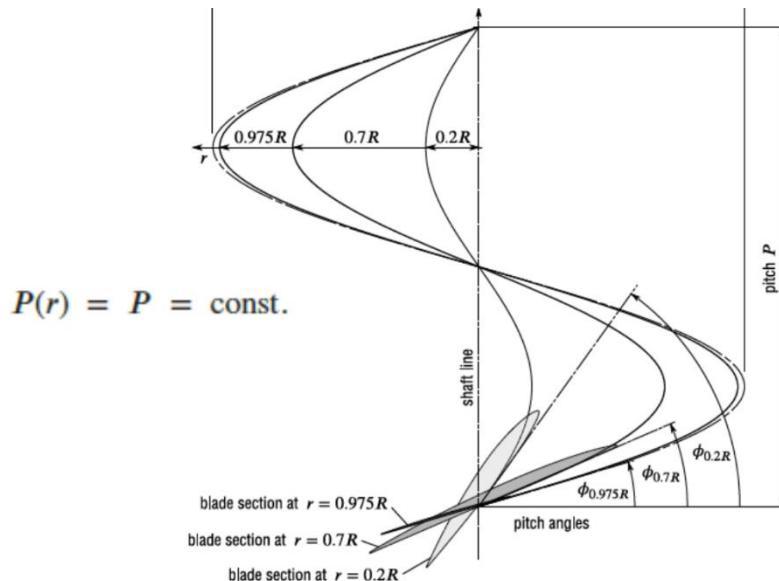


تصویر ۴-۲) زوایای انحنایی پروانه

برای آنکه بازدهی، ارتعاشات محدودتر و عدم ایجاد پدیده کاویتاسیون شکل هندسی پروانه ها بصورتی است که یک زاویه^۱ به سمت چپ یا راست و زاویه^۲ ای به سمت عقب می گیرد که در تصویر ۴-۲ مشاهده می شود.

^۱ Skew angle

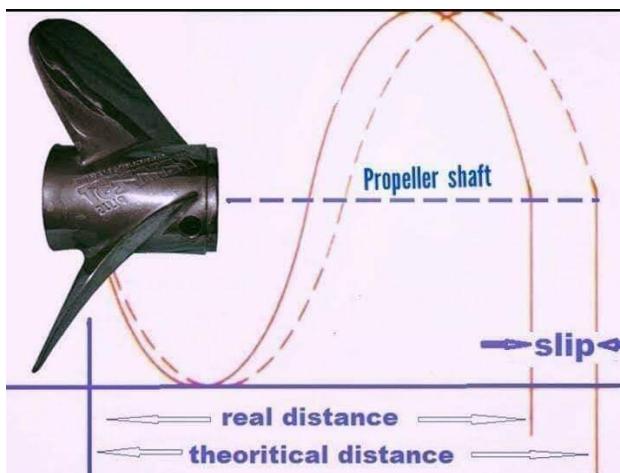
^۲ Rake angle



تصویر ۵-۲) تغییر زاویه گام در شعاع های مختلف پره

گام پروانه^۱ به مسافتی که پروانه در یک دور زدن طی می کند گفته می شود، باید دقیق کرد که سرعت در شعاع های مختلف پروانه در حال افزایش است و بدین منظور بخش هایی که دور تر هستند گام بیشتری را می توانند طی کنند، بدین منظور زاویه گام^۲ تعریف می شود که در طی شعاع پره متغیر است تا پروانه با گام ثابت حرکت کند، رابطه زاویه گام با شعاع پروانه بصورت زیر است:

$$\tan^{-1} \theta = \frac{P}{2\pi r}$$



تصویر ۶-۲) تفاوت بین مسافت طی شده ایده آل و واقعی

یکی از تفاوت هایی که پروانه ای که در هوا یا آب حرکت میکند با ابزاری که در جسم جامد حرکت میکند دارند آن است که به اندازه مقدار ایده آل حرکت انجام نمی شود؛ چون سیال روی پره های پروانه می تواند لغزش کند مقدار پیش روی کمتر از مقداری است که در نظر میگیریم و به این اختلاف لغزش پروانه^۳ گفته می شود که بسیار مهم است.

^۱ Pitch of propeller

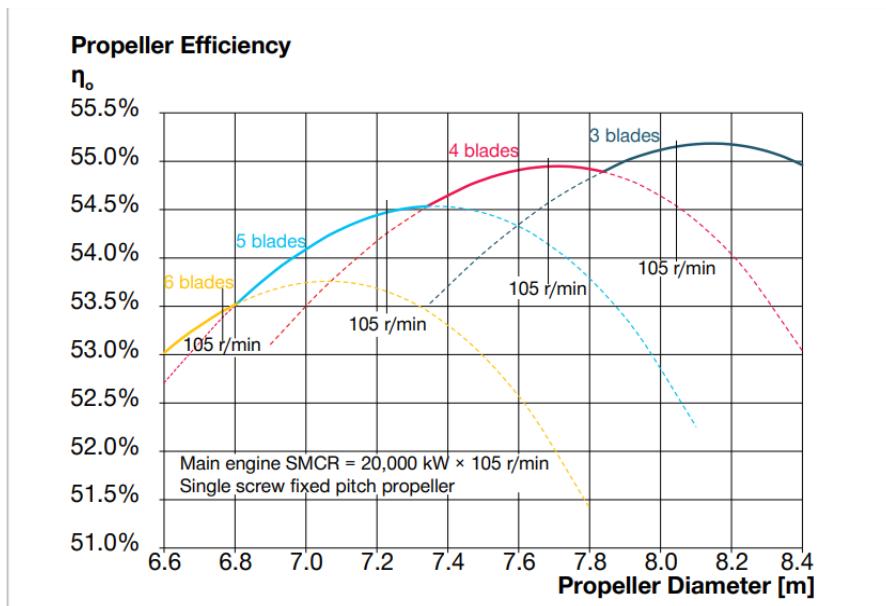
^۲ Angle of Pitch

^۳ Slip of Propeller

۲-۳) مشخصه های عملکردی پروانه

برای آنکه پروانه را از منظر های مختلفی تحلیل کنیم نیاز داریم که مشخصه هایی برای تحلیل آن داشته باشیم، در این بخش به معرفی این موارد می پردازیم.

تعداد پره^۱ های پروانه (Z) : یک پروانه به طور کلی می تواند تا هشت پره داشته باشد. برای متعادل نگه داشتن عملکرد پرواز، پهپاد یا کشتی معمولا از دو، سه یا چهار پره در هر پروانه استفاده می کنند. چند کاربرد ممکن است به پنج یا شش پره در هر پروانه نیاز داشته باشد اما غالب شناور های موجود دو تا پنج پره هستند.



تصویر ۲-۷) بازده پروانه بر حسب تعداد پره های مختلف

پره های بیشتر روی پروانه لزوماً بهتر و دارای بازدهی بهتری نیستند. پروانه ای که پره های بیشتری دارد، علارغم آنکه لرزش زیادی ندارد و در نتیجه صدای کمتری تولید می کند. و نیروی رانش بیشتری را در یک RPM مشخص تولید می کند. با این حال، آن نیز سنگین تر و مهمتر از آن، کارایی کمتری نسبت به پروانه با پره های کمتر خواهد داشت.

قطر پروانه^۲: از آنجایی که در پروانه ها قطر پروانه می تواند تاثیرگذاری زیادی روی پارامتر های مختلف داشته باشد، بسیار اهمیت دارد. در پروانه ها با افزایش دور پروانه ممکن است پدیده کاویتاسیون رخ دهد و به همین منظور برای رسیدن به تراست بیشتر مایل هستیم که قطر و اندازه مساحت سطح مقطع افزایش پیدا کند.

^۱Number of Blade

^۲ Diameter

نسبت گام^۱: به نسبت گام به قطر پروانه گفته می شود.

دور: یکی از پارامتر های بسیار مهم برای تعیین سرعت دورانی پروانه دوری است که مورد نیاز است، این دور توسط موتور باید تأمین شود، دور معمول شناور های بزرگ نفت کش و... حدود ۹۰-۱۳۰ rpm است و در شناور های کوچکتر این میزان حدود ۵۰۰-۶۰۰ rpm می باشد، همچنین برای آنکه دوری که از موتور خارج می شود را کنترل کرد از گیربکس استفاده می شود.

حال با توجه به مشخصه های گفته شده برای آنکه برای یک دور، قطر، نسبت گام و شکل هندسی مشخصی که دارد گشتاور، تراست و توان تحويلی و بازده آن را یافت باید گروه های بی بعدی را تعریف کنیم و با استفاده از این روابط این مقادیر را بیابیم.

تراست یک پروانه به موارد زیر وابسته است که با تشکیل گروه های بدون بعد از این پارامتر به رابطه های مورد نظر می رسیم:

$$T = f(p, D, Va, g, n, P, u)$$

$$\frac{T}{pn^2D^4} = f(Fr, \frac{V}{nD}, Eu, \frac{VD}{v})$$

بدین صورت پارامتر هایی را بدست آورده ایم که میتوان آن ها را مشخصه های عملکردی پروانه دانست:

$$KT = \frac{T}{pn^2D^4}$$

$$KQ = \frac{Q}{pn^2D^5}$$

$$J = \frac{V}{nD}$$

با توجه به این مقادیر میتوانیم تراست، گشتاور و بازده پروانه ها را در حالت های مختلف بیابیم که اطلاعات بسیار مفیدی را به ما می دهد.

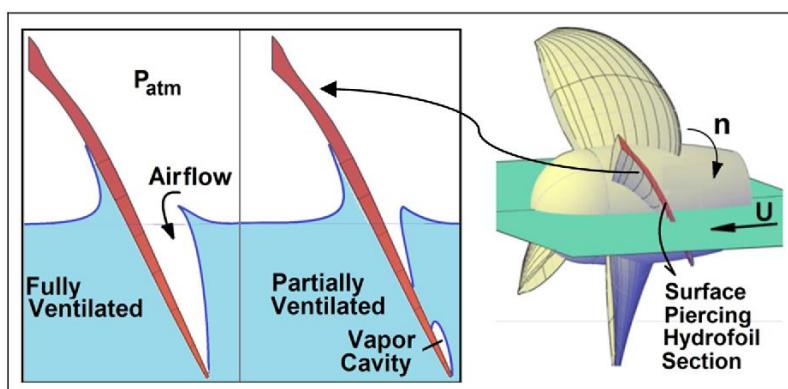
^۱ Pitch diameter ratio

۲-۴) انواع پروانه ها: پروانه ها از آنجایی که برای شناور هایی با کارکردهای مختلف استفاده می شوند دسته بندی های متنوعی را دارند که در ادامه به آن می پردازیم.

هزیر کاویتاسیون^۱: پروانه هایی که شکل هندسی پره های آن بصورتی است که به حد کاویتاسیون نباید برسند و دور های پایینی را دارند گفته می شود، این پروانه ها غالبا در کشتی هایی با سرعت های پایینتر استفاده می شوند.

فوق کاویتاسیون^۲: این پروانه ها معمولا در کشتی های جنگی، قایق های مسابقه ای استفاده می شوند که سرعت های بالایی دارند، پروانه فوق کاویتاسیون به صورت غوطه ور با تمام قطر تیغه زیر خط آب کار می کند. تیغه های آن گوهای شکل هستند تا در لبه جلویی حفره ایجاد کنند و از اصطکاک پوست آب در تمام قسمت جلویی جلوگیری کنند. از آنجایی که حفره به خوبی در پشت تیغه فرو می ریزد، پروانه از آسیب خوردگی ناشی از کاویتاسیون که مشکل پروانه های معمولی است جلوگیری می کند.

پروانه های سطحی^۳:



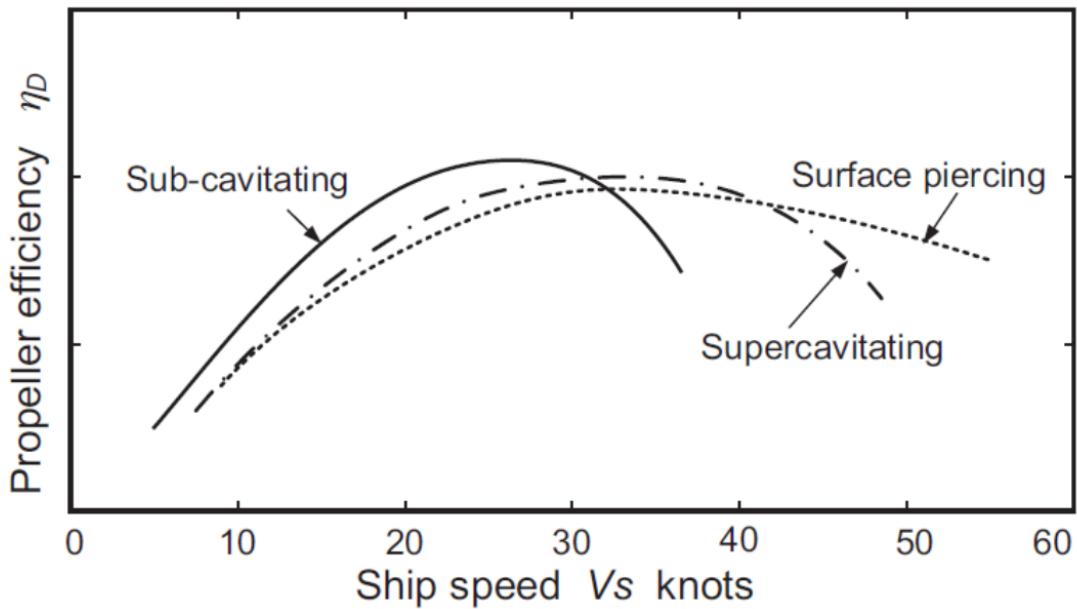
تصویر ۲-۸) نحوه عملکرد پروانه سطحی

بعضی از پروانه ها روی سطح کار میکنند. راندمان این نوع پروانه ها بالا است. یکی از فواید بسیار مهم همانطور که در تصویر ۲-۸ نمایش داده شده است آن است که با ایجاد بخار های هوا، بخار هوا خارج می شود و پدیده کاویتاسیون رخ نمی دهد.

^۱ Sub-Cavitating

^۲ Super-Cavitating

^۳ Surface Piersing



تصویر ۹-۲) مقایسه بازده پروانه های فرو کاویتاسیون، فوق کاویتاسیون و سطحی

دو پروانه ای^۱:



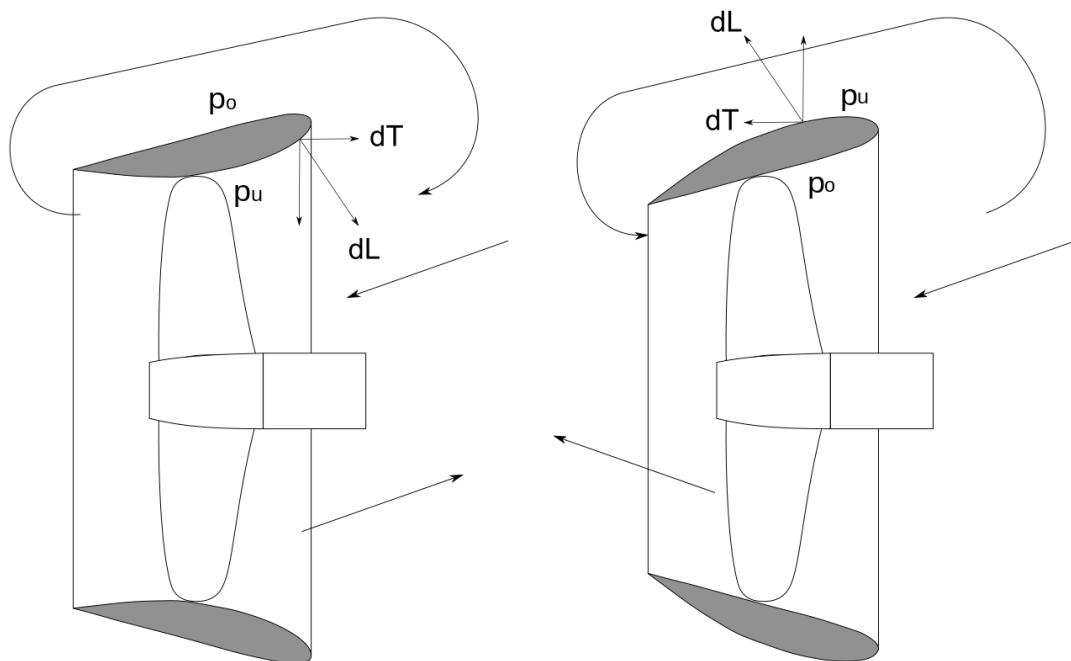
تصویر ۱۰-۲) پروانه دوبل در زیردریایی

همانند توربین های بخار، در پروانه های دوبل هر چه تعداد مراحل زیادتر باشد باعث می شود که انرژی بهینه تر استفاده شود، در واقع سیال زمانی که به پروانه اول برخورد می کند سرعتش افزایش می یابد و سپس در برخورد به پروانه دوم سرعت بیشتری را دارد، همچنین در کشتی هایی که طول بزرگی را دارند ممان های بزرگی ایجاد می شود که سبب تغییر جهت اندکی می شود که ممکن است بتوانیم از آن صرف نظر کنیم، اما در زیردریایی یا اژدر ها این تغییرات اندک باعث خطا در عملیات خواهد شد و به همین دلیل از این پروانه ها استفاده می شود.

