

بررسی ارتعاشات آزاد و اجباری شفت و پروانه شناور با استفاده از کوپل حجم محدود، المان مرزی و المان محدود

احسان یاری و حسن قاسمی *

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۹/۲۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۵/۲)

چکیده - هدف از ارائه این مقاله ارائه الگوریتم کاربردی جهت تحلیل ارتعاشات شفت - پروانه در شناورهای دریایی می‌باشد. در ابتدا شناور زیرسطحی در سرعت‌های مختلف در حالت ناپایا با استفاده از روش حجم محدود مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج به‌دست آمده از این تحلیل میدان دنباله پاشنه شناور و ورودی به پروانه در زمان‌های مختلف استخراج شده است. میدان جریان ورودی به پروانه در کد المان مرزی لحاظ شده است و با استفاده از این کد پروانه شناور در حالت ناپایا مورد تحلیل قرار گرفته است و نیروها و گشتاورهای اصلی و جانبی روی پروانه استخراج شده است. سپس داده‌های به‌دست آمده از روش المان مرزی به‌همراه هندسه دقیق شفت و پروانه با استفاده از روش المان-محدود مورد بررسی قرار گرفته است. فرکانس طبیعی و اجباری پروانه در مدهای ارتعاشی مختلف تعیین شده‌اند. با توجه به داده‌های به‌دست آمده از آنالیز عددی المان محدود، بیشترین جابجایی پروانه مربوط به نوک پره در حالت ارتعاشات اجباری می‌باشد.

واژگان کلیدی: ارتعاشات پروانه، شفت، المان مرزی، المان محدود، حجم محدود.

Free and Forced Vibrations of a Shaft and Propeller Using the Couple of Finite Volume Method, Boundary Element Method and Finite Element Method

E. Yari and H. Ghassemi

Department of Ocean Engineering, Amirkabir University of Technology

Abstract: *The main objective of this paper is to provide an applied algorithm for analyzing propeller-shaft vibrations in marine vessels. Firstly an underwater marine vehicle has been analyzed at different speed in unsteady condition using the finite volume method. Based on the results of this analysis, flow field of marine vehicle (wake of stern) and velocity inlet to the marine propeller is extracted at different times. Propeller inlet flow field is applied in the boundary element code and using this code, marine propeller has been analyzed in unsteady state. In continue, main / lateral forces and moments over the propeller are extracted. Then the data obtained from the boundary element code alongwith exact geometry of the propeller and shaft have been studied, using finite element code. Natural and forced frequency of the propeller have been determined in various modes of vibration. According to obtained data from Finite Element Method (FEM) numerical analysis, maximum displacement of propeller is for displacement of the propeller tip in forced vibration state*

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: gasemi@aut.ac.ir

Keywords: Propeller vibration, shaft, Boundary Element Method (BEM), Finite Element Method (FEM), Finite Volume Method (FVM).

فهرست علائم

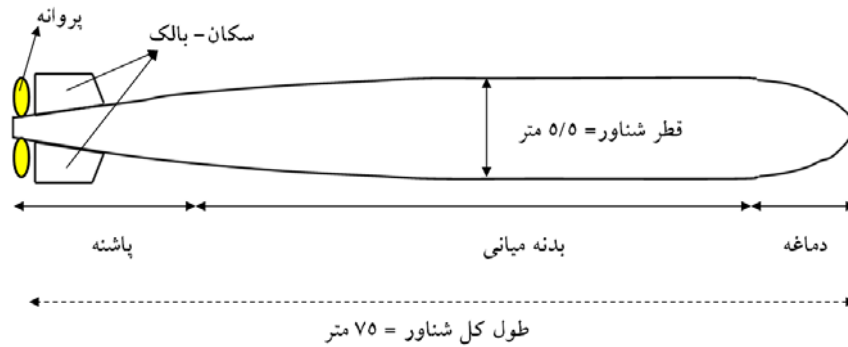
سطح پشت پره	B	سطح جسم	S_B
ضریب فشار	C_p	سطح دنباله	S_W
قطر پروانه	D	سطح مرز در بینهایت	S_∞
سطح جلویی پره	F	تراست پروانه (نیروی پیشبرنده)	T
$G(x, \bar{x})$ تابع گرین	$G(x, \bar{x})$	سرعت پیشروی	V_A
ضریب پیشروی	J	میدان سرعت پاشنه شناور	V_{IN}
ضریب تراست	K_T	سرعت سطح دنباله در جهت عمود	V_n
ضریب گشتاور یا ممان	K_Q	سرعت متوسط سیال روی دنباله	V_m
طول شناور زیرسطحی	L	سرعت مرجع	V_{ref}
سرعت دورانی پروانه	n	سرعت ورودی به پروانه	V_o
بردار نرمال هر المان به سمت بیرون	\mathbf{n}	لزجت سینماتیکی	ν
تعداد چرخش پروانه	Nt	چگالی سیال	ρ
فشار	p	پتانسیل سرعت	ϕ
فشار مرجع سیال	P_{ref}	دامنه سیال	Ω
گشتاور پروانه	Q		

۱- مقدمه

بررسی ارتعاشات شفت و پروانه شناورهای دریایی تأثیر به‌سزایی بر روی عملکرد، سازه شناور، نوین انتشاری و سایر پارامترهای مربوطه دارد. معمولاً پروانه شناور به‌عنوان منبع ارتعاش و نویز بوده و از طریق شفت به مدار انتقال قدرت و به دنبال آن به شناور منتقل می‌گردد. بررسی دقیق ارتعاشات شفت و پروانه به میدان جریان و دنباله^۱ ورودی به پروانه، نوسانات فشار و پارامترهای مختلفی که بر روی شفت قرار دارند وابسته می‌باشد. بررسی ارتعاشی شفت و پروانه می‌تواند عامل بهینه‌سازی پروانه و شفت و محل قرارگیری یاتاقان‌ها و سایر اجزای مربوطه می‌باشد.

با توجه به اهمیت این موضوع از گذشته تا کنون فعالیت‌های گسترده و مختلفی بر روی ارتعاشات شفت و پروانه صورت گرفته است. کاستلینی و سانتولینی اندازه‌گیری

ارتعاشات در پروانه‌های دریایی چرخان در آب با استفاده از دستگاه ردیاب نوسان‌نگار لیزر^۲ مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق داده‌ها برای هر دو حالت چرخش پروانه در آب و هوا مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند [۱]. آل یاسین و همکاران ارتعاش خمشی شفت‌های دوار با مدل‌سازی ترکیبی دامنه فرکانسی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق با کاهش مرتبه مدل حل دقت به‌دست آمده در محدوده قابل قبولی بوده است [۲]. کیناس و بلور به تحریک ارتعاشی بدنه شناور ناشی از منابع نویز تک‌قطبی^۳ و دوقطبی^۴ پروانه پرداختند [۳]. دابلجکو و همکاران به بهینه‌سازی تغییر دهنده تشدید^۵ جهت مینیمم کردن ارتعاشات انتقالی در شناورهای دریایی پرداختند. در این تحقیق با توجه به منابع نویز در زیردریایی یک الگوریتم با توابع غیرخطی جهت بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. چن و شیخ ارتعاشات یک



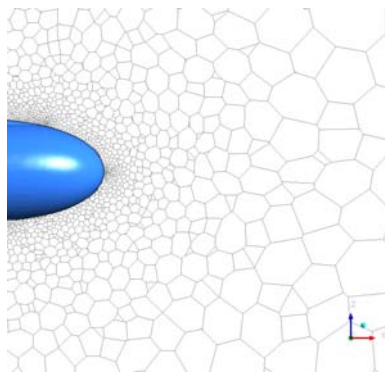
شکل ۱- هندسه شناور زیر سطحی

دهد [۸]. هونگ و همکاران آنالیز ارتعاشی و استهلاک (دمپینگ) یک پره کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند. داده‌های به‌دست آمده نشان می‌دهند که راندمان دینامیکی ساختار کامپوزیتی می‌تواند با کامل کردن طراحی مستهلک کننده افزایش یابد [۹]. یینگ سان و همکاران به پیش بینی عددی پاسخ آکوستیکی پروانه تحریک شده توسط سازه زیردریایی براساس دینامیک سیالات محاسباتی، المان محدود و المان مرزی پرداختند [۱۰]. در مطالعه حاضر شناور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه حجم محدود در سرعت مشخص در حالت ناپایا تحلیل شده است و میدان جریان غیریکنواخت ورودی به پروانه یا همان میدان دنباله ورودی به پروانه مشخص شده و با استفاده از روش المان مرزی در حالت ناپایا پروانه مورد نظر تحلیل و تراست و گشتاور و نیروها و ممان‌های جانبی برحسب زمان استخراج شده اند. سپس هندسه شفت و پروانه با نوسانات فشار و نیرویی به‌دست آمده برروی آن با استفاده از روش المان محدود تحلیل و شرایط مرزی به‌دست آمده از روش المان مرزی در تحلیل المان محدود لحاظ شده است. درنهایت نتایج به‌دست آمده در حالت ارتعاشات آزاد و اجباری مورد بررسی قرار گرفته است.

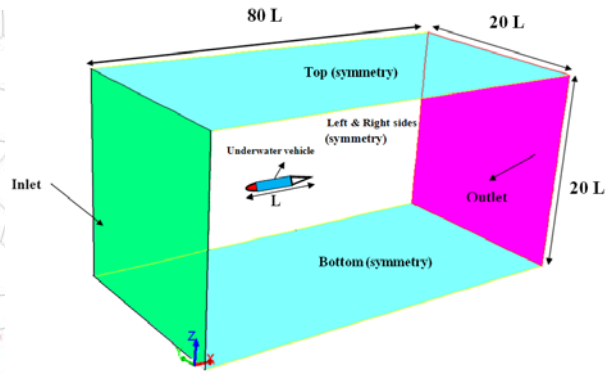
۲- مشخصات کلی شناور و پروانه

شناور مورد مطالعه یک شناور زیرسطحی مطابق شکل (۱) می‌باشد. شناور دارای طول ۷۵ متر و قطر ۵/۵ متر می‌باشد.

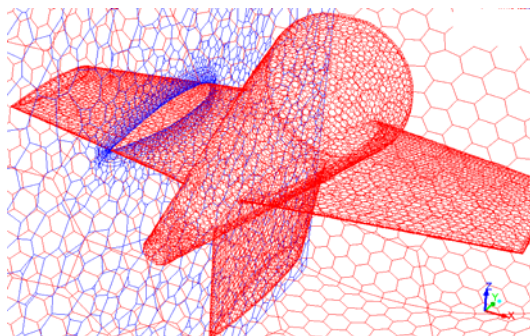
سری از پروانه‌ها را با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار دادند. با توجه به اینکه پارامترهای زیادی در ارتعاشات پروانه دخیل می‌باشند، لذا الگوریتم ژنتیک می‌تواند ابزار مناسبی باشد. با استفاده از الگوریتم ژنتیک و بر پایه داده‌های سری پروانه امکان دست‌یابی به راندمان مناسب و سطح پایین ارتعاشات وجود دارد [۵]. مو تاشر به پیش‌بینی مقاومت پیچشی شفت ترکیبی آلومینیوم- کامپوزیت پرداخته است. در این مطالعه ترکیب آلومینیوم- کامپوزیت به صورت یک ماده کامپوزیتی پیشرفته می‌باشد که شامل تیوب‌های آلومینیومی پیچیده شده می‌باشد که برروی سطح خارجی آنها لایه‌های کامپوزیت قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده از این شفت شامل کاهش ارتعاشات پیچشی و خمشی و کاهش نویز می‌باشد. نتایج با استفاده از تحلیل‌های المان محدود استخراج شده‌اند [۶]. ساسچ و همکاران به مینیم کردن قدرت صوت منتشره توسط یک زیردریایی با در نظر گرفتن بهینه‌سازی تغییردهنده تشدید پرداخته‌اند. در این تحقیق نوسانات فشار ناشی از بدنه برروی پروانه در نظر گرفته شده است. جهت بهینه‌سازی شفت و کاهش ارتعاشات پروانه به بدنه یک سیستم هیدرولیکی تغییر دهنده تشدید بین پروانه و شفت در نظر گرفته شده است [۷]. وریچف به بررسی ارتعاشات پیچشی نامنظم شفت نامتوازن که توسط یک منبع تغذیه محدود راه‌اندازی می‌شود پرداخته است. در این مطالعه نشان داده شده است که بررسی سیستم دینامیکی که شامل عکس‌العمل بین شفت و سیستم تغذیه می‌باشد می‌تواند جزئیات بیشتری را از ارتعاشات پیچشی شفت در اختیار ما قرار



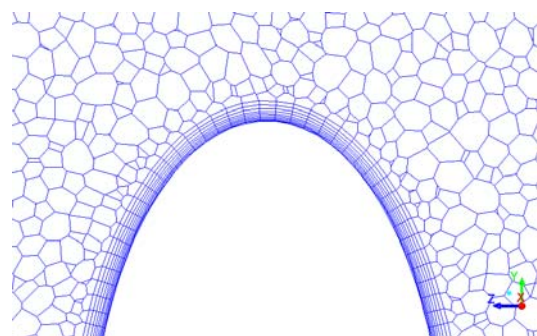
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲- (الف) دامنه محاسباتی حول شناور زیرسطحی، (ب) شبکه تولید شده حول دماغه و ناحیه محاسباتی و (ج) لایه مرزی بر روی مقطع دماغه

هاب^۸ پروانه مخروطی است و شعاع لبه انتهایی^۹ هر مقطع ۰/۲ میلی متر است. پروانه این شناور، چپ گرد است. مشخصات پروانه در جدول (۱) آمده است.

۲-۱- شبکه به کار رفته برای حل عددی جریان

در این بخش به منظور شبیه سازی جریان حول جسم، شبکه محاسباتی که در حل عددی به کار رفته، توضیح داده شده است. در شکل (۲-الف) محدوده حل برحسب طول شناور و همچنین به طور نمادین مرزهای ورودی و خروجی محدوده حل را نسبت به موقعیت قرارگیری جسم نشان می دهد. همچنین شبکه به کار رفته در شکل (۲-ب) الی (۲-ج) شکل ارائه شده است. استفاده از شبکه ترکیبی و روش های بهینه سازی شبکه این امکان را فراهم کرده است که بتوان این مسئله را در حالت سه بعدی با حدود چهار میلیون سلول در محدوده محاسباتی

جدول ۱- مشخصات کلی پروانه شناور

۲/۱۸	قطر پروانه (برحسب متر)
متغیر	گام پروانه (برحسب متر)
متغیر	نسبت گام
۰/۶۵	نسبت مساحت دیسک ^{۱۰}
۲/۵	مساحت پره گسترش یافته ^{۱۱}
۶	تعداد پره ها

پروانه شناور دارای توزیع گام متغیر و نزولی در راستای شعاعی است.

این پروانه دارای توزیع اسکینو^۶ متعادل و توزیع ریک^۷ صفر است. شعاع پخ در ریشه هر پره، ۶۰ میلی متر است. ماکزیمم بارگذاری روی این مدل، در ۰/۶ شعاع پروانه اتفاق می افتد.

۰-۰/۲۵	۰/۲۵-۰/۵	۰/۵-۰/۸	۰/۵-۰/۸	۰/۹۵-۰/۹۸	۰/۹۸-۱/۱۰۰
عالی	خیلی خوب	خوب	قابل پذیرش	بد	غیر قابل پذیرش

شکل ۳- کیفیت سلول‌ها بر اساس پیش‌سلول^{۱۲}

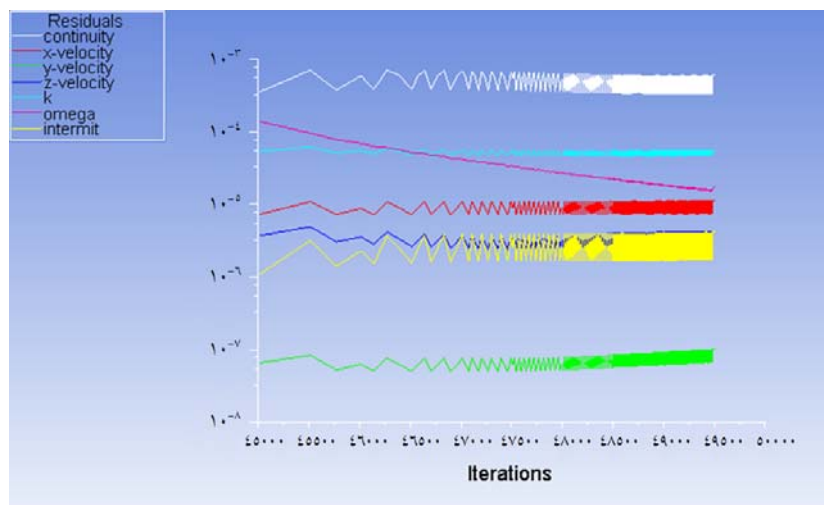
خلاصه EQUISIZE SKEW المان‌های سه بعدی چهاروجهی شکل

از مقدار	تا مقدار	تعداد المان‌ها در محدوده	درصد تعداد المان‌ها در محدوده (۴۱۰۳۸۸۶)
۰	۰/۱	۵۸۰۸۹۲	۱۴/۱۵
۰/۱	۰/۲	۱۳۹۸۶۷۲	۳۴/۰۸
۰/۲	۰/۳	۱۰۴۰۲۳۸	۲۵/۳۴
۰/۳	۰/۴	۶۰۳۱۹۱	۱۴/۶۹
۰/۴	۰/۵	۳۰۵۶۲۸	۷/۴۴
۰/۵	۰/۶	۱۲۰۰۶۶	۲/۹۲
۰/۶	۰/۷	۴۳۶۷۷	۱/۰۰
۰/۷	۰/۸	۱۰۲۳۸	۰/۲۵
۰/۸	۰/۹	۱۲۲۴	۰/۰۳
۰/۹	۱	۶۰	۰/۰۰
۰	۱	۴۱۰۳۸۸۶	۱۰۰/۰

کمترین مقدار اندازه‌گیری شده: ۰/۰۰۰۲۶۴۹۵۳

بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده: ۰/۸۰۸۷۹۳

شکل ۴- کیفیت سلول‌های تولید شده حول شناور زیرسطحی



شکل ۵- نمودار مانده‌ها برحسب تعداد تکرار

مطلوب باشد. این مطلب در شکل (۵) نشان داده شده است. حداکثر پیش‌اتفاق افتاده در شبکه برابر ۰/۹۳۸ است که در محدوده قابل قبول قرار دارد. در شبکه موجود بیش از ۹۹ درصد کل سلول‌های شبکه ایجاد شده در محدوده پیش‌سلول زیر ۰/۷ واقع شده که دارای کیفیت عالی تا خوب هستند و از

حل کرد. شبکه تولید شده با توجه به معیار تعریف شده در شکل (۳) و نتایج استخراج شده مطابق شکل (۴) از کیفیت بالایی برخوردار است. با استفاده از مقایسه دو شکل (۳) و (۴) ملاحظه می‌شود که کلیه سلول‌ها در محدوده عالی تا متوسط قرار دارند و بنابراین به لحاظ حل عددی انتظار می‌رود که همگرایی در روند حل مسئله

جدول ۲- شرایط جریان و خواص سیال

سیال	آب
چگالی	(کیلوگرم بر مترمکعب) ۱۰۲۵
لزجت سینماتیکی	۰/۰۰۰۰۰۰۱ (متر مربع بر ثانیه)
سرعت شناور	۱۶ گره دریایی
بازه زمانی حل ناپایا	۰/۰۰۰۱ ثانیه

سلول با فاصله آنها تا جسم رابطه مستقیم دارد. به عبارت دیگر از شبکه ریز در مجاورت جسم تا شبکه درشت نقاط دور از جسم تغییر می‌کند.

۳- شرایط جریان و مشخصات حل در روش حجم محدود

به منظور شبیه‌سازی جریان حول شناور، سیال آب در سرعت ۱۶ گره دریایی^{۱۳}، تحت زوایه حمله صفر به جسم برخورد می‌کند. در جدول (۲) شرایط جریان به طور خلاصه آورده شده است. بدیهی است که سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. سرعت سیال ثابت و مسئله به صورت ناپایا حل می‌شود. همچنین خواص سیال نیز ثابت فرض شده است.