¹ Double Propeller

پروانه های کنترل کننده گام!: این پروانه ها معادل آن است که گیربگس های متغیری در بین موتور و پروانه قرار بگیرد، بدین صورت که با تغییر گام و در نتیجه سرعت گردش باعث تغییر توان و بهینه شدن عملکرد پروانه خواهد شد؛ در واقع این نوع پروانه ها غالبا در شناور های ماهیگیری، یدک کش ها و... استفاده می شود که تغییرات سرعت بالایی دارند.

داقت^۲:



تصویر ۱۱-۲) انواع شکل های ایرفویل

پروانه هایی که دارای پوسته ای در بخش خارجی هستند که سبب می شود جریان بهتر هدایت شود تا بازدهی و راندمان پروانه افزایش بیابد، همچنین می تواند این پوسته ها در صفحه بچرخد و به نیروی ایجاد شده توسط پروانه ها جهت بدهد، از جمله معایب این نوع پروانه ها افزایش کاویتاسیون آنها می باشد.

در فصل بعدی برای آشنایی بیشتر با ارتعاشات پروانه به معرفی نیرو های تحریک، مفاهیم ارتعاشی می پردازیم.

^۱ Controllable Pitch of propeller (CP)

^۲ Ducts

فصل سوم : مفاهیم ارتعاشاتی

۳-۱) نیرو های تحریک در محیط دریا

پروانه ها غالباً علت اصلی سر و صدا و ارتعاش کشتی ها هستند و باعث کاهش بازدهی، خرابی های زیاد و... می شوند. در برخی موارد، ارتعاشات ناشی از پروانه حتی ممکن است به اندازه کافی بزرگ باشد که باعث آسیب خستگی به ساختار کشتی شود. استانداردهای متعددی برای بررسی سر و صدای کشتی درونی، ارتعاش و انتشار نویز از راه آب وجود دارد. نیروهای ارتعاشی و صدای ناشی از پروانه ها را می توان بر اساس نوع تحریک سازه کشتی به دو قسمت اصلی تقسیم کرد، یک دسته بخش صلب و نوع دیگر الاستیک است؛ بخش اول تحت عنوان دریامانی^۱ بررسی می شود و بخش دوم که بخش اصلی ارتعاشات است در ادامه بررسی می شود؛ تحریکات دریایی می توانند محوری، خمشی و پیچشی باشند.

نیرو های نوسانی می توانند ناشی از موج دریا که بر کشتی وارد می شود باشند که سبب خمش بدن می شود، همچنین جریان های گردابه ای که به پروانه وارد می شود سبب ایجاد نیرو های ناپایایی می شوند و نیرو های نوسانی را ایجاد می کنند.

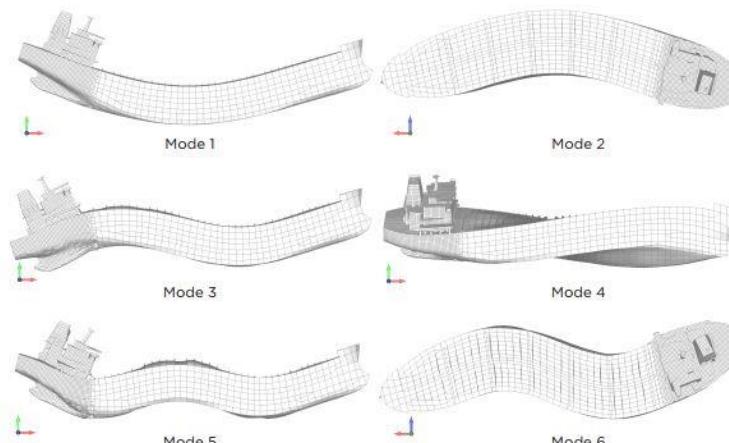
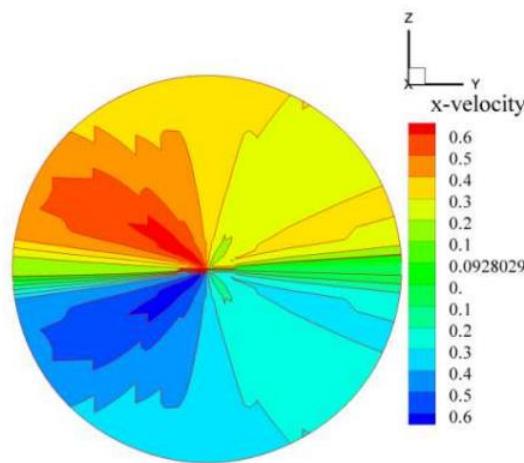


Figure 2 – First six global natural vibration modes of a cargo vessel

تصویر ۳-۱) مدهای انعطاف‌پذیر (خمشی و پیچشی) یک کشتی نمونه

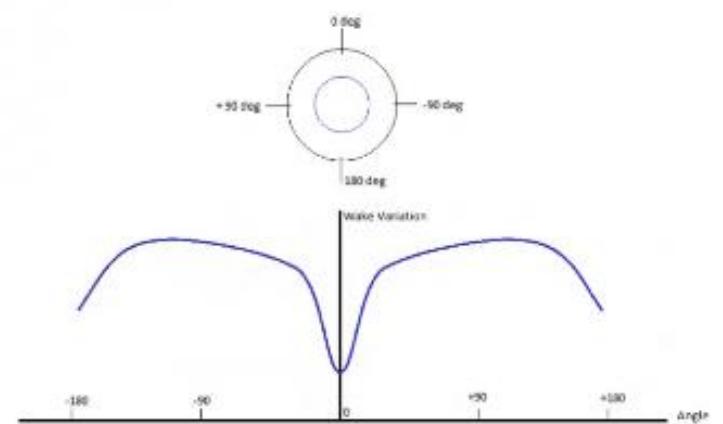
^۱ Seakeeping

یکی از موضوعاتی که مطرح می باشد در جلوی شناور معمولاً جریان های گردابه ای کمتر قرار دارد و از نظر ارتعاشی بهتر است که پروانه در بخش جلویی شناور قرار بگیرد، اما از آنجایی که زمانی که پروانه در عقب شناور قرار بگیرد بازدهی بهتری دارد؛ از لحاظ اقتصادی در کشتی های تجاری و ... بهتر است که پروانه در عقب شناور قرار بگیرد.



تصویر ۲-۳) دیاگرام سرعت

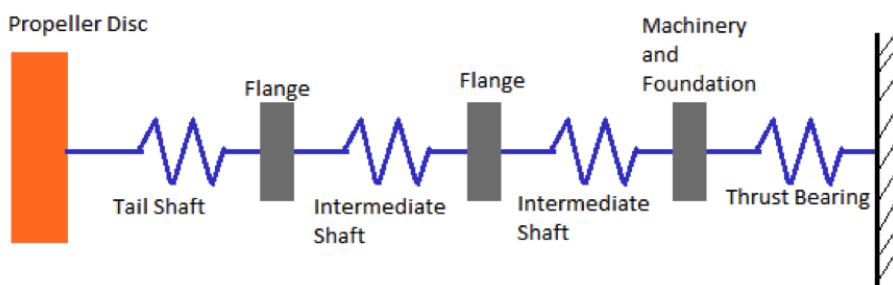
از لحاظ تحلیلی می توانیم که فرض کنیم زمانی که یک پروانه در حال چرخش است، فشار در بخش پایینی و بالایی بدلیل اختلاف تراز آب متفاوت است؛ همین امر سبب می شود که همانطور در تصویر ۲-۳ مشاهده می شود، سرعت در بخش پایینی بیشتر از بخش بالایی پروانه شود و سرعت برخورد جریان به پره ها حسن دورانشان متفاوت است و نوسانات اعمالی به آنها باعث می شود که تراستی که توسط پروانه ایجاد می شود نوسانی باشد.



تصویر ۳-۳) نمونه‌ای از پروفیل سرعت ورودی به پروانه

زمانی که جریان آب به پروانه برخورد میکند، براساس زوایای مختلفی که پروانه دارد، سرعت های مختلف و متغیری را می دهد، بدین سبب است که نیرو های نوسانی در پروانه به وجود می آیند، به این پدیده در شناور های مختلف ویک^۱ گفته می شود؛ در تصویر ۳-۳ نمونه ای از پروفیل سرعت ورودی به پروانه در درجات مختلف آورده شده است.

موج دریا معمولاً مدهای صلب کشته و مدهای انعطاف‌پذیر اولیه را خطرناک هستند معمولاً، تحریک می‌کند. معمولاً آن چیزی که به عنوان ارتعاشات در کشتی‌ها شناخته می‌شود، لرزش اجزای آن توسط تحریک موتورها، پمپ‌ها، کمپرسورها و ... در داخل کشتی است. به دلیل انعطاف‌پذیر بودن فنداسیون تجهیزات و موتورها در کشتی، مشکلات ارتعاشاتی در آنها نسبت به نصب‌شان در خشکی معمولاً بیشتر است. بعنوان موتورهای رفت و برگشتی چهار سیلندر به ترتیب اولویت دارای تحریکات $2x$, $4x$ و $6x$ و ... و موتور شش سیلندر دارای تحریکات $3x$, $6x$ و $9x$ و ... هستند که توانایی تحریک تجهیزات اطراف را دارند.



تصویر ۳-۴) سیستم ارتعاشی بخش پیش رانش شناور

مهمنترین تحریک و حدود ۸۰ درصد مشکلات ارتعاشی در کشتی ناشی از پروانه است و معمولاً برای اجزای اطراف خود با فرکانس $N\omega$ (تحریک ارد پره پروانه)^۲ مشکل ایجاد می‌کند که N برابر با تعداد پره‌ها است و ω نماد سرعت دورانی پروانه است و اصطلاح مربوط به این تحریک، تکان خوردن دم سگ^۳ است. مهمترین بخش تحت خطر این تحریک، ارتعاشات محوری مجموعه پروانه، شفت و موتور است که بصورت سیستم ارتعاشی در تصویر ۳-۴ نمایش داده شده است.

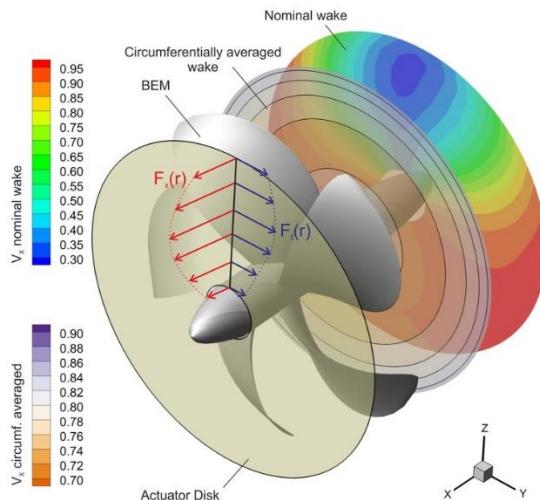
^۱ Wake propeller

^۲ Propeller blade rate

^۳ Tail wagging the dog

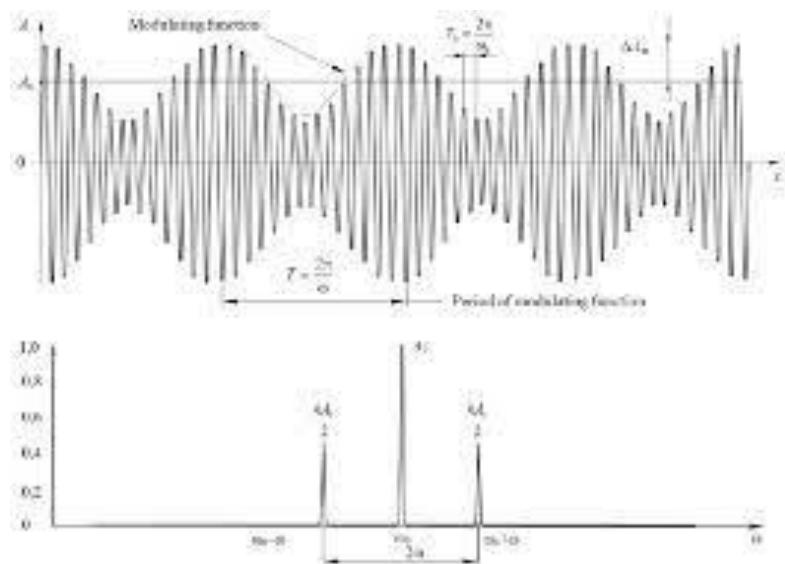
جريان عبوری از بدن کشته وقتی به پروانه برخورد می‌کند، پادمتر از پایین است) و بدون وجود آن و در صورت یکنواخت بودن جریان ورودی به پره‌ها، تحریک ارد پره پروانه رخ نمی‌داد و یا حداقل خطر بسیار کمی داشت (همانطور که در بالا اشاره شد، از نظر ارتعاشی بهتر است پروانه در جلوی کشته باشد، اما مسائل دیگری مانند کارائی و در نتیجه مصرف انرژی و صرفه اقتصادی در اکثر کشته‌ها بخصوص تجاری‌ها اولویت دارد). بحث بسیار مهم و قابل اهمیت آن است که در واقع در هر پره زمانی که دوران می‌کند به دلیل جریان ورودی غیر یکنواخت، نوسانات فشار با فرکانسی برابر با دور روتور ($1x$) ایجاد می‌شود، اما با جمع شدن آنها روی N پره با هم، مشخص می‌شود نیروی و گشتاور اعمالی از پایه پروانه به شفت و سایر اجزا دارای دور (Nx) است. پس می‌توان گفت مهمترین تحریک روی خود پره‌ها همان ($1x$) است، اما مهمترین تحریک روی بخصوص ارتعاشات محوری مجموعه پروانه و شفت و خود بدن کشته (Nx) است. در این مورد باید در نظر داشت، که حاصلضرب داخلی پروفیل فشار دینامیکی و شکل مد مربوطه تعیین کننده میزان ورود انرژی در آن مد و شدت تحت خطر بودن آن است. در صورت عدم بالانس شفت و یا پروانه، تحریک نابالانسی در سیستم با فرکانس $1x$ وجود دارد که رفع و شناخت آن ساده‌تر از تحریک عبور پره (Nx) است.