۳-۱- مشخصات حل و شرایط مرزی

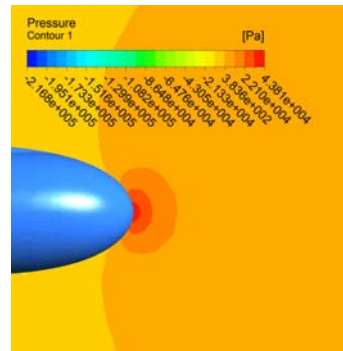
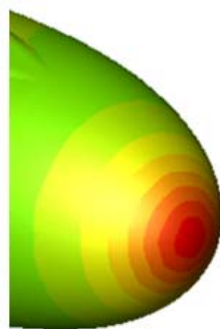
در مطالعه حاضر شرایط به این گونه است که جسم درون یک محدوده مکعبی محصور شده است. مرزهای این محدوده به اندازه‌ای از جسم فاصله دارد که تغییرات فشار ناشی از وجود جسم بر روی سطوح خارجی محدوده حل، قابل صرف نظر کردن باشد. شرط مرزی ورودی سرعت^{۱۴}، شرط مرزی فشار^{۱۵} در خروجی و شرط مرزی بر روی دیواره‌های جانبی متقارن^{۱۶} انتخاب شده است. شرط مرزی بدون لغزش نیز بر روی سطح جسم اتخاذ شده است. مدل آشفتگی که در مورد حل جریان در نظر گرفته شده، مدل $k-wsst$ است [۱۱]. برای حل از روش حل براساس فشار^{۱۷} استفاده می‌شود. ابتدا معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در سه جهت با یکدیگر حل می‌شوند. سپس معادلات انرژی جنبشی آشفتگی و معادله اتلاف^{۱۸} حل می‌شوند. قابل ذکر است در مدل $k-wsst$ جریان گذار به آشفتگی نیز مدل می‌شود. با توجه به مقدار ازجت سینماتیکی آب جریان در فاصله بسیار کوتاهی از نقطه سکون آشفتگی می‌شود. در جدول (۳) خلاصه‌ای از شرایط حل آورده شده است.

این مدل سازی براساس محاسبات سه بعدی رینولدز متوسط

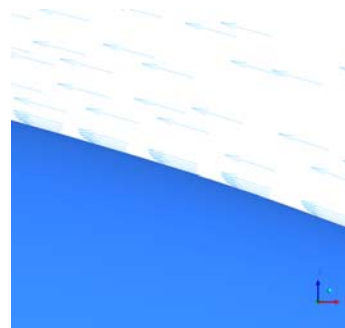
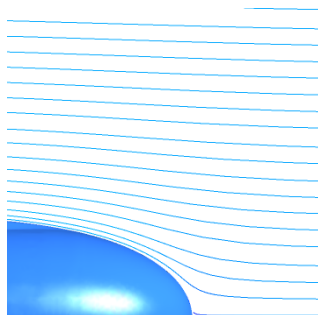
این لحاظ کیفیت کل شبکه به لحاظ پیچش مورد تأیید قرار می‌گیرد. شکل (۲-ج) شبکه تولید شده در جلوی بدنه شناور به دلیل وجود انحنای جسم شبکه ریزتری تولید شده تا این انحناء در حل عددی دیده شود و در انتهای بدنه و قسمت بالک‌ها نیز شبکه ریزتری تولید شده است که در شکل (۲-د) قابل مشاهده می‌باشد. یکی از روش‌های کاهش هزینه محاسباتی استفاده از لایه مرزی بر روی جسم است. وجود لایه مرزی باعث می‌شود تا تراکم شبکه در اطراف دیواره‌ها بیشتر باشد و پروفیل تغییرات سرعت در نزدیکی جسم به وضوح دیده شده و تنش برشی سیال بر روی دیواره‌ها به درستی محاسبه شود. در شکل‌های (۲-ج) و (۲-د) لایه مرزی به کار رفته در حل مسئله نشان داده شده است. شبکه مورد استفاده در حل عددی ترکیبی از شبکه با سازمان و بدون سازمان است. این امر منجر به کاهش حجم شبکه محاسباتی و در نتیجه کاهش هزینه محاسبات در مقایسه با زمانی که تمام شبکه محاسباتی به صورت با سازمان تولید شود، خواهد شد. اساساً می‌توان گفت که به غیر از محدوده نزدیک جسم به سبب مدل سازی اثرات لزجت و ملاحظات مدل آشفتگی و همچنین شدید بودن تغییرات سرعت و فشار، نیازی به ریز کردن شبکه در بقیه نواحی میدان حل نیست، لذا در تولید شبکه به جهت کاهش هزینه محاسبات در نزدیک جسم، شبکه به صورت با سازمان و در اطراف به صورت بی سازمان تولید شده است. همان طور که در شکل (۲) دیده می‌شود شبکه در مجاورت جسم ریزتر شده است. تغییرات شدیدتر فشار و سرعت نسبت به نقاط دور دست نیاز به تعداد بیشتر سلول محاسباتی دارند تا بتوانند به درستی مدل شوند بنابراین ابعاد

جدول ۳- شرایط حل عددی

ناپایا - بر پایه فشار	حلگر
ضمنی	فرمولاسیون
آپویند ^{۱۹} مرتبه دوم	نوع گسسته سازی معادلات
جریان ناپایا با مدل توربولانسی k - wsst	مدل توربولانسی
ساده	نوع کوپل سرعت و فشار
استاندارد	گسسته سازی فشار



شکل ۶- توزیع فشار استاتیکی بر روی بدنه شناور و مقطع دوبعدی گذرنده از دامنه محاسباتی



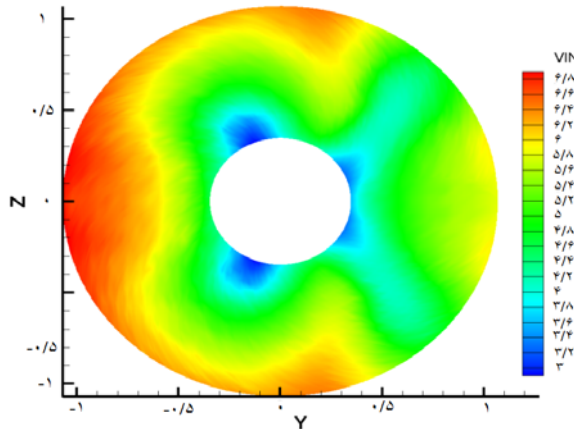
شکل ۷- بردارهای سرعت و خطوط جریان حول شناور بر روی مقطع دوبعدی گذرنده از دامنه محاسباتی

همگرایی مشاهده گردد. در شکل (۶) توزیع فشار بر روی سطح بدنه شناور زیرسطحی در قسمت سینه و پاشنه شناور و همچنین بر روی مقطع میانی گذرنده از دامنه محاسباتی حول شناور زیرسطحی نشان داده شده است. علاوه بر این بردارهای سرعت در لایه مرزی و خطوط جریان حول بدنه شناور نیز در شکل (۷) نمایش داده شده است.

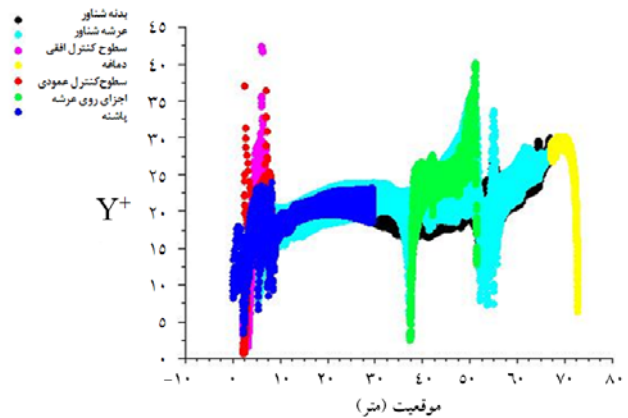
ناپایا^{۲۰} و محاسبات k-wsst انجام پذیرفته است. برای پیش بینی دقیق میدان دنباله، حل حجم محدود دقیق در حالت ناپایا باید به دست بیاید. حل رینولدز متوسط ناپایا معادلات نویر استوکس که در جریانهای خارجی برای محاسبه جریان به کار می رود، یک مرتبه مشخصی از میدان متوسط را به دست می دهد [۱۲]. در این آنالیز گام زمانی ۰/۰۰۰۱ ثانیه برای حل انتخاب شده و در حدود ۵۰۰۰۰ گام زمانی حل پیش رفته است تا

جدول ۴- بررسی شرط استقلال شبکه با افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی بر اساس نتایج نیروی مقاومت

فاصله اولین گرید از بدنه	حجم کل شبکه (سلول محاسباتی)	نیروی مقاومت (کیلو نیوتن)	درصد خطا نسبت به حالت نهایی
۰/۶ میلی متر	چهار میلیون	۲۵۵	---
۳ میلی متر	سه میلیون	۲۴۵/۵	۳/۷ درصد
۱۰ میلی متر	دو میلیون	۲۳۰	۹/۸ درصد



شکل ۹- جریان غیریکنواخت ورودی به پروانه در سرعت ۱۶ گره دریایی



شکل ۸- تغییرات y^+ بر روی بدنه شناور زیرسطحی

جسم بایستی زیر ۳۰ قرار گیرد که البته مقدار آن بهتر است که نزدیک به یک باشد. ضخامت به کار رفته در اولین سلول مجاور جسم برابر ۰/۶ میلی متر در نظر گرفته شده است. کل محدوده حل شامل حدوداً چهار میلیون سلول محاسباتی است. در شکل (۸) نمودار تغییرات y^+ بر روی بدنه شناور زیرسطحی در سرعت مورد بررسی ارائه شده است.

۳-۳- میدان جریان ورودی به پروانه

توزیع میدان سرعت ورودی به پروانه در سرعت ۱۶ گره دریایی شناور در شکل (۹) ارائه شده است. این توزیع سرعت پس از تحلیل میدان جریان اطراف شناور با استفاده از روش حجم محدود در قسمت پاشنه شناور تعیین شده است. این توزیع سرعت به عنوان میدان سرعت ورودی به پروانه در کد المان مرزی لحاظ شده است. داده‌های ورودی به کد المان مرزی با استفاده از روش

به منظور بررسی استقلال شبکه چند شبکه مختلف حول زیردریایی استفاده شده که هم از نظر فاصله اولین گرید از دیواره و هم تعداد سلول‌ها متفاوت می‌باشند. همانطور که در جدول (۴) نشان داده شده نتایج تحلیل‌ها از نظر مقادیر نیرویی مستقل از شبکه است.

۳-۲- تغییرات y^+ نسبت به اجزای جسم

در مدل $k-w$ SST نیاز است که شبکه تا نزدیکی جسم، جایی که قسمت لگاریتمی لایه مرزی آشفتگی محسوب می‌شود، ادامه یابد. در این قسمت از لایه مرزی مغشوش مقدار y^+ بین مقادیر ۱ تا ۳۰ قرار دارد. بنابراین ارتفاع اولین سلول مجاور جسم بایستی به اندازه‌ای باشد که پس از حل عددی y^+ آن در محدوده فوق قرار گیرد. بهتر است مقدار آن نزدیک به حد پایینی این بازه قرار گیرد. محدوده y^+ اولین سلول مجاور

میان‌یابی از داده‌های موجود در شکل (۹) استخراج شده است.

۴- روش المان مرزی جهت تحلیل جریان حول پروانه

استفاده از معادلات انتگرالی در مسائل مقدار مرزی دارای پیشینه‌ای طولانی است. در سال ۱۹۰۳ فردهولم^{۲۱} برای حل مسائل پتانسیل از معادلات انتگرالی تفکیک شده استفاده کرد که در راستای کارهای او روش المان مرزی غیرمستقیم شکل گرفت. در ادامه روش معادلات انتگرالی مرزی به سرعت توسعه پیدا کرده، این معادلات در مسائل غیرخطی پیشرفته نیز استفاده شدند. گذشت سالیان طولانی باعث شد روش معادلات انتگرالی مرزی با نام روش المان مرزی نیز شناخته شود.

اولین کاربرد روش المان مرزی برای تحلیل جریان خیس حول پروانه توسط هس و والارزو [۱۳] با استفاده از روش المان مرزی بر پایه سرعت و توسط لی با استفاده از روش المان مرزی بر پایه پتانسیل صورت گرفته است. بررسی‌های پیشرفته‌ای در دهه ۹۰ جهت کاربرد روش المان مرزی برای جریان روی پروانه توسط دانشگاه ام - آی - تی^{۲۲} صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به بررسی جریان خیس بر روی پروانه در حالت ناپایا توسط هسین [۱۴]، بررسی جریان کاویتاسیونی ناپایا بر روی پروانه توسط فاین [۱۵]، اشاره نمود. همچنین کارهای مشابهی در این راستا توسط کیم [۱۶] و لی [۱۷]، صورت گرفته است.

۴-۱- تئوری روش المان مرزی

در این بخش معادلات حاکم بر مسئله و شرایط مرزی مربوط به تحلیل عددی پروانه در حالت ناپایا با استفاده از روش المان مرزی بررسی می‌شود. روش المان مرزی بر پایه پتانسیل قادر به بررسی جریان بر روی اجسام با سطح بالاشو^{۲۳} و یا غیر بالاشو، با جریان ورودی یکنواخت یا غیریکنواخت در حالت پایا و ناپایا می‌باشد. در این تحقیق Ω به‌عنوان میدان جریان خارجی حول جسم و $S = \partial\Omega$ به‌عنوان مرز جسم در نظر

گرفته شده است. یک دستگاه مختصات کلی، دستگاه مختصات کارتزین اینرسی، ثابت در فضا تعریف و با $x = (x, y, z)$ نشان داده شده است. دستگاه مختصات محلی متصل به جسم، در حالت کارتزین به‌صورت $x = (x, y, z)$ و در حالت استوانه‌ای - به‌صورت (x, r, θ) ، مطابق با دستگاه مختصات نیرویی استاندارد ITTC تعریف شده است. در دستگاه مختصات محلی، x محور مثبت بسمت قسمت پایین دست پروانه، y محور مثبت به سمت پورت^{۲۴} و z محور عمود بر صفحه شامل x و y می‌باشد. معادلات با توجه به دستگاه مختصات متصل به جسم به‌دست آمده است. برای پروانه دستگاه مختصات راستگرد، و جهت چرخش در جهت عقربه‌های ساعت فرض شده است. سرعت زاویه‌ای پروانه ثابت لحاظ شده است.

۴-۲- معادلات حاکم در روش المان مرزی

با فرض اینکه جریان در میدان حل خارجی حول جسم به‌اندازه کافی و موثر غیرلزج، تراکم‌ناپذیر و غیرچرخشی باشد. در این حالت سرعت اغتشاشی در کلیه میدان حل به استثنای سطوح ناپیوسته میدان سرعت، که تشکیل دنباله سطح بالاشو از جسم را می‌دهند، غیر چرخشی می‌باشد. به‌عبارت دیگر برای استفاده از معادله لاپلاس جهت مدل کردن جریان سیال حول پروانه باید جریان در کلیه نقاط میدان به‌جز یک سری نقاط ناپیوستگی، که دنباله پروانه جایگزین آنها می‌شود، غیر چرخشی باشد. در حالت جریان ورودی غیریکنواخت مانند حالت لزج یا جریان دنباله پشت شناور، فرض بر این است که قسمت چرخشی سرعت اغتشاشی به‌همراه گردابه اغتشاشی مربوط به سیال در میدان سرعت V_∞ ، که در متون هیدرودینامیک شناور به‌عنوان دنباله موثر کشتی شناخته شده است [۱۸]، در نظر گرفته شده است. بنابراین با در نظر گرفتن این حالت کلیه سه فرض بالا برقرار شده و می‌توان از معادله لاپلاس استفاده نمود. با در نظر گرفتن فرض غیرچرخشی بودن سیال می‌توان گفت سرعت اغتشاشی برابر با تغییرات پتانسیل اغتشاشی می‌باشد. برای جریان سیال تراکم‌ناپذیر، معادله پیوستگی

$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$ به صورت معادله لاپلاس در می آید:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (1)$$

سرعت کل در هر نقطه از میدان سیال، Ω ، برابر با جمع سرعت اغتشاشی و سرعت غیراغتشاشی می باشد:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 + \nabla \varphi \quad (2)$$

برای جریان سیال تراکم ناپذیر، غیر لزج و غیر چرخشی معادلات ممنتوم نویر - استوکس به صورت معادله برنولی خلاصه می شود. در دستگاه مختصات متصل به جسم معادله برنولی به صورت زیر در می آید:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{|\mathbf{V}|^2}{2} + gz = \frac{p_{ref}}{\rho} + \frac{|\mathbf{V}_0|^2}{2} \quad (3)$$

در معادله (۳) فشار، p چگالی سیال و p_{ref} فشار مرجع سیال می باشد. برای پروانه فشار مرجع فشار ناحیه بسیار دور از بالادست^{۲۵} پروانه در راستای شفت پروانه می باشد و با استفاده از قانون هیدرواستاتیک $p_{ref} = p_{atm} + \rho g Z$ به دست می آید (p_{atm} فشار اتمسفر در ارتفاع Z_{atm} می باشد). پارامتر مهم و بی بعد یعنی ضریب فشار به صورت زیر تعریف می شوند:

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2} \quad (4)$$

در رابطه (۴) V_{ref} سرعت مرجع بوده و معمولاً برابر با $|\mathbf{V}_0|$ سرعت جریان ورودی می باشد. برای پروانه سرعت مرجع معمولاً میزان سرعت ورودی یا مقدار (nD) در نظر گرفته می شود. D معرف قطر پروانه و n اندازه دور پروانه یا سرعت دورانی در هر دور بر ثانیه بوده و برابر است با:

$$n = \frac{\omega}{2\pi} \quad (5)$$

بنابراین رابطه دینامیکی (۳) را می توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{2}{V_{ref}^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{|\mathbf{V}|^2 - |\mathbf{V}_0|^2}{V_{ref}^2} + \frac{2gz}{V_{ref}^2} = -C_p \quad (6)$$

۳-۴-۳ شرایط مرزی

برای حل معادله لاپلاس در جریان خارجی حول پروانه، چهار

نوع شرط مرزی به صورت زیر تعریف می گردد:

۳-۴-۱-۳-۴ سطح جسم (SB)

در قسمت سطح خیس جسم برای ارضا شدن شرط مرزی، صفر بودن مولفه سرعت عمود بر المان، می توان از شرط مرزی نیومن^{۲۶} استفاده نمود. در نواحی خیس مقدار پتانسیل کل، جمع پتانسیل اغتشاشی و پتانسیل ناشی از جریان ورودی، برابر صفر بوده و لذا شرط نیومن به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = -\mathbf{V}_0 \cdot \mathbf{n} \quad (7)$$

که در آن \mathbf{n} بردار نرمال هر المان به سمت بیرون می باشد.