Fig. 1 Averaging process for the characterization of the momentum source of the actuator disk. The nominal wake is transformed in a circumferentially averaged wake. Equivalent open water BEM analyses using this averaged wake realizes the axial and tangential radial load distribution of the actuator disk



تصویر ۳-۵) نمونه جریان پادمتر از وارد به پروانه کشته

کاویتاسیون که یکی از عوامل بسیار مخرب در ابزارهای سیالاتی مانند پروانه، توربین، پمپ و ... است در کشتی‌ها ممکن است رخ دهد، این پدیده زمانی که سرعت پروفیل جریان افزایش می‌یابد باعث می‌شود که فشار کاهش یابد و این فشار به فشار بخار سیال برسد و سیال، بخار می‌شود و حباب‌های تولید می‌شوند؛ کاویتاسیون در پره‌ها می‌تواند تحریک در باند فرکانسی بزرگ^۱ ایجاد کند و سازه‌های اطراف را به لرزش در آورد. همچنین همانطور که بیان شد، به دلیل تغییر سرعت جریان ورودی به پره‌ها در محیط و زوایای متفاوت، ممکن است رخداد کاویتاسیون در یک سری زوایا خاص باشد و حالت متقاطع داشته باشد و به همین دلیل فرکانس هارمونیک (1x) را علاوه بر باند فرکانسی بزرگ ذکر شده را داشته باشد و عملأً ارتعاش مدوله شده^۲ (شبه هارمونیک) در اجزا رخ دهد.



تصویر ۳-۶) نمونه‌ای از ارتعاشات مدوله

در ادامه مفاهیمی که پایه ای هستند برای بررسی ارتعاشات پروانه را ذکر می‌کنیم تا با آشنایی بیشتر به مدلسازی پروانه بپردازیم.

^۱ Broadband

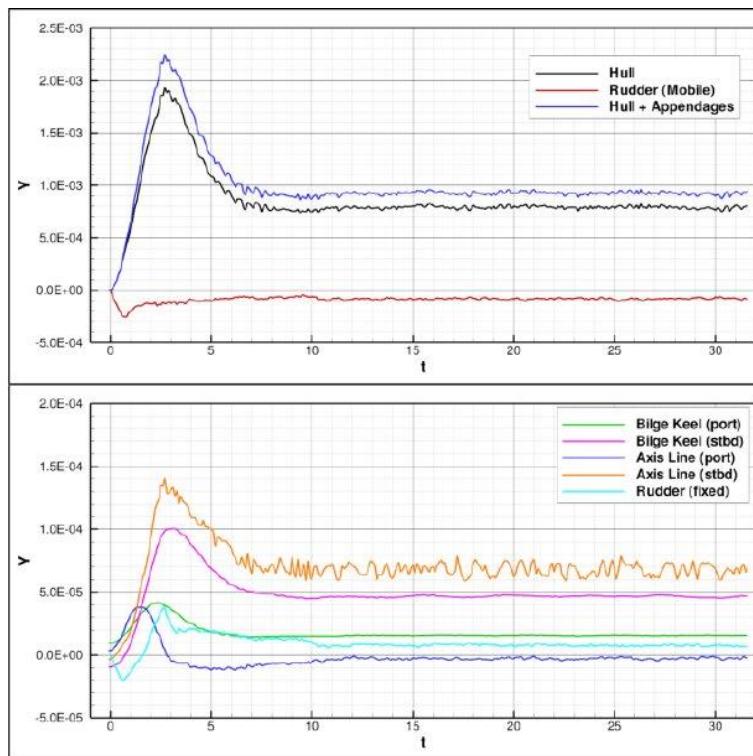
^۲ Modulated vibration

۲-۳) مفاهیم اولیه ارتعاشات

در این بخش مفاهیم پایه ای که برای بررسی ارتعاشات پروانه لازم است را مطالعه میکنیم و به بررسی نوسانات نیرو تراست و گشتاور پروانه، معرفی نمودار های مختلفی که برای بررسی دینامیک روتورها و تجهیزات دور مانند پروانه استفاده می شود می پردازیم

همانطور که در بخش ۱-۳ گفته شد در پروانه و مجموعه موتور کشی هم به دلیل تحریکات سازه ای و هیدرودینامیک موجود، انواع تحریکات خمی، محوری و پیچشی وجود دارد که نیاز به تحلیل های این چنینی دارد.

۳-۲-۳) نوسانات نیروی تراست و گشتاور پروانه: از جمله موارد قابل بحث نوسانات نیرو های تراست و گشتاور پروانه می باشد، از لحاظ تحلیلی همانطور که در بخش قبل مشاهده کردیم می توانیم که فرض کنیم زمانی که یک پروانه در حال چرخش است، بدلیل اختلاف فشار در بالا و پایین پروانه، سرعت در بخش پایینی بیشتر از بخش بالایی پروانه شود و باعث می شود نوساناتی رخ دهد تا تراستی که توسط پروانه ایجاد می شود دچار نوساناتی باشد، همچنین علاوه بر تراست می تواند روی گشتاور مورد نظر تاثیر بگذارد که در تصویر ۹-۳ نمونه ای از نوسانات تراست اشاره شده است.



تصویر ۹-۳) نوسانات تراست بر بدنه و اجزای دیگر آن

با توجه به رابطه تراست و گشتاور شناور با ضرایب تراست و گشتاور که با پارامتر های زیر به عنوان مشخصه های عملکردی پروانه ها است بصورت زیر است :

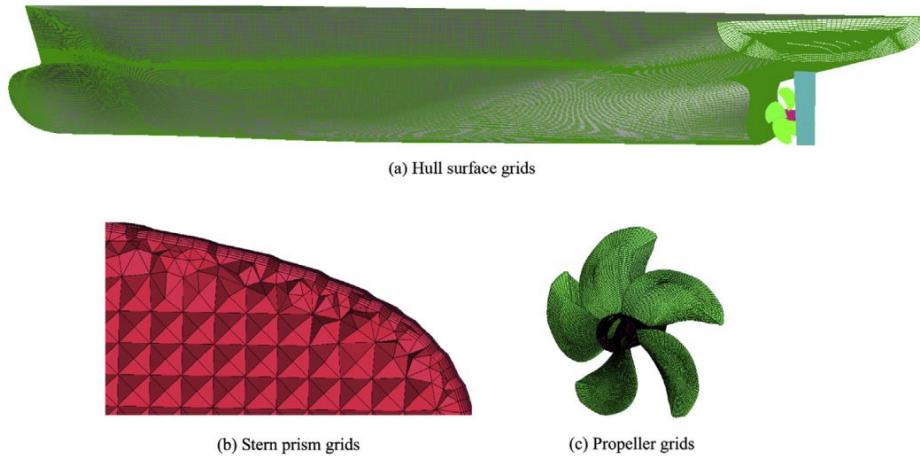
$$KT = \frac{T}{pn^2 D^4}$$

$$KQ = \frac{Q}{pn^2 D^5}$$

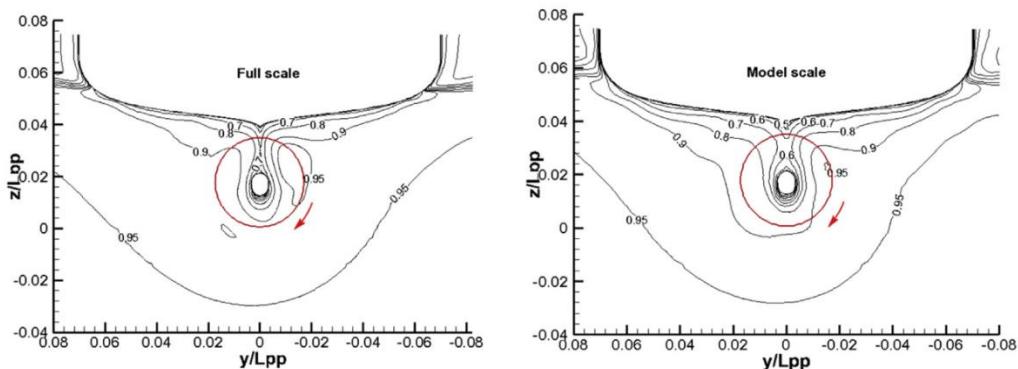
در واقع با توجه به نیرو های نوسانی که به پروانه وارد می شود، ضرایب تراست و ضرایب گشتاور دچار نوساناتی هر چند محدود خواهند بود که سبب نوسانی بودن تراست و گشتاور است، باید در کشتی ها تحقیقات لازم در این جهت انجام شود تا بهترین عملکرد لازم انجام شود.

در یک تحقیق دیگر [۱]، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۱ (CFD) مدل پروانه و اجزای اطراف و سیال اطراف آماده و آنالیز صورت گرفته است. مشبندی اجرا و پروفیل سرعت جریان در راستای کشتی در صفحه بالاتر از پروانه در شکل های زیر نشان داده شده است.

^۱ Computational Fluid Dynamics



تصویر ۳) مشبندی پروانه و سایر اجزای کشتی [1]



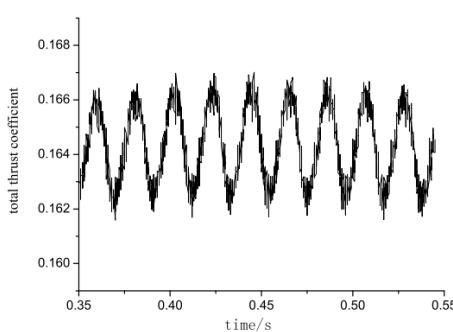
تصویر ۴) پروفیل سرعت جریان در راستای کشتی در صفحه بالاتر از پروانه (۰،۳ قطر پروانه بالاتر از صفحه پروانه و موازی با آن) استخراج شده با دو روش متفاوت در تحقیق (دایره قرمز شماتیک پروانه است) [1]

بعنوان خروجی این محاسبات، آنها نوسانات ضریب تعدادی از نیروها و گشتاورهای ناشی از حرکت پروانه را استخراج کردند. بعنوان نمونه، نوسانات نیروی تراست و گشتاور پروانه و محتواهای فرکانسی آن در شکل‌های ۱۲-۱۳-۱۴ ارائه شده است. همانطور که مشخص است، محدوده نوسانات برای ضریب تراست و گشتاور در حدود ۰،۰-۰،۳ ارائه شده است. همانطور که این مقادیر را در فصل مدلسازی و تحلیل ارتعاشی شناور استفاده می‌کنیم، محتواهای فرکانسی هم طبق انتظار شامل فرکانس گذر پره^۱ (BPF) یا همان NX است. البته نوسانات کوچکتری روی نوسان اصلی با دامنه کوچکتر قرار دارد که مربوط به اردهای بالاتر فرکانس گذر پره 2BPF و 3BPF و ...

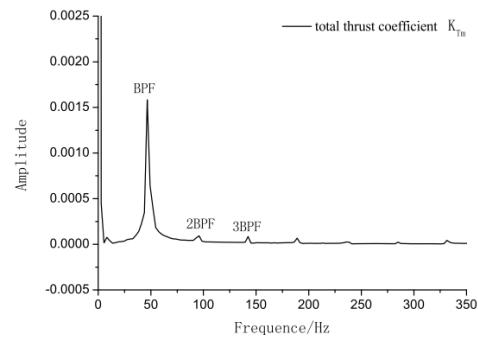
^۱ Blade passing frequency (BPF)

است. دور پروانه 570 دور بر دقیقه و تعداد پره 5 است، بنابراین فرکانس گذر پره برابر با 2850 دور بر دقیقه یا 47.5 هرتز است که در شکل قابل مشاهده است.

البته طبق نمودار پاسخ زمانی مقاله، یک فرکانس خیلی بالا در حدود 30 برابر فرکانس عبور پره وجود دارد که توسط نویسنندگان به دلیل اینکه ماکریتم فرکانس نمودار FFT، 350 هرتز و حدود هفت برابر فرکانس گذر پره است، در این نمودار دیده نشده است.

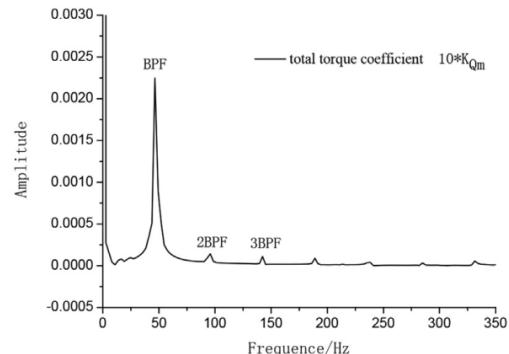
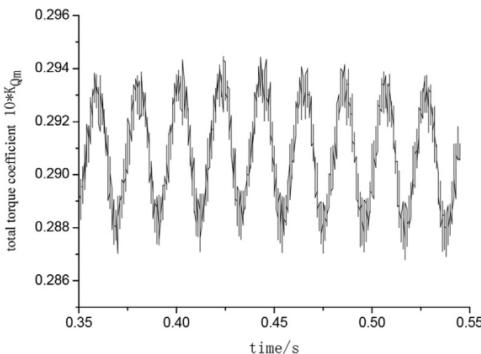


(a1) Time domain of model-scale propeller total thrust fluctuation



(a2) Frequency domain of model-scale propeller total thrust fluctuation

[1] تصویر ۱۲-۳) نوسانات ضریب نیروی تراست و محتوای فرکانسی آن



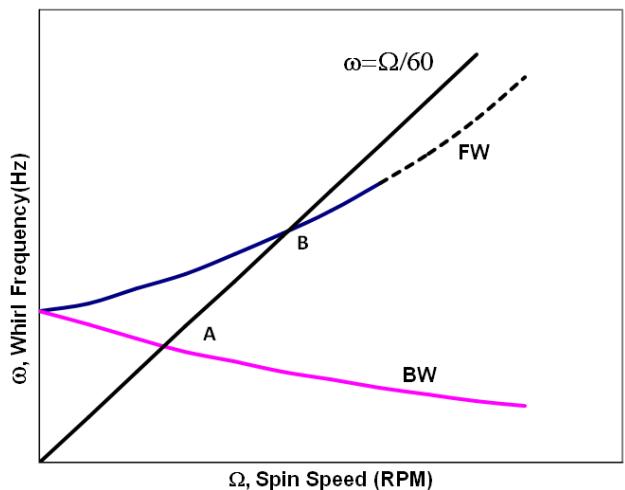
[1] تصویر ۱۳-۳) نوسانات ضریب گشتاور پروانه و محتوای فرکانسی آن

۳-۲-۳) دیاگرام کمپل: از مهمترین دیاگرام های موجود، دیاگرام کمپل است. دیاگرام کمپل فرکانس های طبیعی قطعات و تحریکات را به صورت تابعی از سرعت دورانی نشان می دهد و به نام ویلفرد کمپل^۱ که این مفهوم را اولین بار ارائه کرد، نام گذاری شده است. در سیستم های روتوری فرکانس های طبیعی سیستم وابسته به سرعت دورانی است. در تجهیزات دریایی بخاطر تغییر اثرات سیال اطراف روی سازه در سرعت دورانی متفاوت و همچنین تغییر سرعت دورانی، تغییر فرکانس وجود دارد که این تغییرات را می توان در نمودار کمپل رسم کرد و محدوده عملکردی های مناسب را تشخیص داد.

این نمودار معمولاً به دو صورت بدست می آید:

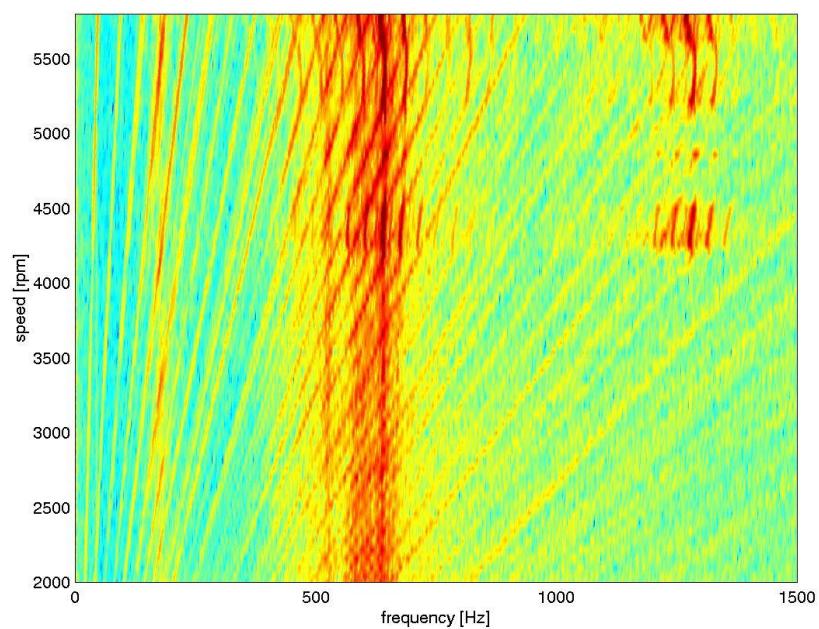
- **تحلیلی:** مقادیر محاسبه شده فرکانس های طبیعی به صورت تابعی از سرعت شفت بدست می آید و با بررسی این فرکانس ها و فرکانس های تحریک، محل تقاطع آنها نشان دهنده رزونانس در سیستم است و باید دقت کنیم که محدوده کارکرد پروانه مورد نظر در این ناحیه قرار نگیرد. البته با توجه به میزان نزدیکی این رزونانس ها به سرعت کاری و دمپینگ مودال در مدد مورد نظر، میزان خطرناک بودن این رزونانس ها مشخص می شود. یک نمونه آن در تصویر ۳-۲ نشان داده است.

^۱ Wilfred Campbell



تصویر ۱۴-۳) دیاگرام کمپل روتور ساده فرضی (نقاط برخورد ناحیه های رزونانس هستند و باید از این محدوده سرعت دورانی دورتر باشد)

- **تجربی:** با اندازه گیری ارتعاشات سیستم و بدست آوردن پاسخ فرکانسی آن، محل ماکریتم های آن نشان دهنده فرکانس های طبیعی سیستم است و با در نظر گرفتن این نمودارها در فرکانس های متفاوت، در مجموع دیاگرام کمپل سیستم بدست می آید، نمونه ای از دیاگرام کمپل از تست در تصویر ۱۵-۳ نمایش داده شده است.



تصویر ۱۵-۳) دیاگرام کمپل حاصل داده های تجربی

این موضوع در پروانه های کشتی نیز دنبال می شود، نمودارهای تحریک خارجی با عبارت $1x$, $2x$, $3x$ و ... نامگذاری شده و به صورت خط مستقیم در دیاگرام کمپل ترسیم می شوند. $1x$ مربوط به نابالانسی جرمی (چون در نابالانسی فرکанс تحریک برابر با سرعت دورانی است)، $2x$ مربوط به ناهم ترازی^۱ نصب اجزا و یا اردر دوم تحریکات $1x$ یا توان کمتر است و nx مربوط به نوسانات آیروдинامیک برای پروانه ای با n پره است. تقاطع نمودارهای فرکанс طبیعی با تحریک خارجی در محدوده سرعت عملیاتی نشان دهنده رزونانس در شرایط کاری سیستم و علاوه بر آن تقاطع نمودارهای فرکанс طبیعی اجزای متفاوت با یکدیگر (در صورت وجود) نیز نشان دهنده برهمنش بین مدهای متفاوت و ناپایداری در سیستم است، باید دقیق کرد که با توجه به داده های دیاگرام کمپل محدوده عملکرد پروانه یا روتور مورد نظر را میتوانیم تنظیم کنیم این موضوع در بخش تحلیل ارتعاشاتی فصل آینده بررسی خواهد شد و محدوده عملکردی حدودی برای کارکرد پروانه مذکور مشخص می شود.

^۱ Misalignment

VERTICAL VIBRATION OF HULL GIRDER, RESULTS OF CALCULATION

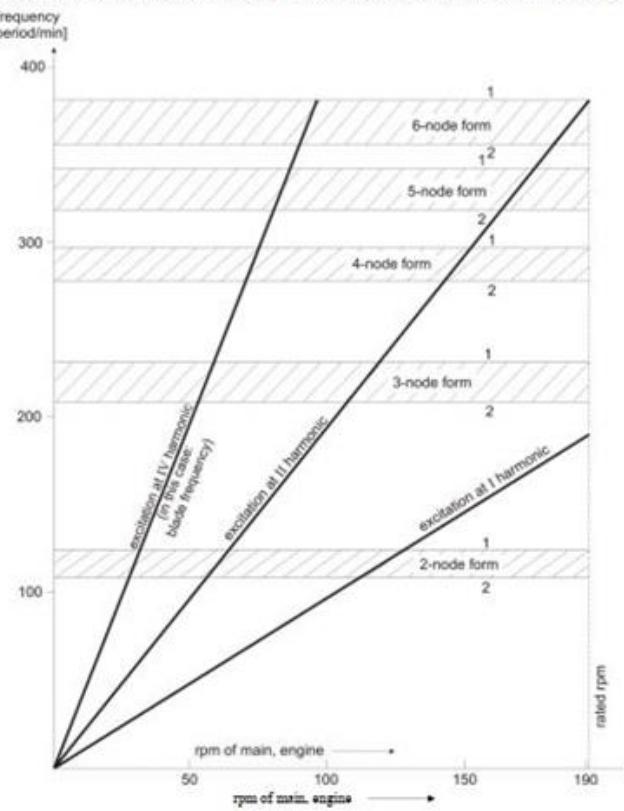


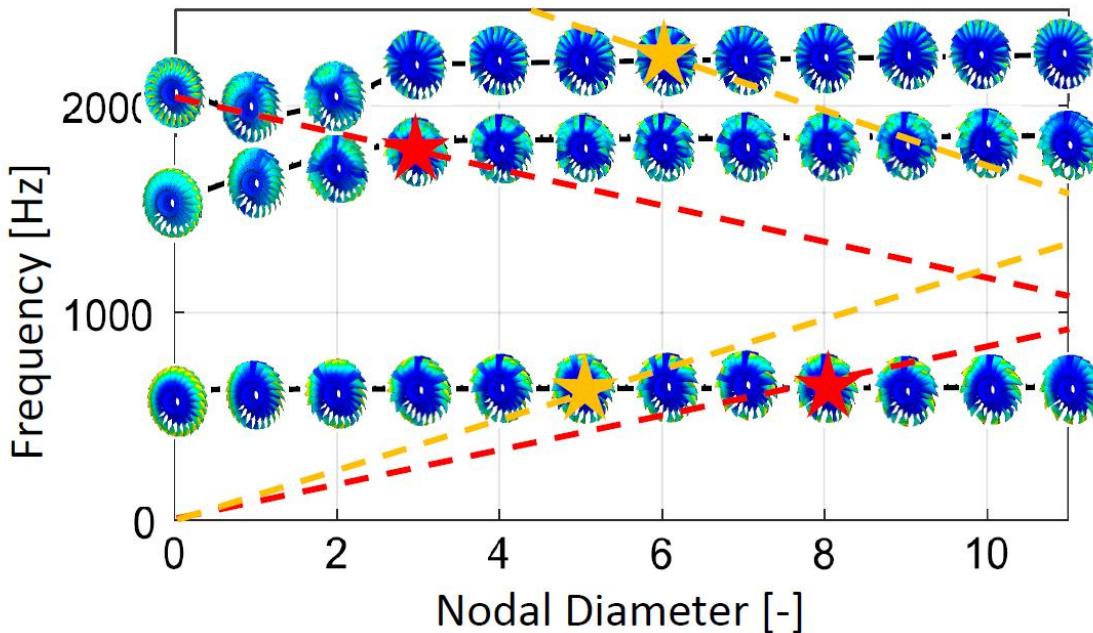
Fig. Z 3-1

Chief excitation frequencies of main engine and propeller against free frequencies of hull girder 1 – under ballast, 2 – under load

تصویر ۳-۱۶) دیاگرام کمپل یک پروانه

در مجموعه می‌توان گفت برای اجزائی که تحت تحریک پروانه قرار دارند، بهتر است و با دیدگاه محافظه‌کارانه تحریکات در نظر $2Nx$ و Nx است و برای خود پره‌ها بهتر است همین تحریکات در نظر گرفته شود، هر چند مهمترین تحریک اعمالی به آنها $1x$ است.

۳-۲-۳) دیاگرام Safe: علاوه بر نمودار کمپل که در آن فرکانس‌های طبیعی و تحریکات اعمالی به سیستم مورد نظر را بصورت تابعی از دور کاری نشان می‌دهد و برای بررسی رزونانس از آن استفاده می‌شود، در قطعات متقاضن محوری از نمودار^۱ برای بررسی رزونانسی استفاده می‌شود.



تصویر ۳-۱۷) دیاگرام Safe پروانه شناور

در این دیاگرام علاوه بر تطابق فرکانس تحریک و طبیعی به عنوان شرط لازم، شباهت شکل مدهای سیستم و شکل تحریک به عنوان شرط کافی رزونانس مطرح است. در نمودار SAFE فرکانس طبیعی و تحریک بر حسب مدهای قطری^۲ رسم می‌شود. در واقع مدهای قطری، مدهای متفاوت دیسک است و در این نمودار اثر سازه‌ای دیسک^۳ روی فرکانس‌های مجموعه پره‌ها در هر مد بررسی می‌شود. به زبان دیگر می‌توان گفت که به دلیل تقابل بین دیسک و پره‌ها، هر فرکانس و مد پره تنها یک سر گیردار در مجموعه دیسک و پره تبدیل به تعداد زیادی مد می‌شود. تعداد این مدها برابر با جز صحیح نصف تعداد پره‌های هر طبقه است. با افزایش شماره مدهای قطری عملاً دیسک به مدهای بالاتر خود وارد شده و می‌توان گفت که تکیه‌گاه پره‌ها که دیسک است، اصطلاحاً سفتر^۴ شده و فرکانس مربوطه، بالاتر خواهد رفت.

^۱ Singh's Advanced Frequency Evaluation

^۲ nodal diameters

^۳ Hub of propeller

^۴ stiffer

معمولاً سعی می‌شود که از دو نمودار کمپل و SAFE بصورت پشت سرهم برای بررسی رزونانس قطعی در سیستم استفاده شود. بطور خلاصه می‌توان گفت که در نمودار SAFE زمانی که سه خط، فرکانس تحریک، شکل تحریک و فرکانس طبیعی (شامل اطلاعات فرکانس و شکل تحریک) همزمان با هم تقاطع کنند، رزونانس واقعی رخ می‌دهد. با توجه و بررسی در مقالات مختلف علمی این نمودار تاکنون برای پروانه کشته استفاده نشده است، اما با توجه به شکل زیر که وابستگی مقدار فرکانس مدهای پره به دیسک میانی را از مرجع نشان می‌دهد، نیاز به بررسی آن در پروانه‌ها بخصوص دارای تعداد بالای پروانه نشان می‌دهد.

to the nodes on the loading surface, the node distribution situation on the loading surface is . some comparison, each blade of the propeller is divided into 40 strips along the radial directi

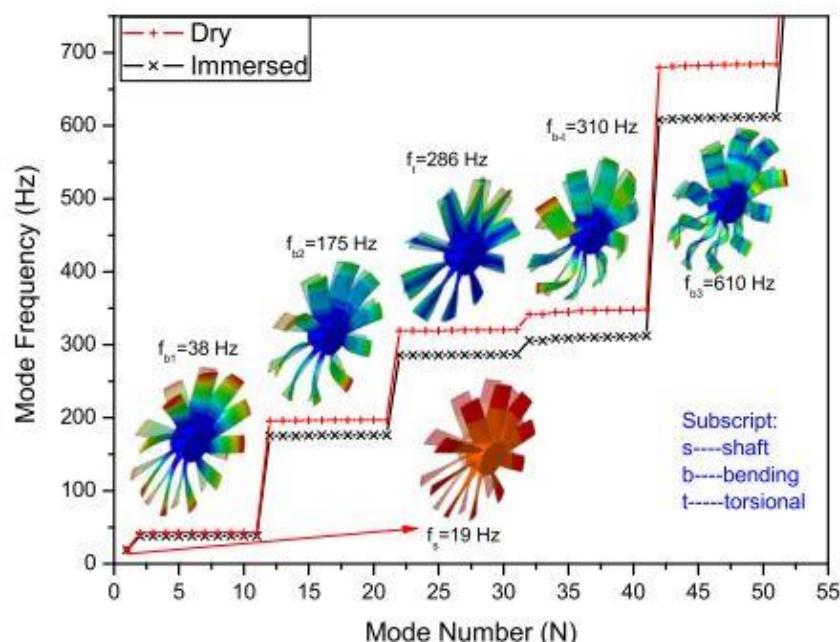
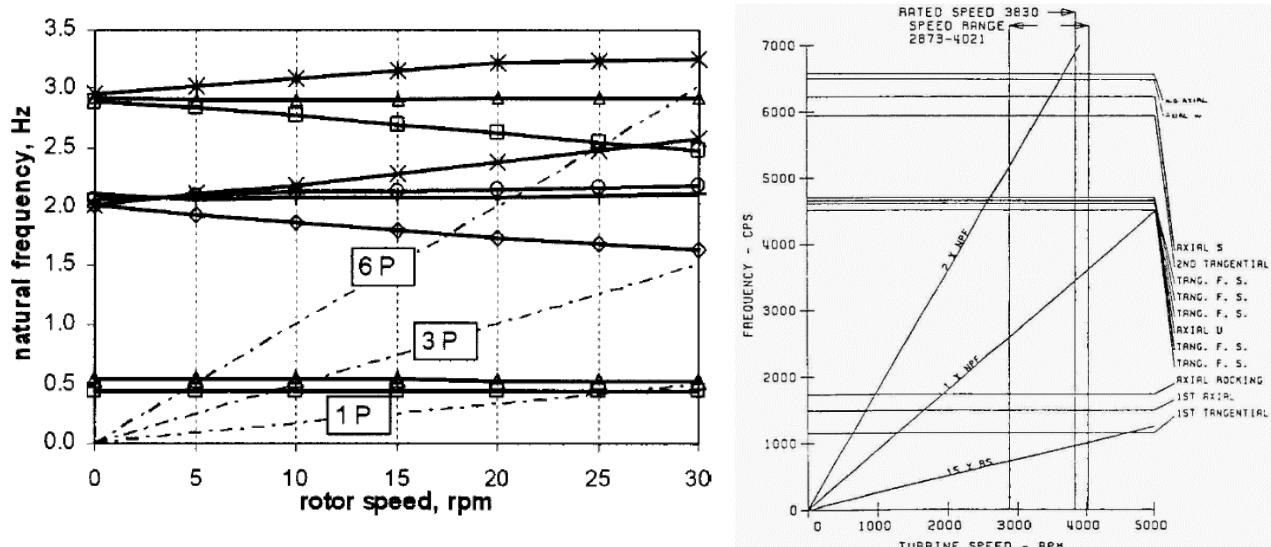


Fig. 10. The natural frequencies and modal shapes of the propeller-shafting system.

تصویر ۱۸-۳) فرکانس‌ها بر حسب شماره برای پروانه کشته

در دنیا استاندارد های مختلفی براساس نمودار های گفته شده وجود دارد تا رزونانس رخ ندهد و بهترین محدوده عملکردی شناور مشخص شود، بطور مثال در استاندارد API 616 منابع تحریک اعمالی به پره های توربین گاز بیان شده است. در این استاندارد بیان شده است که در محدوده $10\% - 10\% +$ دور کاری هیچکدام از فرکانس های تحریک و طبیعی با یکدیگر نباید تقاطع داشته باشند. اگر این موضوع امکان پذیر نباشد، آنالیز تنش در قطعات و داشتن عمر بینهایت قطعه براساس تحلیل های خستگی باید مورد بررسی قرار گیرد. سرعت های بحرانی قبل از دور کاری پره ها باید تعیین شود. همچنین پره ها باید به گونه ای طراحی شوند که توانایی عبور از تنش های رزونانسی در هنگام روشن و خاموش شدن و رسیدن به دور کاری را داشته باشند.