۳-۴-۲-۳-۴ سطح دنباله (SW)

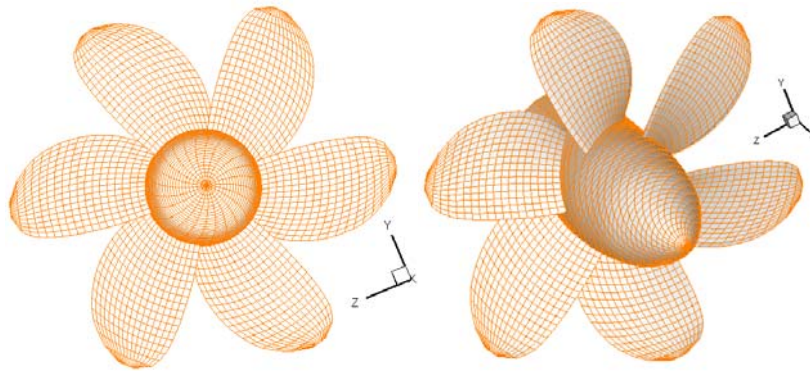
سطح دنباله یک لایه گردابه با ضخامت صفر، چسبیده به جسم و دربرگیرنده تمامی گردابه های جاری شده توسط جسم می باشد. سطح فوقانی و سطح تحتانی دنباله به ترتیب با علامت + و - مشخص شده اند. سطح دنباله باید شرایط مرزی سینماتیکی و دینامیکی را ارضا کند. برای ارضای شرط مرزی سینماتیکی، دنباله گردابه SW باید به صورت یک سطح از بخار سیال باشد. اگر V_n نشان دهنده سرعت سطح دنباله در جهت عمود باشد، شرط مرزی سینماتیکی برای جریان پایا و ناپایا به صورت زیر بیان می شود:

$$\mathbf{V}^+ \cdot \mathbf{n} = \mathbf{V}^- \cdot \mathbf{n} = \mathbf{V}_m \cdot \mathbf{n} = V_n \quad (8)$$

$V_m = \frac{1}{2}(V^+ + V^-)$ سرعت متوسط سیال می باشد. براساس شرط مرزی دینامیکی اختلاف فشار در دو طرف سطح دنباله SW برابر صفر است.

۳-۴-۳-۳-۴ سطح در بینهایت (S ∞)

در سطح مرز در بینهایت، S_{∞} ، آشفتگی ناشی از سطح جسم باید به سمت صفر میل کند.



شکل ۱۰- شبکه تولید شده بر روی سطح پروانه و هاب

از انتگرال کلاسیک نشان داده شده در زیر براساس معادله مشخصه سوم گرین به دست می آید، که، با استفاده از فرمولاسیون پتانسیل مربوط به مورینو [۲۰] می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\varepsilon(x)\varphi(x) = \int_{S_B} \left[\varphi(\tilde{x}) \frac{\partial G(x, \tilde{x})}{\partial n_{\tilde{x}}} - G(x, \tilde{x}) \frac{\partial \varphi(\tilde{x})}{\partial n_{\tilde{x}}} \right] ds + \int_{S_W} \left[\Delta \varphi(\tilde{x}) \frac{\partial G(x, \tilde{x})}{\partial n_{\tilde{x}}} \right] ds \quad (11)$$

x نقطه ای در دامنه سیال Ω ، \tilde{x} نقطه ای در دامنه سیال و روی سطح مرز $S = \partial\Omega$ ، تابع گرین، $G(x, \tilde{x})$ بردار نرمال خارجی در \tilde{x} و $\varepsilon(x)$ مقدارثابتی وابسته به موقعیت نقطه میدانی x می باشد.

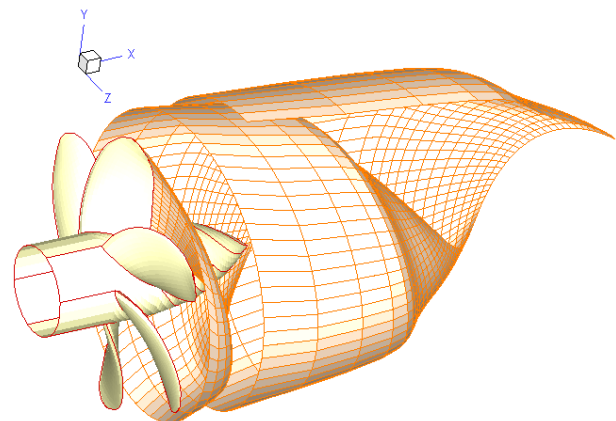
۶- پارامترهای گسسته سازی و تولید شبکه

گسسته سازی هندسه دنباله در پروانه وابسته به گام زمانی مورد نظر می باشد. اگر چرخش پروانه را به Nt قسمت تقسیم کنیم، گام زمانی و زاویه چرخش پره در هر گام زمانی به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\Delta t = \frac{1}{n N_t}, \quad \Delta \theta = \frac{2\pi}{N_t} \quad (12)$$

n سرعت دورانی پروانه برحسب (ثانیه/۱) می باشد.

در شکل (۱۰) شبکه تولید شده بر روی پره ها و هاب پروانه جهت تحلیل با استفاده از حلگر المان مرزی تولید شده است.



شکل ۱۱- پروانه و دنباله در شرایط حل ناپایا

$$x \rightarrow \infty \Rightarrow \nabla \varphi \rightarrow 0 \quad (9)$$

۴-۳-۴- شرط کاتا در لبه انتهایی

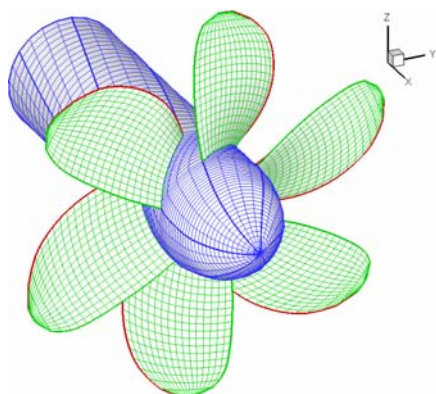
هس و اسمیت نشان دادند، جریان عبوری از یک بدنه نازک و غیربالاشو را می توان توسط توزیع دوقطبی های چشمه توصیف نمود. اما برای توصیف جریان عبوری از اجسام بالاشو، توسط توزیع گردش^{۳۷} روی سطح مدل، یک شرط مرزی در لبه انتهایی جسم باید ارضا گردد، که بیان می کند در لبه انتهایی مقدار محدود و یکتایی برای سرعت باید وجود داشته باشد

[۱۹]:

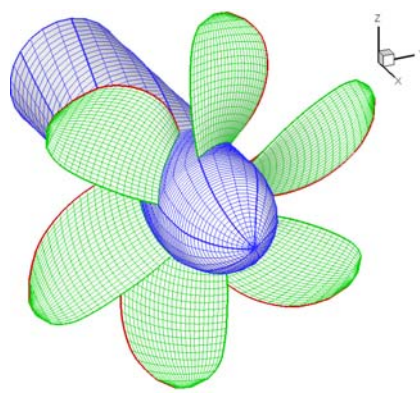
$$|\nabla \varphi|_{TE} < 0 \quad (10)$$

۵- معادلات انتگرالی

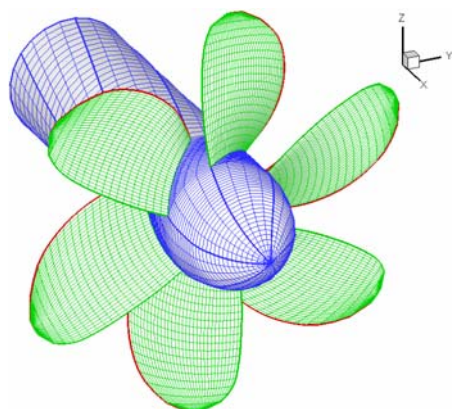
پتانسیل سرعت φ در هر نقطه x در دامنه سیال Ω با استفاده



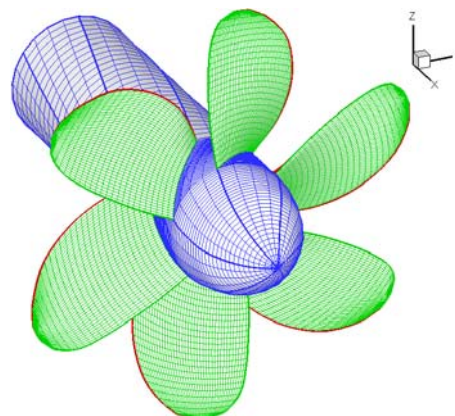
۱۶×۱۸



۲۴×۱۸



۳۲×۱۸



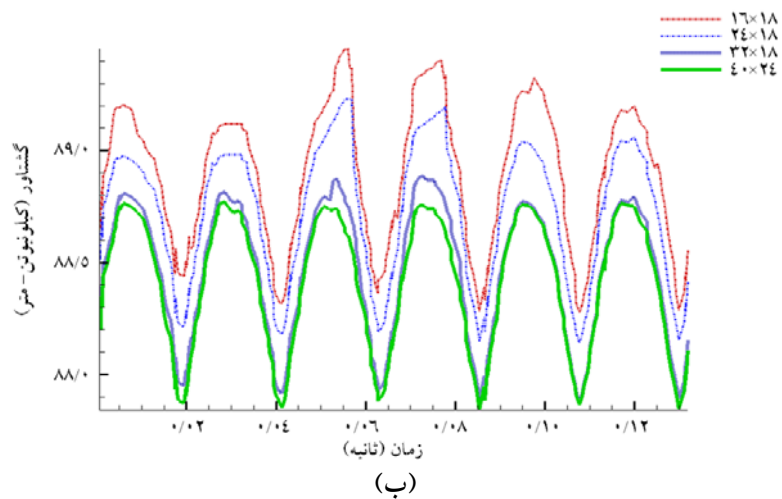
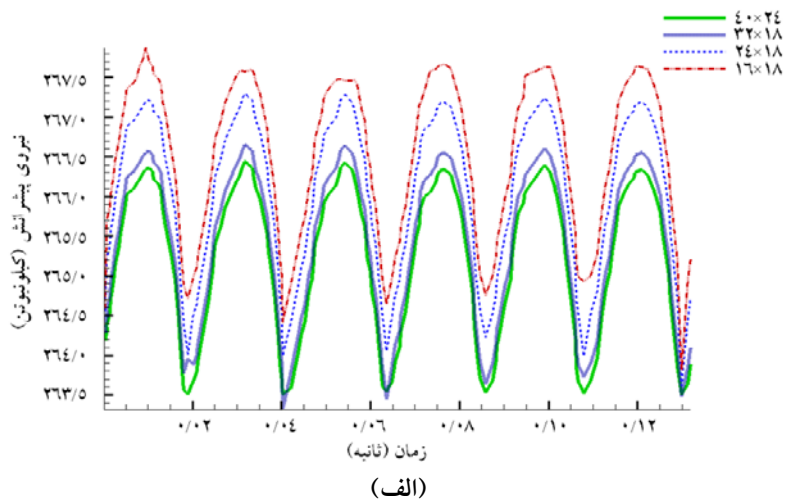
۴۰×۲۴