فرکانس گذر مهمترین فرکانس تحریک در سیستم های دوار بوده و در واقع برای هر طبقه برابر با حاصل ضرب تعداد پره های آن طبقه در دور سیستم دوار است و معمولاً با علامت p_x نشان داده می شود که در آن p برابر با تعداد پره ها و x نشان دهنده دور سیستم دوار است. در واقع هر پره متحرک در حال دوران، زمانی که پشت جریان پره های ثابت قرار می گیرد، فشار اعمالی به آن اندکی کاهش پیدا کرده و همین نوسانات فشار ایجاد یک فرکانس تحریک می کند که فرکانس آن برابر با دور شفت در تعداد پره های ثابت است. همین موضوع برای پره های ثابت و فرکانس اعمالی از طرف پره های متحرک وجود دارد.



تصویر ۳-۱۹) دیاگرام کمپل مربوط به پره های یک توربین بخار

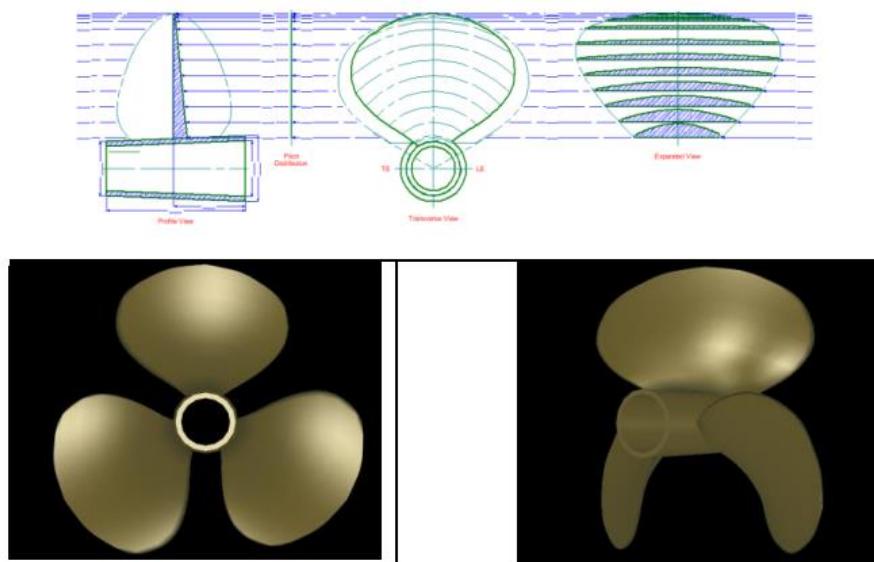
در تصویر ۳-۱۹ دیاگرام کمپل مربوط به پره‌های یک توربین بخار نشان داده شده است که در آن دو برابر فرکанс گذر پره نیز در نظر گرفته شده است. همچنین در تحلیل ارتعاشی پره توربین باد نیز که دارای سه پره است و فرکанс گذر آن برابر با ۳p است، دو برابر آن ۶p در نظر گرفته می‌شود. در **Error! Reference source not found.** دیاگرام کمپل یک توربین باد سه پره‌ای نشان داده شده است در واقع می‌توان گفت که فرایندهای آئرودینامیکی که منجر به اعمال فشار متغیر به پره‌ها می‌شوند تا حدی اغتشاشی بوده و این موضوع باعث می‌شود بخشی از انرژی به فرکанс‌های بالاتر نشست پیدا کند. مطالب گفته شده در این فصل جهت آشنایی با مفاهیم اصلی ارتعاشاتی بوده است و ارتباط آن با شناور و پروانه گفته شد، در ادامه با مدلسازی یک پروانه نمونه به تحلیل ارتعاشی آن خواهیم پرداخت.

فصل چهارم : مدلسازی و تحلیل ارتعاشی پروانه

در این فصل قصد داریم که با مدلسازی یک پروانه، مفاهیمی که در فصل دوم و سوم گفته شد را بررسی کنیم و آن ها را بیابیم.

۴-۱) مدلسازی پروانه:

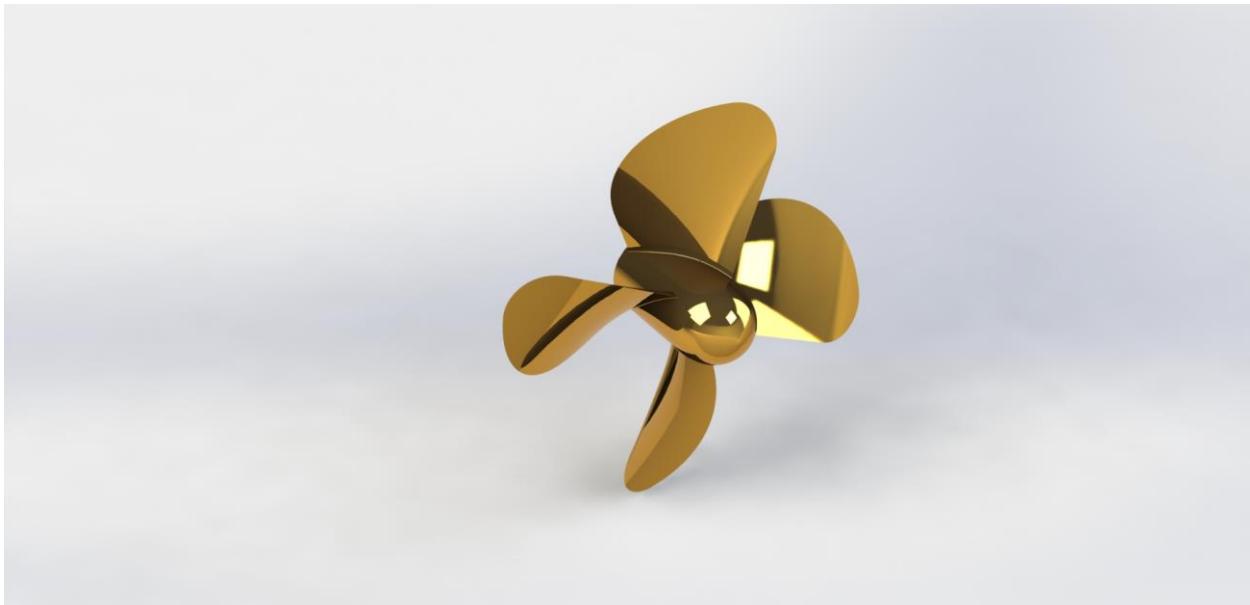
برای آنکه تحلیل های ارتعاشاتی روی پروانه انجام دهیم، ابتدا لازم است که یک پروانه را در نرم افزار هایی مانند سالیدورکس طراحی کنیم، بدین منظور با مشاهده تحقیقات انجام شده و طراحی های نمونه ای در منبع [2] مشاهده می شود که در این مقاله پروانه ای از Gawn Series طراحی شده است.



تصویر ۴-۱) نقشه سه بعدی و طراحی پروانه مدل نمونه در منبع [2]

به همین شکل طراحی یک پروانه را در نرم افزار probcad یا سالیدورکس انجام دادیم که ابعاد هندسی پروانه بصورت زیر فرض شده است:

اندازه	مشخصه
Series 60	سری استاندارد
1.5 متر	قطر پره
0.5 متر	Hub قطر



تصویر ۴-۱) نمای ایزومتریک پروانه



تصویر ۴-۲) نمای ایزومتریک پروانه

به همین صورت فایل آن در نرم افزار تهیه شده است و فایل رندر گرفته شده آن در تصویر ۱-۴ و ۲-۴ مشخص است و از این مدلسازی پروانه در تحلیل های ارتعاشی پروانه استفاده خواهیم برد؛ همانطور که از منبع [2] اشاره شده است برای یافتن تقریبی T یا Q می توانیم از جداول سری 60 یا جداول مربوط به سری استاندارد پروانه مورد نظر استفاده کنیم بصورتی که در ادامه این مقادیر را خواهیم یافت و تحلیل های نرم افزار انسیس منطبق بر این محاسبات خواهد بود.

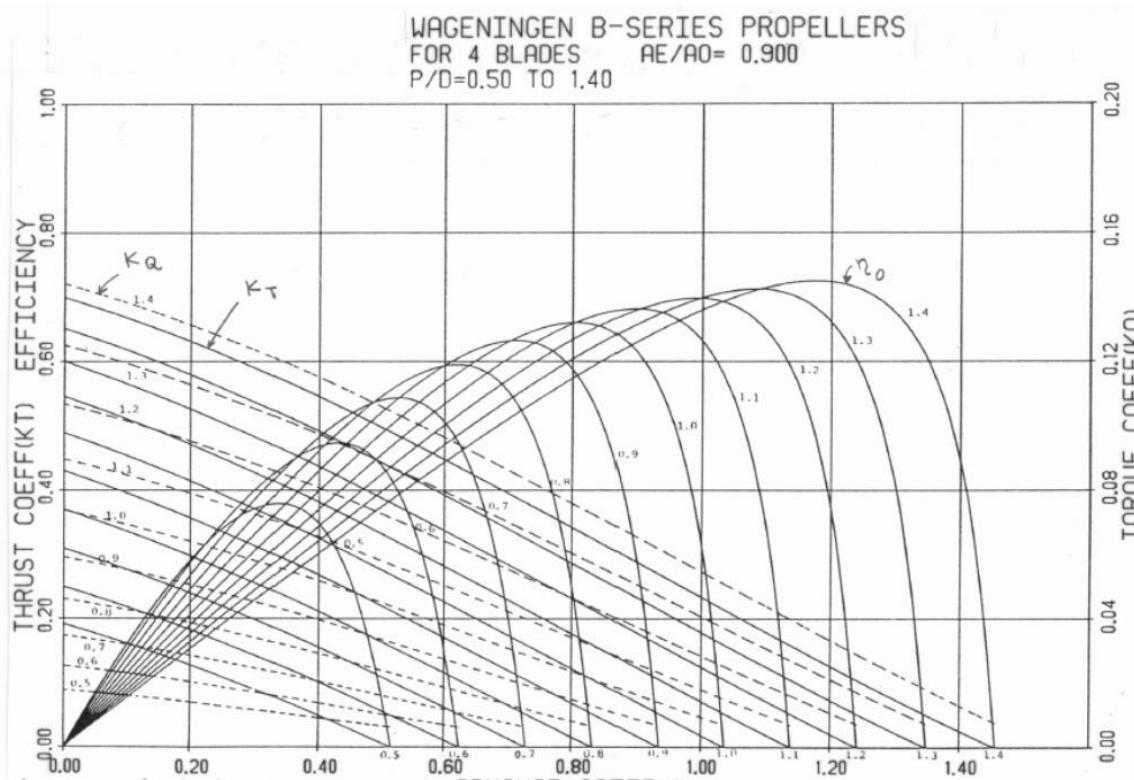
۴-۴) محاسبات عددی با استفاده از سری های استاندارد

با توجه به سری های استاندارد سری ۶۰ که بصورت مدون آورده شده است، با توجه به محاسبات تجربی و درون یابی خطی موجود در این استاندارد بدست آورده شده است که روابط آن بصورت زیر است:

$$K_Q = \sum_{n=1}^{4/39} C_n(J)^{S_n} (P/D)^{t_n} (A_E/A_O)^{u_n} (Z)^{v_n}$$

$$K_T = \sum_{n=1}^{39} C_n(J)^{S_n} (P/D)^{t_n} (A_E/A_O)^{u_n} (Z)^{v_n}$$

منحنی های K_Q و K_T در تصویر ۳-۴ نمایش داده است که بر اساس شاخصه های عملکردی می توانیم آن ها را بیابیم.



تصویر ۳-۴) منحنی مشخصه های عملکردی پروانه

بر اساس منحنی عملکردی که در تصویر ۳-۴ نمایش داده شده است، اگر فرض کنیم که سرعت کشتی knot ۲۰ باشد و دور آن ۱۰۰ rpm باشد، میتوانیم با این فرضیات گشتاور و تراست شناور را بیابیم.

$$J = \frac{V}{nD} = \frac{20 \times 0.5114}{100 \times 2 \times \frac{2\pi}{60}} = 0.488$$

براساس این مقدار KT و KQ از روی نمودار میتوانیم تشخیص دهیم که به ترتیب ۰.۰۹ و ۰.۴۳ می باشد،

$$KT = \frac{T}{pn^2 D^4} = 0.09$$

$$KQ = \frac{Q}{pn^2 D^5} = 0.43$$

همچنین نسبت گام با فرض ۷،۰ در نظر گرفته شده است.

بدین ترتیب مقادیر KT و KQ را میابیم که :

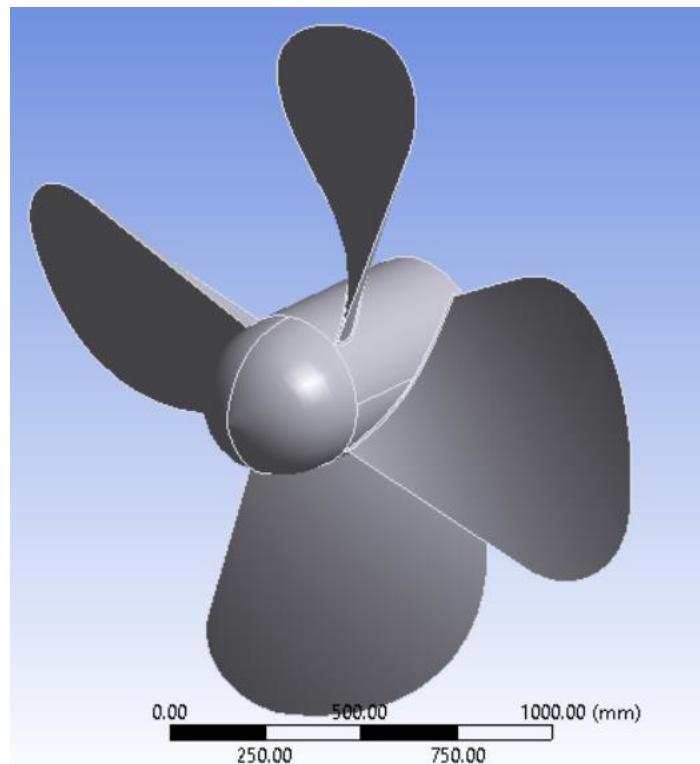
$$T = KT \times pn^2 D^4 = 161.491 kn$$

$$Q = KQ \times pn^2 D^5 = 1.543 MN.m$$

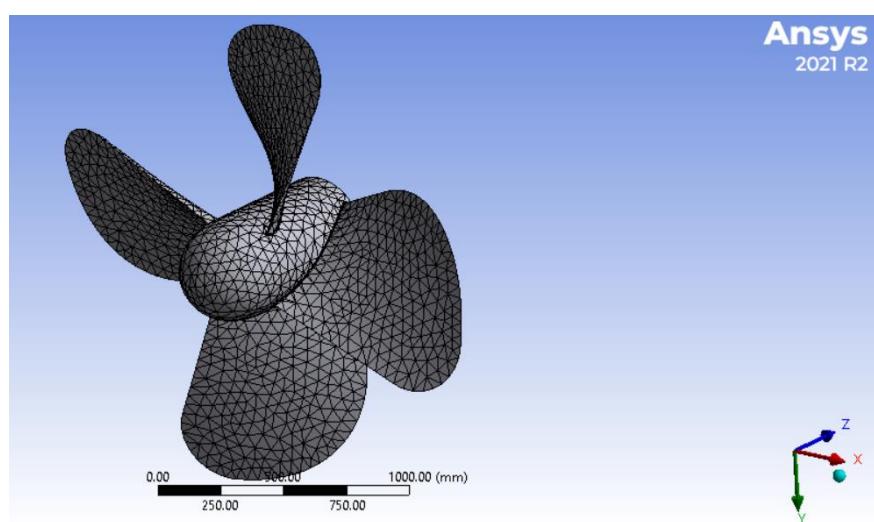
این مقادیر بدست آمده تقریبی هستند و ترانس های نوسانی ضرایب تراست و گشتاور در حدود ۱ درصد همانطور که در فصل سوم منبع [1] آورده شده بوده است.