شکل ۱۲- افزایش تعداد المان‌های سطحی روی پره پروانه

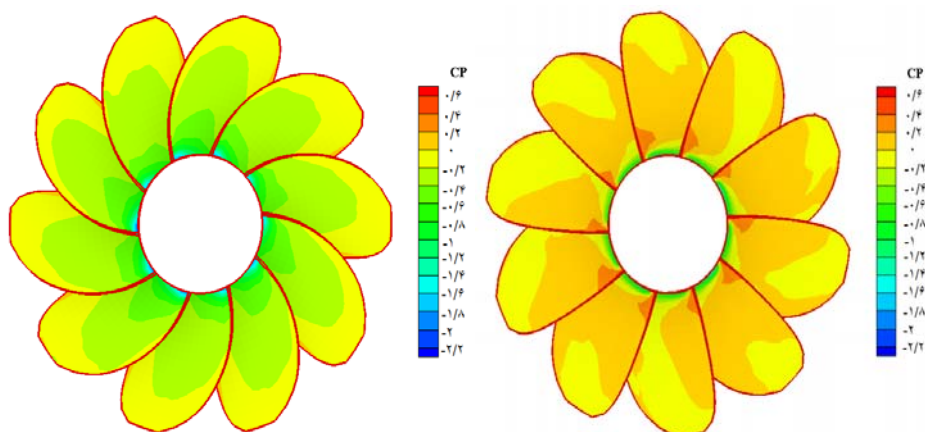
پروانه به دست آمده از نتایج تحلیل المان مرزی مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه شبکه در روش المان مرزی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد، زیرا ضرایب تاثیر در روش المان مرزی به شدت تابع هندسه جسم (پروانه) می‌باشد. مطابق شکل با افزایش تعداد المان‌های سطحی در راستای طول کورد و شعاع نتایج به سرعت همگرا می‌گردند. در شکل (۱۴) ضریب فشار بر روی یک پره پروانه در یک دور چرخش نشان داده شده است.

در شکل (۱۵) توزیع ضریب فشار بر روی سطح پشت و جلویی هر شش پره در زمان ۰/۰۱۵ ثانیه نشان داده شده است. برای پروانه پارامترهای بی بعد در شرایط عملکردی شامل ضریب پیشروی K_t ، ضریب تراست K_T ، ضریب گشتاور یا ممان K_Q می‌باشند و توسط روابط زیر بیان می‌شوند:

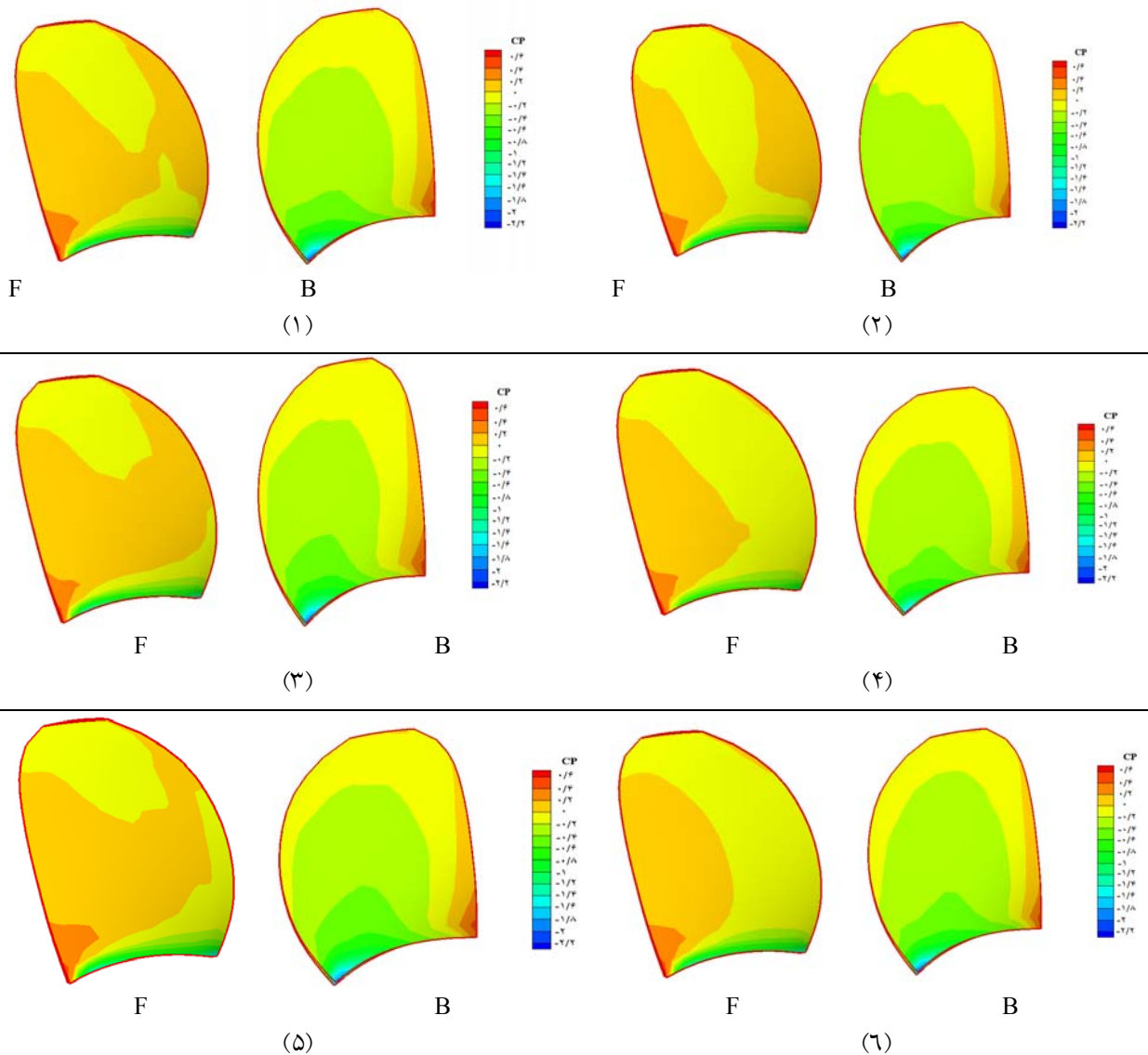
تولید شبکه به گونه‌ای می‌باشد که ضریب منظری نزدیک به یک بوده و شبکه تولید شده از کیفیت بالایی برخوردار می‌باشد. تولید شبکه در روش المان مرزی از حساسیت بالایی برخوردار می‌باشد زیرا نتایج به دست آمده به شدت وابسته به شبکه تولید شده می‌باشند. در ادامه در شکل (۱۱) دنباله تشکیل شده در پایین دست^{۲۸} در حالت ناپایا نشان داده شده است. در شکل (۱۲) جهت بررسی همگرایی با افزایش تعداد المان‌های سطحی، هندسه پروانه در چهار حالت مختلف از شبکه تولید شده بر روی سطح پره‌ها نشان داده شده است. تعداد المان‌های روی سطح جلویی هر پره به صورت حاصل ضرب تعداد المان‌ها در راستای طول کورد در تعداد المان‌ها در راستای شعاعی پره نشان داده شده است. در شکل (۱۳) همگرایی تراست (نیروی پیشران) و گشتاور



شکل ۱۳- بررسی همگرایی تراست و گشتاور پروانه شناور در یک دور چرخش برحسب زمان در یک پرورد زمانی (الف) نیروی پیش رانش، (ب) گشتاور



شکل ۱۴- ضریب فشار بر روی یک پره در یک دور چرخش پروانه



شکل ۱۵- توزیع ضریب فشار بر روی سطح پشت (B) و جلویی (F) پره‌های پروانه (شش پره) در زمان ۰/۰۰۱۵ ثانیه

است. با توجه به اینکه میدان جریان ورودی به پروانه غیریکنواخت می‌باشد لذا جهت استخراج رفتار تراست و گشتاور پروانه در یک دور چرخش نیاز به تحلیل در حالت ناپایا می‌باشد که در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است. مشاهده عدم رفتار تناوبی در یک دور چرخش مربوط به توزیع غیریکنواخت میدان جریان ورودی به پروانه می‌باشد.

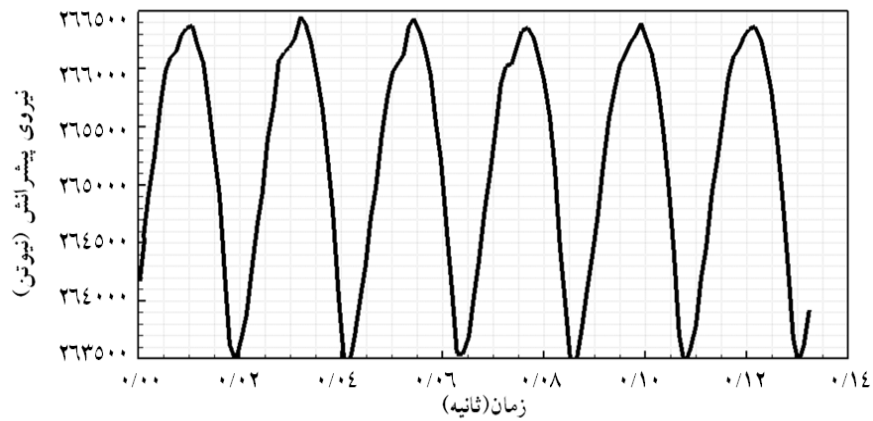
۸- تحلیل المان محدود پروانه و شفت

به منظور تحلیل با دقت بالا، لازم است که شبکه مناسب برای

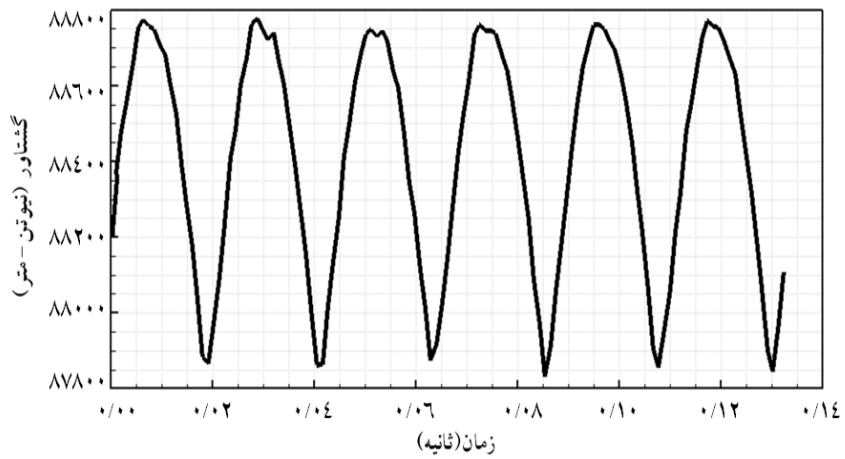
$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \quad J = \frac{V_A}{nD} \quad (12)$$