۳-۴) تحلیل ارتعاشی

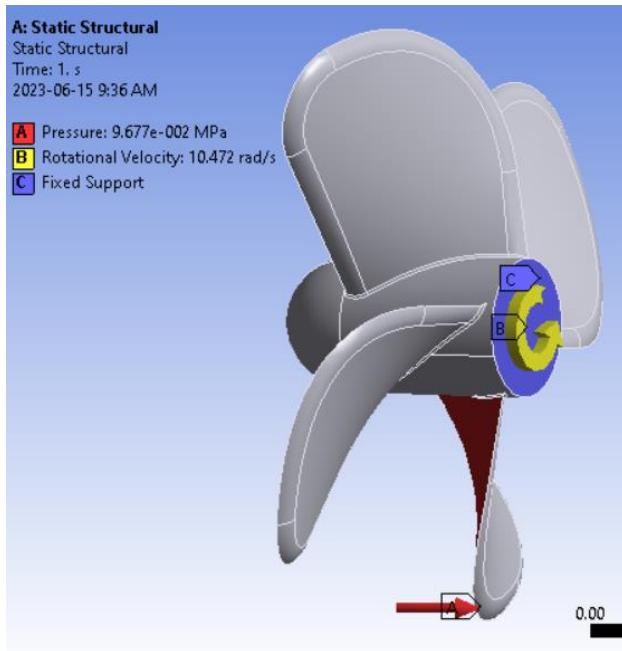
همانطور که در تصویر ۴-۵ نمایش داده شده است آنالیز یک فن نمونه با چهار پره انجام شده است. پروانه مشبندی شده است که شامل ۲۳۸۱۳ نود و ۱۳۷۱۵ المان است در تصویر ۴-۶ مشخص است.



تصویر ۴-۵) فن نمونه



تصویر ۴-۶) مشبندی پروانه نمونه

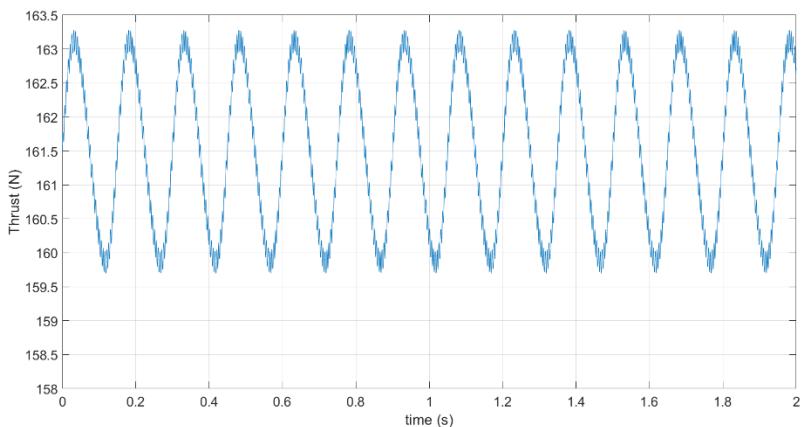


تصویر ۴-۷) شرایط مرزی، فشار و دوران اعمالی به پروانه

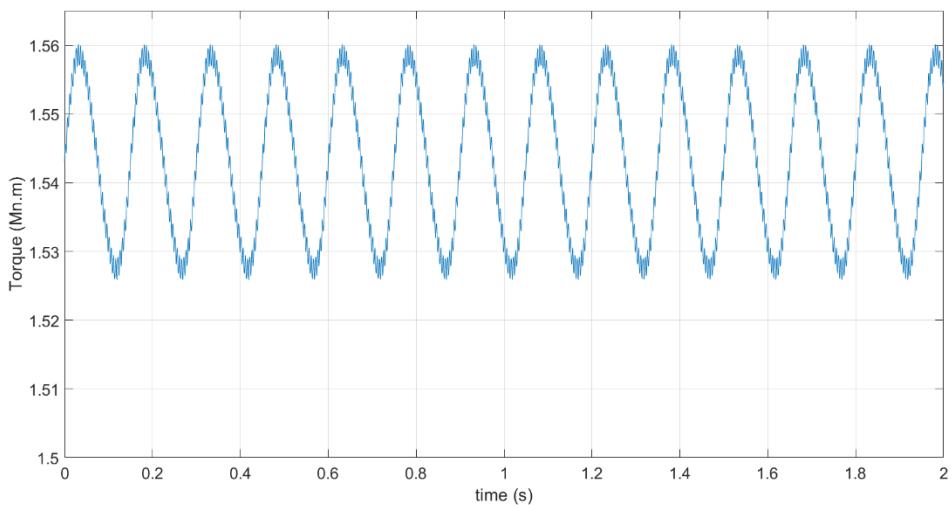
همچنین شرایط مرزی، فشار و دوران اعمالی به پروانه در شکل ۴-۷ نشان داده شده است که در محل اتصال به بدنه کشتی، شرایط مرزی گیردار اعمال شده است (ناحیه آبی رنگ (C) در شکل). همچنین سرعت دورانی همانطور که در بخش قبلی فرض شده بود ۱۰۰ دور بر دقیقه یا $10,472$ رادیان بر ثانیه اعمال شده است و فشار استاتیکی $0,9677$ مگاپاسکال در به پره‌ها اعمال شده است. لازم به ذکر است، این فشار از میزان کردن به نحوی که نیروی تراست برابر با 161 کیلو نیوتون شود بدست آمده است. البته این فشار در واقع اختلاف فشار معادل دو سمت است که در تصویر ۴-۸ نمایش داده شده است.

۱-۳-۴) نوسانات تراست و گشتاور

نوسانات گشتاور و نیروی تراست، را طبق مرجع [1] و شکل‌های ۸-۴ و ۹-۴ رسم شده است. با در نظر گرفتن نوسانات یک درصدی در دور گذر پره، یک دهم درصد در دو برابر گذره پره، یک صدم درصد در فرکانس سه برابر گذره پره و یک دهم درصد در سی برابر گذره پره، نیروی تراست و گشتاور بر حسب زمان بصورت شکل‌های زیر استخراج شده است. کد MATLAB مورد استفاده در پیوست یک قرار داده شده است.

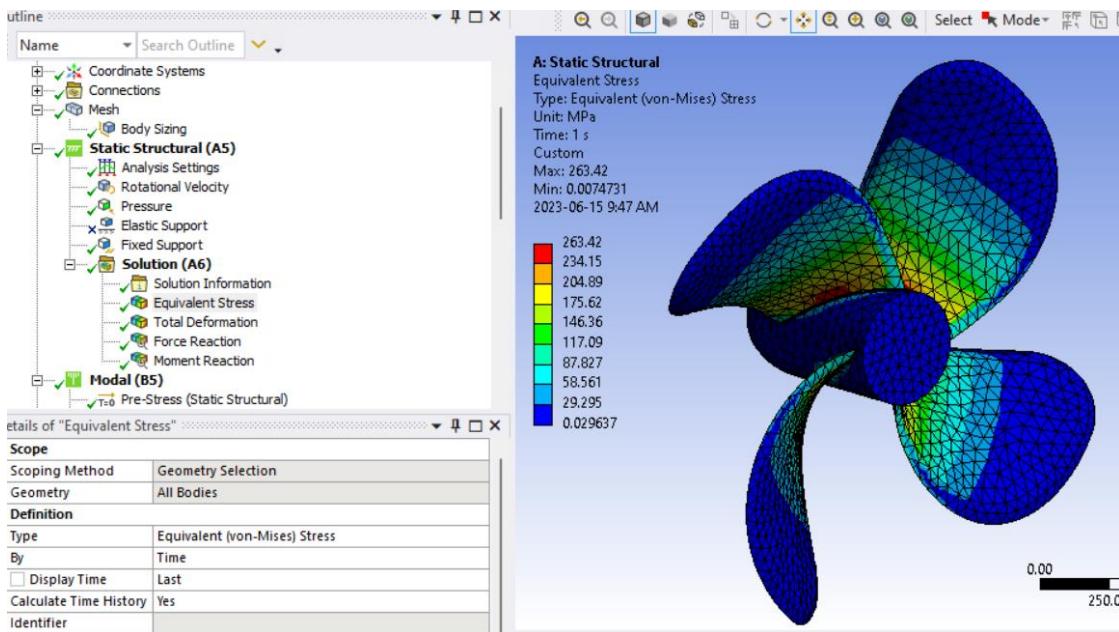


تصویر ۴-۸) نیروی نوسانی تراست پروانه نمونه



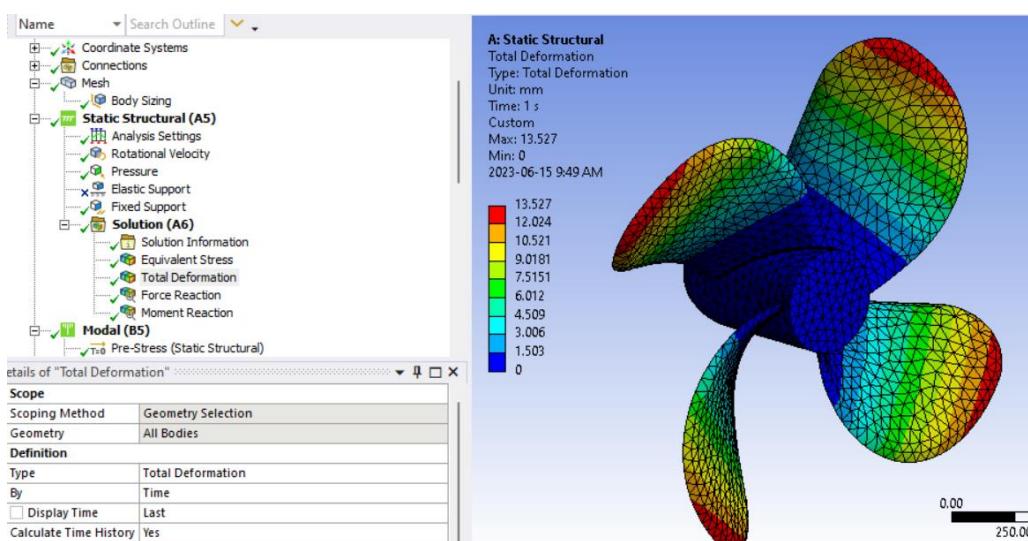
تصویر ۴-۹) گشتاور نوسانی پروانه نمونه

۲-۳-۴) تحلیل تنش و جابجایی



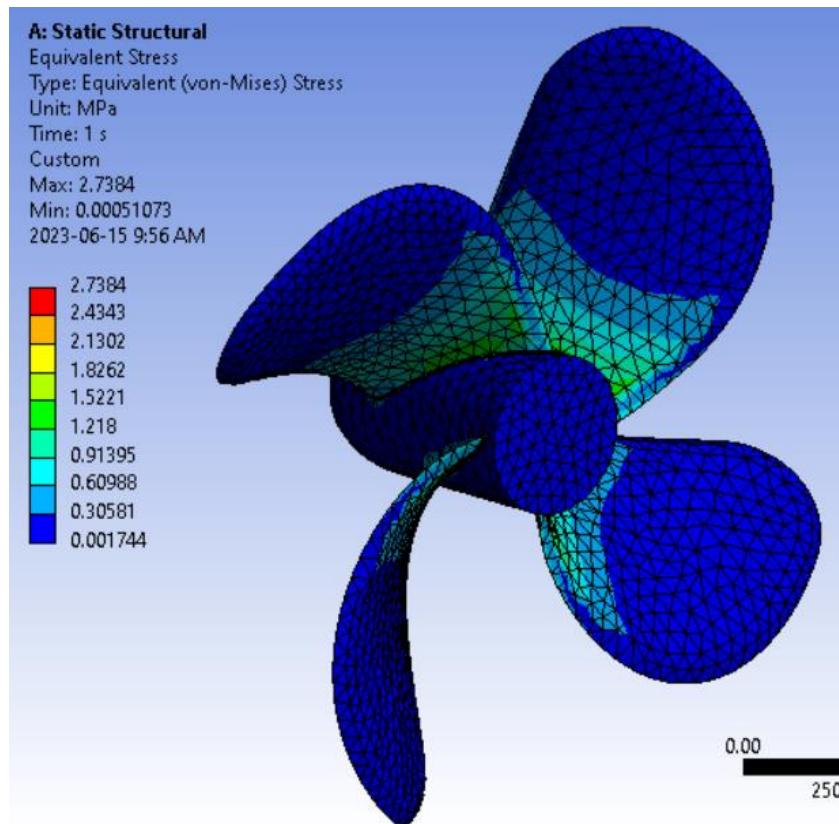
تصویر ۴-۱۰) تنش پروانه تحت شرایط ذکر شده در شکل

مقدار تنش و جابجایی پروانه تحت شرایط اعمال بصورت شکل‌های ۱۰-۴ و ۱۱-۴ است. همانطور که مشخص است ماکزیمم تنش فون مایزر برابر با ۲۶۳ مگاپاسکال و طبق انتظار در ریشه پره است. همچنین ماکزیمم جابجایی استاتیک برابر با ۱۳.۵ میلیمتر و در انتهای پروانه است. نیروی تراست همانطور که در بخش ۲-۴ بیان شد برابر با ۱۶۱ کیلو نیوتون شده است.

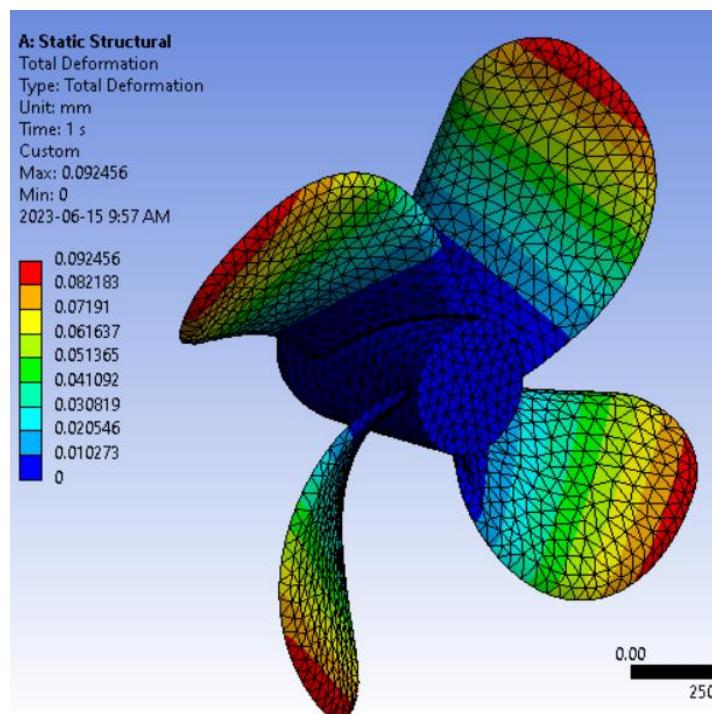


تصویر ۴-۱۱) جابجایی پروانه تحت شرایط ذکر شده در شکل

۴-۳-۴) ارزیابی سهم دوران در تنش و جابجایی: برای ارزیابی سهم دوران و فشار در تنش، مقادیر تنش و جابجایی فقط با در نظر گرفتن دوران ارزیابی شده است که در شکل ۱۲-۴ نشان داده شده است و مشخص است که دوران سهم ناچیزی در تنش و جابجایی دارد و دور حاضر از نظر سازه‌ای برای این فن پایین است و پتانسیل دورهای بسیار بالاتر را از این نظر دارد.