۷- نتایج نیرو- ممان و پارامترهای هیدرودینامیکی پروانه

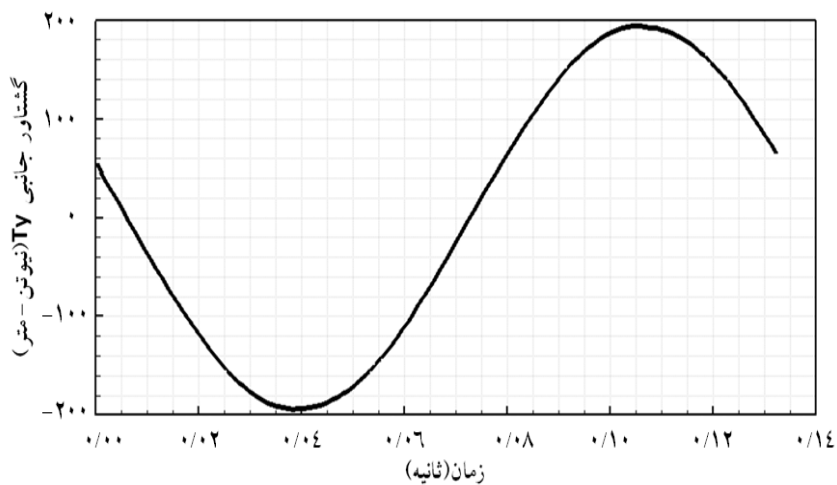
در شکل‌های (۱۶) تا (۲۱)، مقادیر نیرو-گشتاور بر حسب زمان در یک دور چرخش پروانه ارائه شده است. برای محاسبه نتایج، یک دور چرخش پروانه به ۱۲۵ بخش مساوی تقسیم شده است که معادل با ۰/۰۰۱۰۶۷ ثانیه پیشروی در هر بازه زمانی



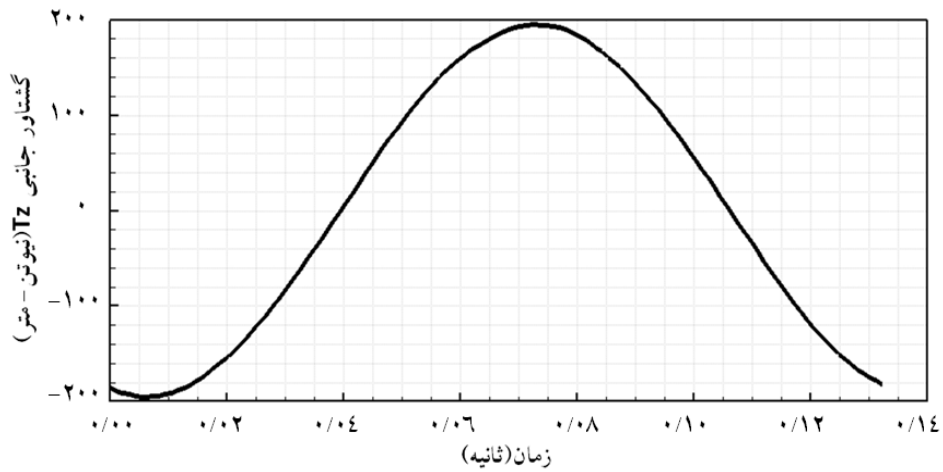
شکل ۱۶- مقادیر نیروی جلوبرندگی پروانه در سرعت ۱۶ گره دریایی برحسب زمان در یک دور چرخش



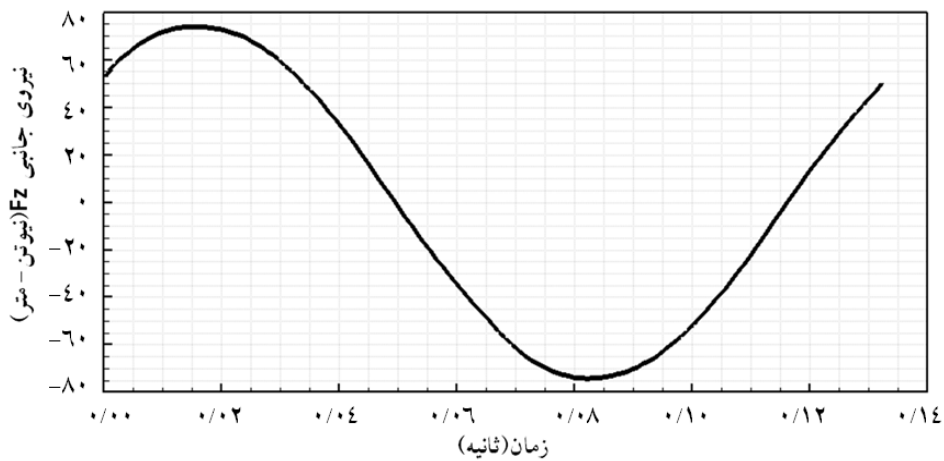
شکل ۱۷- مقادیر گشتاور حول محور پروانه در سرعت ۱۶ گره دریایی برحسب زمان در یک دور چرخش



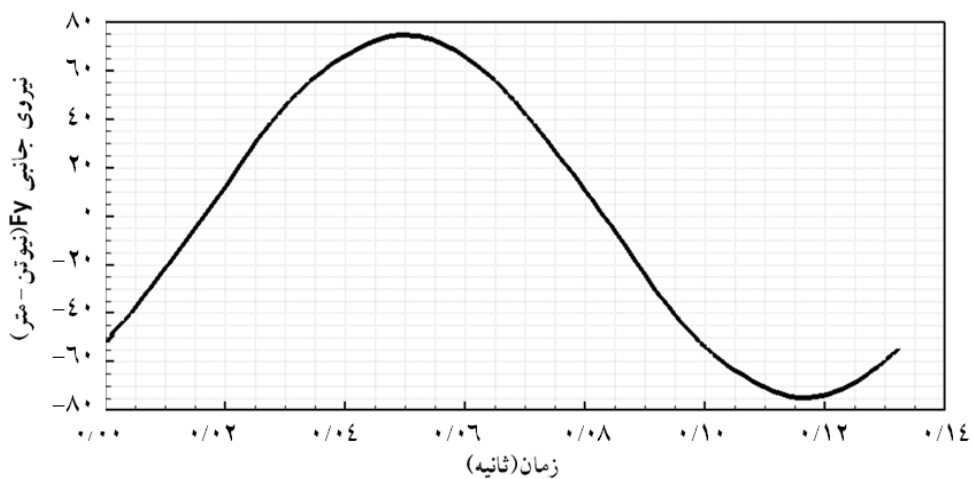
شکل ۱۸- مقادیر گشتاور حول محور Y در سرعت ۱۶ گره دریایی برحسب زمان در یک دور چرخش



شکل ۱۹- مقادیر گشتاور حول محور Z در سرعت ۱۶ گره دریایی بر حسب زمان در یک دور چرخش



شکل ۲۰- مقادیر نیرو در راستای محور Z در سرعت ۱۶ گره دریایی بر حسب زمان در یک دور چرخش



شکل ۲۱- مقادیر نیرو در راستای محور Y در سرعت ۱۶ گره دریایی بر حسب زمان در یک دور چرخش

جهت ضخامت استفاده نمود.

۸-۱- شرایط مرزی برای تحلیل فرکانس طبیعی

برای تحلیل فرکانس طبیعی مدول یانگ، ضریب پواسون و چگالی مورد نیاز است. از طرف دیگر وجود پروانه بر فرکانس‌های طبیعی شافت تاثیرگذار است. لذا تحلیل پروانه و شافت با یکدیگر بر دقت نتایج می‌افزاید. بنابراین برای محاسبه فرکانس طبیعی، پروانه و شافت با یکدیگر تحلیل می‌شوند. باید توجه داشت که پروانه در حال دوران است. بنابراین بهتر است که اثرات دوران را برروی فرکانس طبیعی کنترل نمود. محاسبات نشان می‌دهد که برای پروانه مورد مطالعه سرعت دوران بر فرکانس طبیعی تاثیر چندانی ندارد با این وجود در محاسبات ارائه شده اثر نیروی گریز از مرکز دیده شده است. در تحلیل حاضر انتهای شفت نیز بسته در نظر گرفته شده است (شکل (۲۳)).