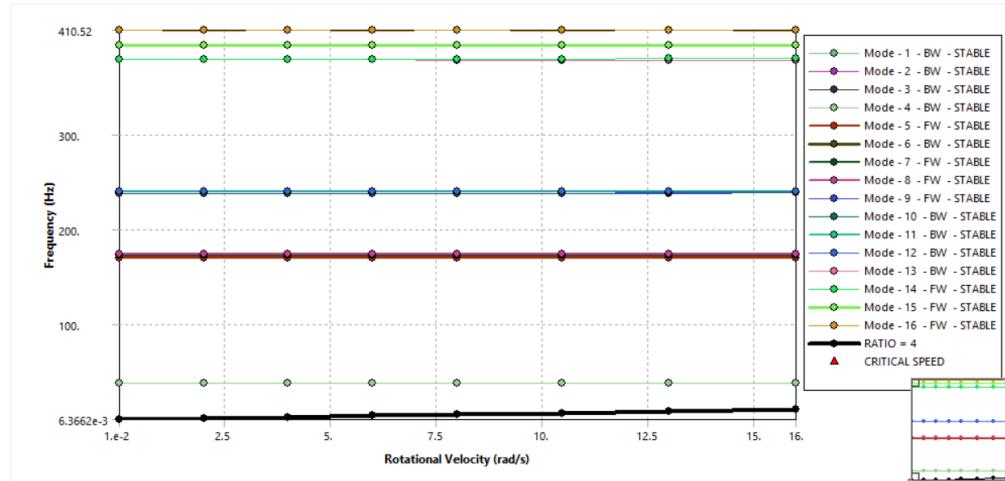


تصویر ۱۲-۴) تنش پروانه تحت فقط دوران

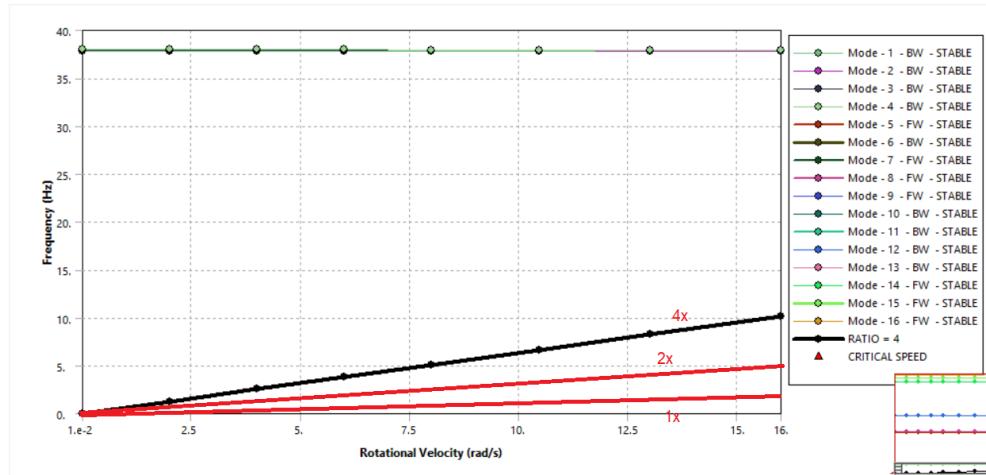


تصویر ۱۱-۴) جابجایی پروانه تحت فقط دوران

۴-۳-۴) دیاگرام کمپل : آنالیز فرکانسی پره برای دوارده مد اول انجام شده است و دیاگرام کمپل برای پروانه تا ۱۶ رادیان بر ثانیه که حدود ۱,۵ برابر دور کاری است، رسم شده است. همانطور که مشخص است حتی تحریک ۴X با اولین فرکانس طبیعی نیز برخورد نداشته است و در این محدوده رزوونانسی رخ نمی‌دهد و اصطلاحاً این پروانه در این محدوده کاری صلب است. نمودار حوزه فرکانس پایین در شکل رسم شده است. به دلیل تقارن پروانه و شباهت سازه‌ای، مشخص است که مدهای پروانه به صورت خانواده چهار تائی در نمودار قرار دارند.

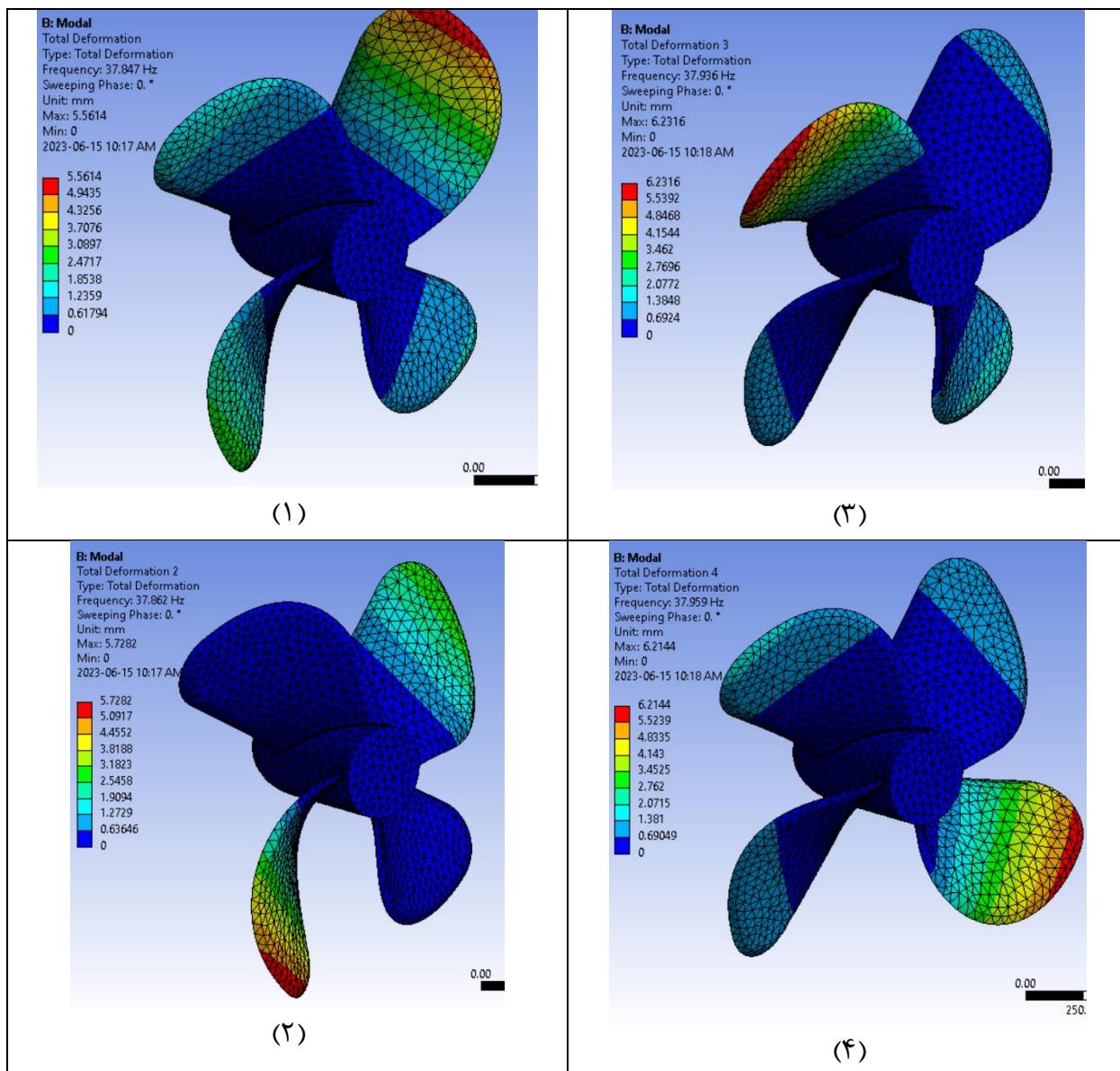


تصویر ۱۲-۴) دیاگرام کمپل پروانه



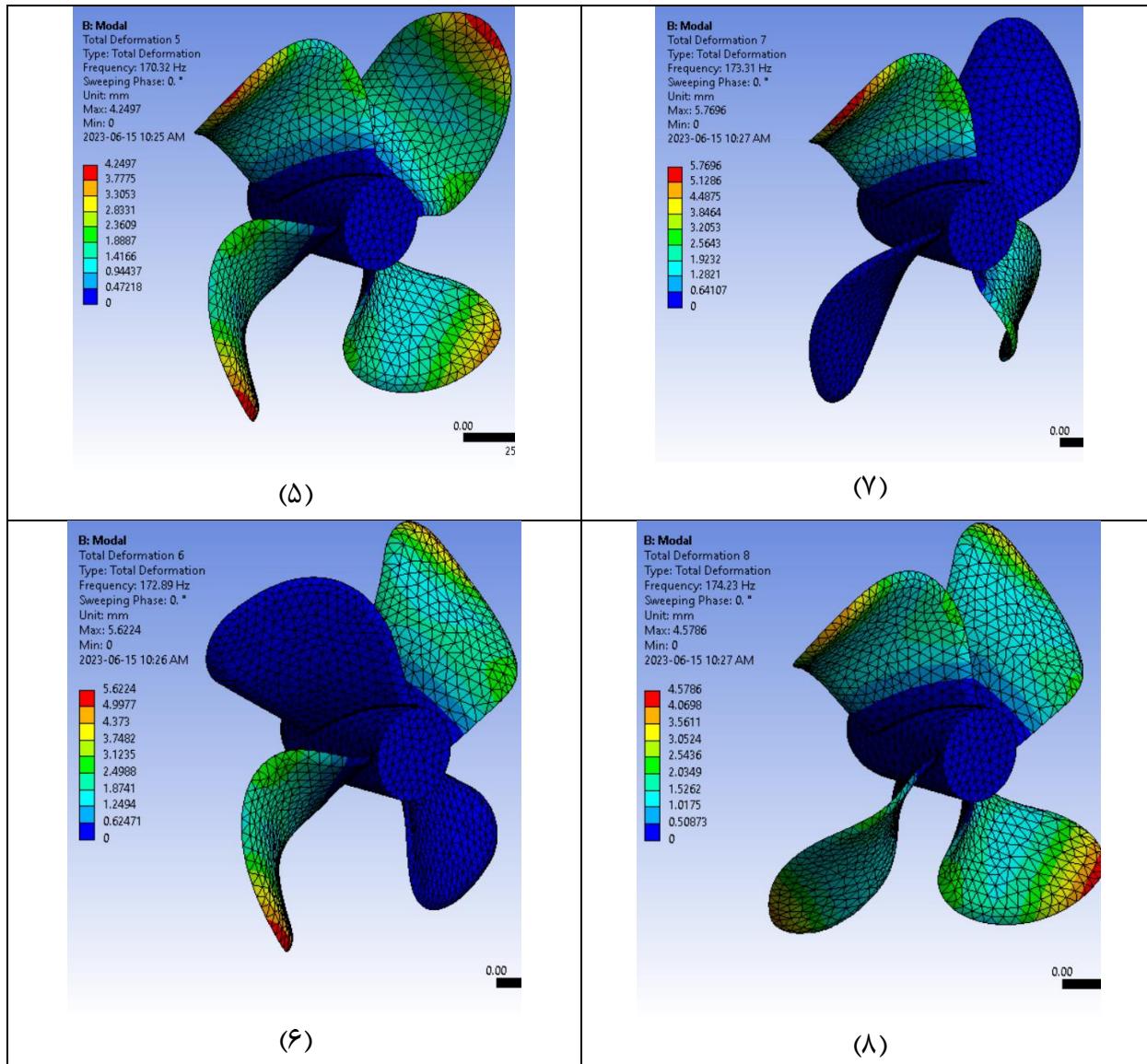
تصویر ۱۳-۴) دیاگرام کمپل پروانه حوزه فرکانس پایین پروانه

در شکل ۱۴-۴ چهار شکل مد اول پروانه (خانواده اول) نشان داده شده است که در واقع مد اول خمینی پره است.



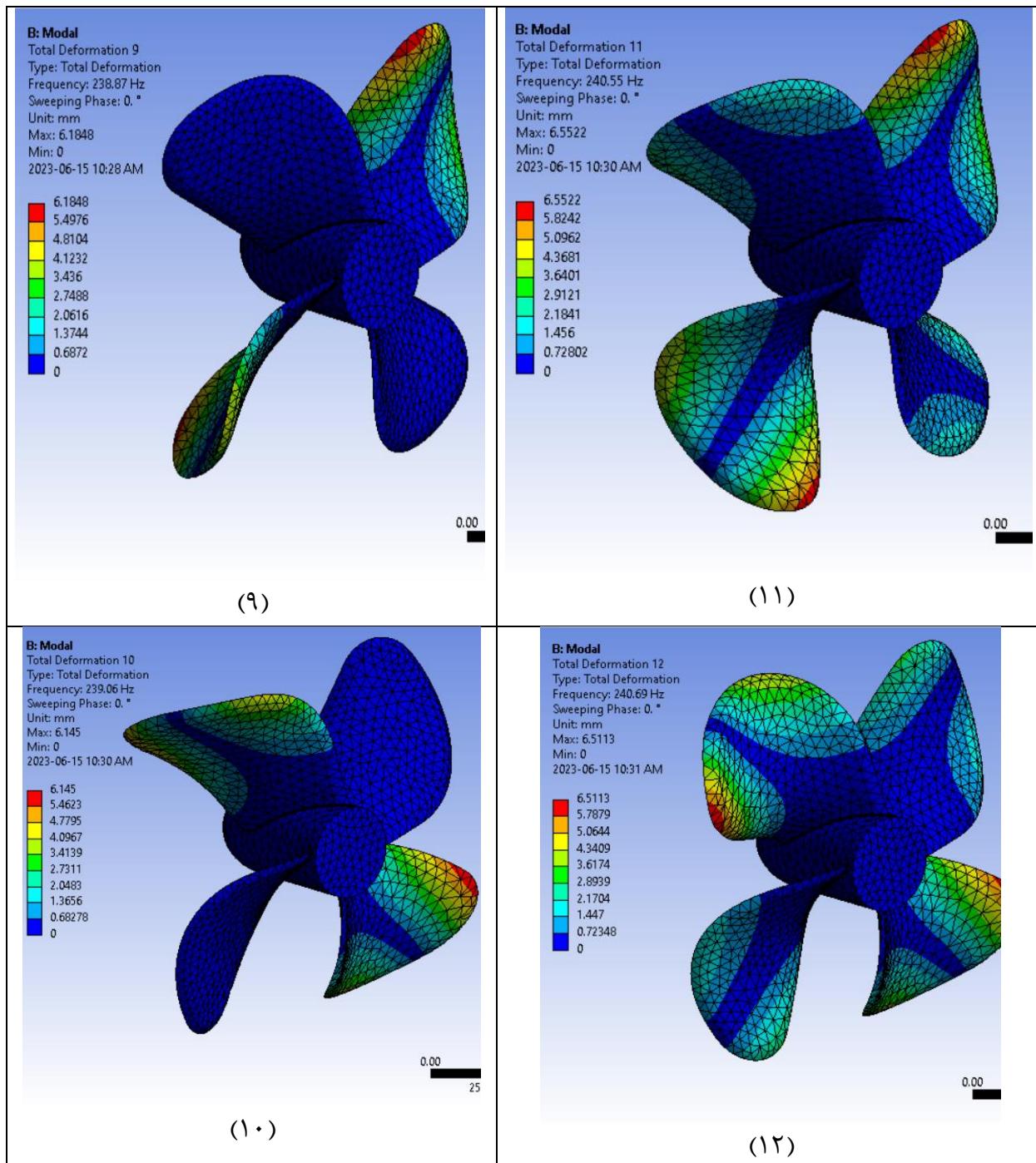
تصویر ۱۴-۴) مدهای اول تا چهارم پروانه (خانواده اول)

در شکل ۴-۱۵ چهار شکل مدهای پنجم تا هشتم پروانه (خانواده دوم) نشان داده شده است که در واقع مد دوم خمی پره هستند. این مدها در دیاگرام کمپل هم مشخص است که بسیار به هم نزدیک هستند.



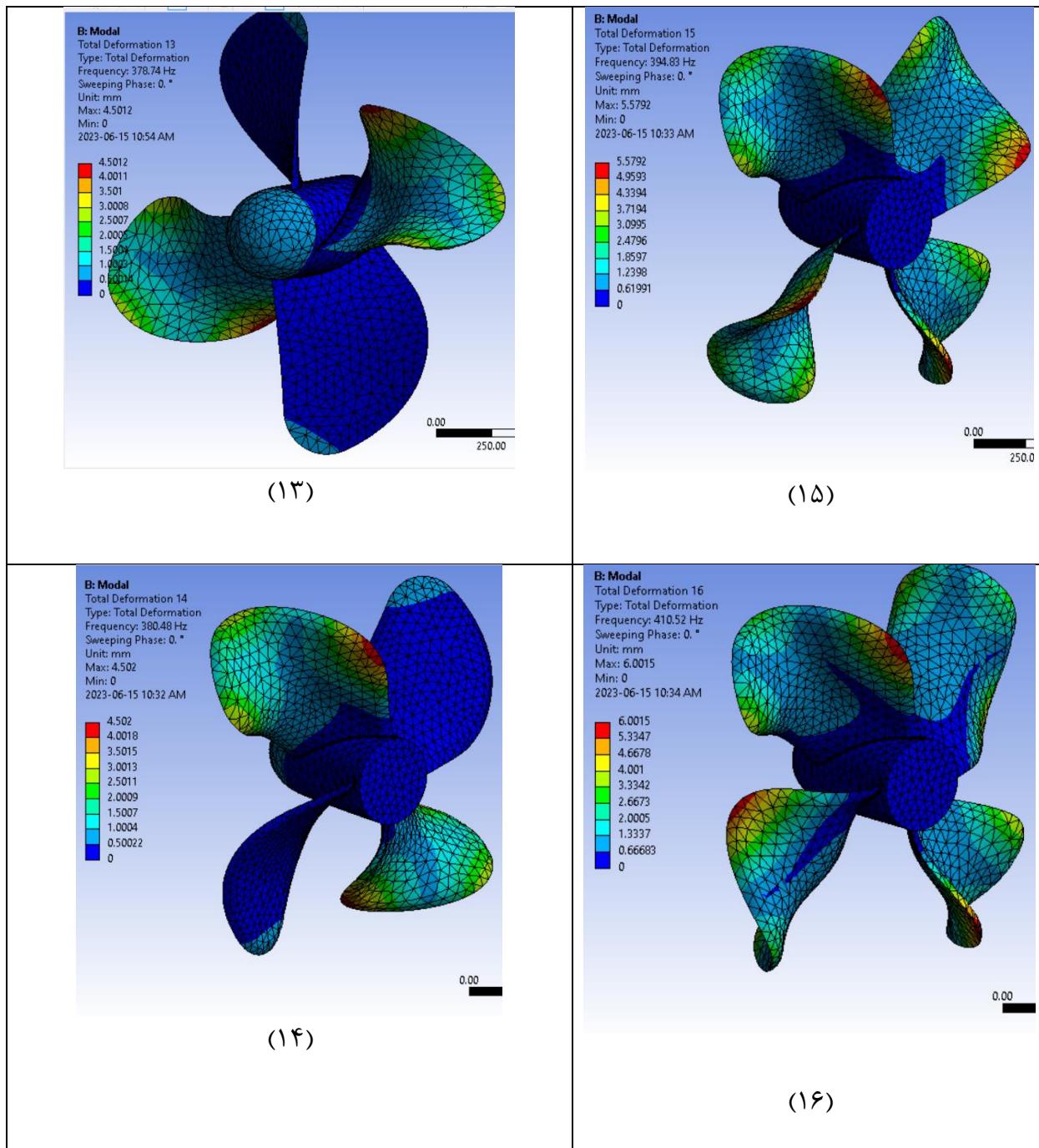
تصویر ۴-۱۵) مدهای پنجم تا هشتم پروانه (خانواده دوم)

در شکل ۱۶-۴ چهار شکل مدهای نهم تا دوازدهم پروانه (خانواده سوم) نشان داده شده است که در واقع مد اول پیچشی پره هستند. این مدها در دیاگرام کمپل هم مشخص است که بسیار به هم نزدیک هستند.



تصویر ۱۵-۴) مدهای نهم تا دوازدهم پروانه (خانواده سوم)

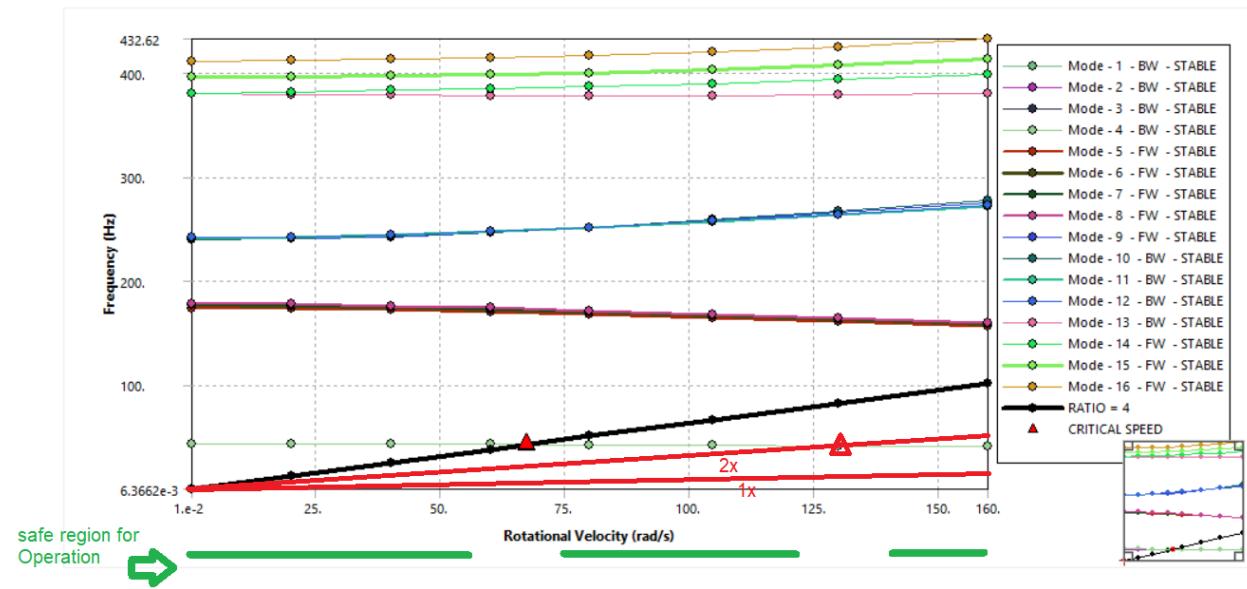
در تصویر ۴-۱۶ چهار شکل مدهای سیزدهم تا شانزدهم پروانه (خانواده چهارم) نشان داده شده است که در واقع مد سوم خمی پر هستند. این مدها در دیاگرام کمپل مشخص است که از هم اندکی فاصله دارند و دلیل آن این است در این محدوده فرکانسی دیسک به تدریج به ناحیه انعطاف‌پذیری نزدیک می‌شود و تبادل انرژی و تداخل فرکانسی بین پره‌ها از طریق دیسک به طور عمدی رخ می‌دهد.



تصویر ۴-۱۶) مدهای سیزدهم تا شانزدهم پروانه (خانواده سوم)

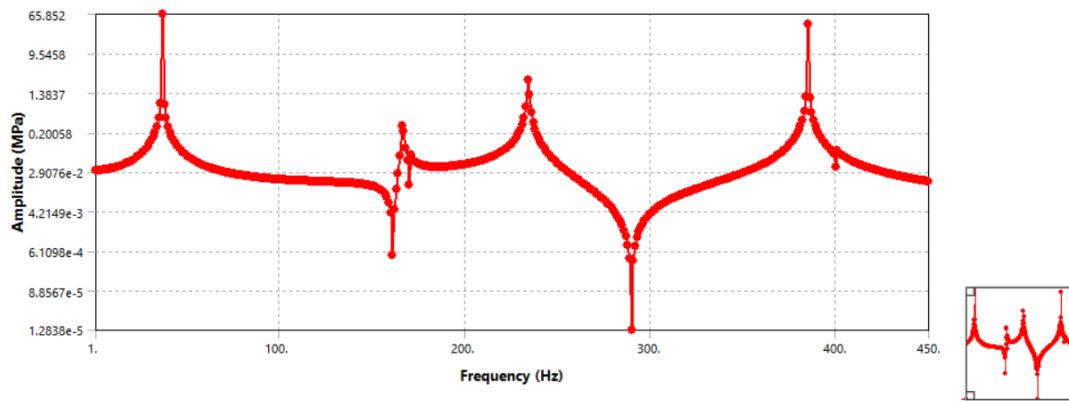
در تصویر ۱۷-۴ دیاگرام کمپل برای پروانه در محدوده سرعت بسیار بزرگتر تا حدود ۱۵۰۰ دور بر دقیقه رسم شده است. همانطور که مشخص است در حدود ۶۷ و ۱۳۴ رادیان بر ثانیه رزونانس رخ می‌دهد و محدوده کاری نامناسب همین فرکانس و ده درصد بالا و پایین آن است. همچنین مشخص است که فرکانس‌های طبیعی خانواده دوم تا چهارم با دور به دلیل اثر کشش ناشی از نیروی به سمت مرکز و اثر ممان ژیروسکوپیک تغییر پیدا کرده‌اند.

Campbell Diagram

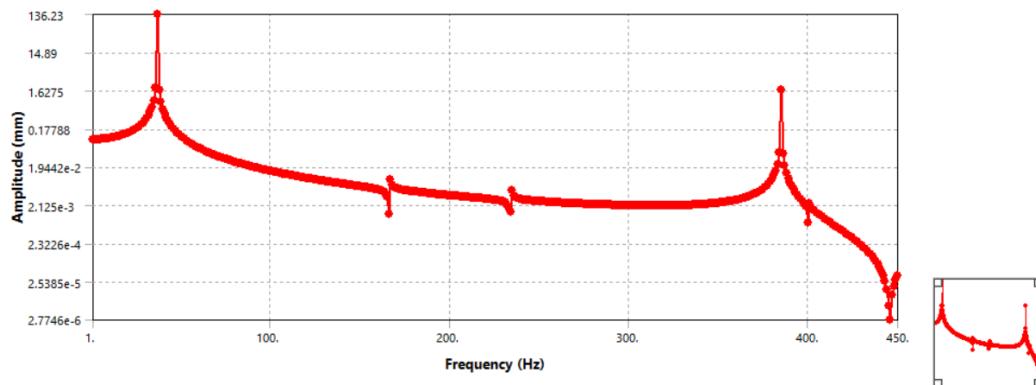


تصویر ۱۷-۴) دیاگرام کمپل برای پروانه در محدوده سرعت بالاتر و محدوده های عملکردی مشخص

۴-۳-۵) تنش دینامیکی: در بخش بعدی، نوسانات فشار در حد یک درصد فشار استاتیک به پره‌ها که برابر با ۰,۰۰۰۹۶۷۷ مگاپاسکال وارد شده است و با استفاده از آنالیز مودال و هارمونیک در نرم‌افزار ANSYS، تنش دینامیکی در ریشه پره و جابجائی پره در انتهای آن بصورت تابعی از فرکانس تحریک در شکل‌های زیر ارائه شده است. همانطور که مشخص است در رزونانس‌ها دامنه نوسان و تنش بزرگ است و ماکریم آنها به ترتیب برابر با ۱۳۶ میلیمتر و ۶۵ مگاپاسکال است که در مد اول رخ می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود، در این نمودارها پیک‌ها در فرکانس‌های خانواده اول تا چهارم در محدوده ۴۰، ۱۷۰، ۲۳۰ و ۴۰۰ هرتز رخ می‌دهد. البته با توجه به دور کاری که تا حدود ۱۲ هرتز است، همانطور که مشخص است پیکی در نمودار وجود ندارد و همانطور که بیان شد، پروانه صلب است.



تصویر ۱۸-۴) تنش دینامیکی در ریشه پره تحت فشار نوسانی ۰,۰۰۰۹۶۷۷ مگاپاسکال (یک درصد فشار استاتیک)



تصویر ۱۹-۴) جابجایی دینامیکی در ریشه پره تحت فشار نوسانی ۰,۰۰۰۹۶۷۷ مگاپاسکال (یک درصد فشار استاتیک)

پیوست:

پیوست ۱) کد MATLAB مورد استفاده برای تراست و گشتاور نوسانی

```
t=0:0.0003:2; % time
Th=161.491; % Nominal Thrust kN
TQ=1.543; % Nominal Torque Mn.m
N=4; % Number of blades
RV=100; % propeller rotational velocity (rpm)
omega=RV*2*pi/60; % rad/s
figure(1)
FTh=Th.* (1+0.01.*sin(N.*omega.*t)+0.001.*sin(2.*N.*omega.*t)+0.0001.*sin(3.*N.*omega.*t)+0.001.*sin(30.*N.*omega.*t));
plot(t,FTh)
figure(2)
FTQ=TQ.* (1+0.01.*sin(N.*omega.*t)+0.001.*sin(2.*N.*omega.*t)+0.0001.*sin(3.*N.*omega.*t)+0.001.*sin(30.*N.*omega.*t));
plot(t,FTQ)
```

منابع :

- [1] Chao Wang, Shuai Sun, Liang Li, Liyu Ye, Numerical prediction analysis of propeller bearing force for full-scale Hull-propeller-rudder system, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering (2016) 1-13.
- [2] Design Propeller Of Fast Missile Boat 60 M By Using Gawn Series, C Kusuma et al 2021
- [3] Estimation of the Induced Hydrodynamic Periodic Forces of Marine Propeller under Non-Uniform Inflow via CFD, Mohamed Bennaya a, Wenping Zhang, Moutaz M. Hegaz
- [4] SHIP VIBRATIONS, W S Vorus
- [5] Experimental and Numerical Investigation of Marine Propeller Cavitation, R. Arazgaldi , A. Hajilouy; and B. Farhanieh
- [6] Numerical Studies of Propeller Exciting Bearing Forces under Nonuniform Ship's Nominal Wake and the Influence of Cross Flows, Huilan Yao
- [7] Generalization of Den Hartog's Equal-Peak Method for nonlinear primary systems, G. Habiba , T. Detroux, and G. Kerschen
- [8] Numerical analysis of propeller exciting force in oblique flow, Chao Wang · Shengxia Sun
- [9] Nonlinear Vibration Behaviors of Marine Rotor System Coupled With Floating Raft-Airbag-Displacement Restrictor Under Ship Heaving Motion, Xi'an University of Science and Technology, Li, Ming; Xi'an University of Science and Technology Wang, Junwei; Xi'an University of Science and Technology
- [10] FORCES ON THE PROPELLER BLADES
- [11] Numerical prediction analysis of propeller bearing force for full-scale hullepropellererudder system Chao Wang, Shuai Sun, Liang Li, Liyu Ye
- [12] Analysis of hull, propeller and engine interactions in regular waves by a combination of experiment and simulation M. Hossein Ghaemi1 · Hamid Zeraatgar
- [13] طراحی و تحلیل عددی پروانه جلوبرنده شناور لاپروب خزر احمد عابدینی