۸-۲- بارگذاری استاتیکی

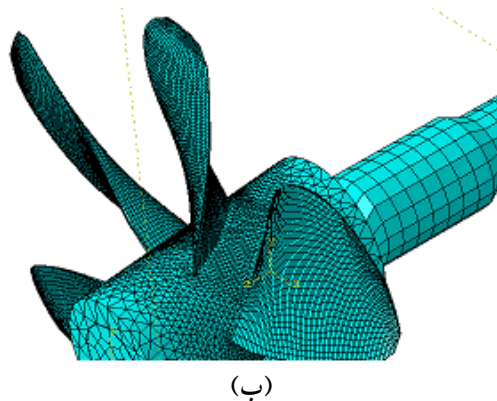
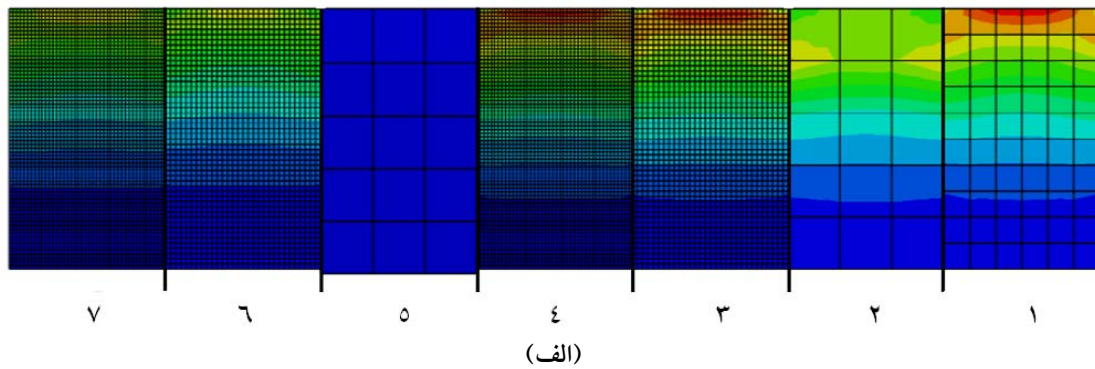
برای اعمال بارگذاری استاتیکی، باید فشار وارد بر پروانه به آن اعمال گردد. فشار اعمالی بر هر نقطه با کمک میان‌یابی از فشارهایی به‌دست آمده از تحلیل هیدرودینامیک محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه فشار اعمالی به پروانه براساس کیلو پاسکال است، بنابراین نتایج نشان داده شده در شکل (۲۴) باید در ۱۰۰۰ ضرب شود. بر این اساس ماکزیمم تنش^{۲۶} مگا پاسکال است که تمامی آلیاژهای برنز قابلیت تحمل چنین تنشی را دارند.

۸-۳- تحلیل فرکانس طبیعی پروانه و شفت

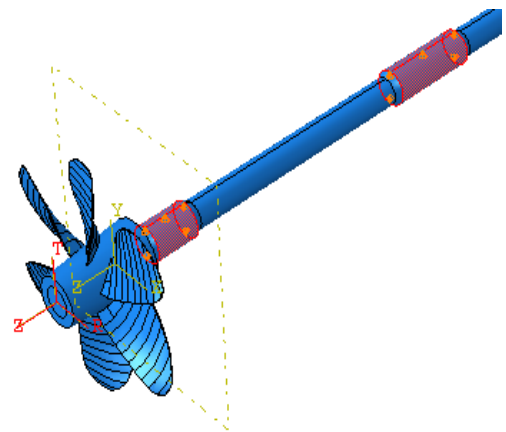
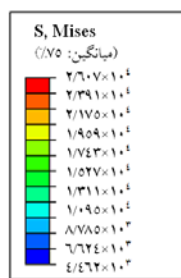
با توجه به تعداد پره‌ها، ماکزیمم فرکانس تحریک پیش‌پیشی شافت شش برابر دور پروانه است. با توجه به اینکه دور پروانه ۴۶۰ دور بر دقیقه است بنابراین فرکانس تحریک حداکثر برابر ۴۶ دور بر ثانیه است. بر این اساس تنها یک فرکانس طبیعی با مود پیش‌پیشی در محدوده کاری پروانه قرار خواهد گرفت که در

پروانه ایجاد گردد. در شکل (۲۲-ب) شبکه مناسب تولید شده برروی سطح پروانه و شفت جهت تحلیل المان محدود نشان داده شده است. در این مورد حساسیت بسیار زیادی صورت گرفته است. در این تحلیل به‌منظور ایجاد یک شبکه منظم و استفاده از المان‌های شش وجهی، هندسه دقیق پروانه در محیط نرم‌افزار آباکوس ترسیم و تحلیل شده است. به‌دلیل انحنای زیاد سطوح و ضخامت کم، تنها به این روش می‌توان از المان‌های مرتبه ۲ استفاده نمود. در جهت ضخامت نیز ۴ عدد المان ریخته شده است. عملاً در مورد سازه مورد بحث امکان بررسی وابستگی به شبکه سخت است. زیرا تعداد المان کمتر باعث می‌شود که نتوان از المان‌های مرتبه ۲ استفاده کرد. بنابراین از یک مسئله مشابه به‌منظور بررسی شبکه استفاده شده است. برای این منظور یک ورق با ضخامتی برابر ۲۰ میلی‌متر و طول ۱ متر و عرض ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و برای یک بارگذاری واحد مورد تحلیل قرار گرفته است. در شکل (۱۴-الف) توزیع تنش به‌ترتیب برای المان پوسته (۱)، المان مرتبه ۲ با تعداد ۱ المان در ضخامت (۲)، المان مرتبه ۲ با تعداد ۲ المان در ضخامت (۳)، المان مرتبه ۲ با تعداد ۴ المان در ضخامت (۴)، المان مرتبه ۱ با تعداد ۱ المان در ضخامت (۵)، المان مرتبه ۱ با تعداد ۲ المان در ضخامت (۶)، المان مرتبه ۱ با تعداد ۴ المان در ضخامت (۷) نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان به این نتیجه رسید که، المان مرتبه ۲ با یک عدد المان در جهت جواب قابل قبول ارائه می‌دهد.

استفاده از ۲ المان مرتبه دوم در جهت ضخامت کاملاً به جواب مطلوب همگرا می‌گردد. در مسئله مورد تحلیل به دلیل وجود انحنای زیاد پره باید از المان‌های به اندازه کافی کوچک استفاده کرد تا بتوان المان مرتبه دوم استفاده نمود. بنابراین از ۴ ردیف المان در جهت ضخامت استفاده شد که از نظر همگرایی کاملاً قابل اعتماد است. شکل (۲۲-الف) نشان می‌دهد که استفاده از المان‌های مرتبه اول برای محاسبه تنش در نزدیک تکیه‌گاه مناسب نیست. البته برای محاسبه فرکانس طبیعی می‌توان از چنین المانی با تعداد ۴ عدد در



شکل ۲۲- پروانه و شفت مدل سازی شده جهت تحلیل المان محدود
 (الف) المان های مختلف تولید شده و (ب) شبکه تولید شده بر روی پروانه



شکل ۲۴- تنش فون میزز^{۲۹} در پره برحسب پاسکال

شکل ۲۳- قسمت های داخل یاتاقان (محدود به صورت شعاعی)

توان نتیجه گرفت که فرکانس پیچشی شافت و پروانه در دور حدود ۲۴۰ و ۴۶۰ دور بر دقیقه تحریک خواهد شد. فرکانس تحریک ۴۶۰ دور بر دقیقه به دلیل بالاتر بودن توان دارای تاثیر بیشتری خواهد بود. البته باید توجه داشت که در نظر گرفتن

شکل (۲۵) نشان داده شده است. این فرکانس حدود ۲۴/۵ دور بر ثانیه است که به شدت تحت تاثیر ممان اینرسی پروانه قرار دارد. قطر بیشتر شافت در قسمت انتهایی و سبکتر شدن پروانه می تواند این فرکانس این مود را بالاتر ببرد. بر این اساس می-

اثرات اینرسی پروانه باعث پایین آمدن فرکانس طبیعی شافت و پروانه شده است و در صورت استفاده از روابط استاندارد چنین پدیده‌ای قابل مشاهده نیست.

بقیه فرکانس‌های طبیعی بسیار بالاتر از فرکانس تحریک است. فرکانس طبیعی دوم و سوم به صورت خمشی است و حدود ۶۸ دور بر ثانیه است (شکل‌های (۲۶) و (۲۷)). فرکانس تحریک نیروی خمشی عملاً برابر فرکانس تحریک نیروی تراست است که مشابه فرکانس تحریک گشتاور پیچشی است. بنابراین امکان تحریک این دو فرکانس طبیعی وجود ندارد.

فرکانس طبیعی چهارم تا ششم مربوط به ارتعاشات پره‌ها است (شکل (۲۸)). فرکانس نیروی تحریک کننده این مود، چهار برابر دور پروانه است. بنابراین فرکانس تحریک این مودها حداکثر ۳۲ است که با توجه به فرکانس طبیعی ۹۱ دور بر ثانیه احتمال تحریک شدن وجود ندارد.

فرکانس طبیعی هفتم مربوط به ارتعاشات محوری شافت است و حدود ۹۲ دور بر ثانیه است. با توجه فرکانس تحریک حداکثر ۴۶ دور بر ثانیه نیروی تراست، این فرکانس نیز اهمیت نخواهد داشت (شکل (۲۹)).

فرکانس طبیعی یازدهم پروانه و شافت در شکل (۳۰) نشان داده شده که این مود در اثر نامیزانی امکان تحریک خواهد داشت. البته به دلیل سرعت دورانی پایین شافت که ۸ دور بر ثانیه است و همچنین فرکانس تحریک بالای آن که ۱۵۸ دور بر ثانیه است، احتمال تحریک این مود وجود نخواهد داشت. البته فرکانس تحریک این مود وابسته به یاتاقان‌های مورد استفاده و نحوه همراستا کردن یاتاقان‌ها است.

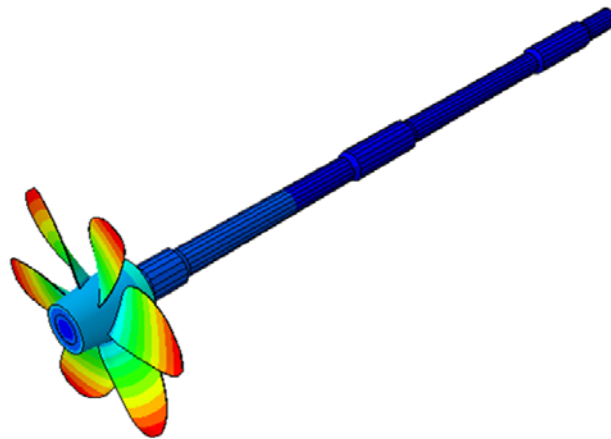
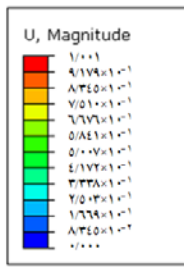
۸-۴- پاسخ تحریک اجباری پروانه در سرعت دورانی ۴۶۰ دور بر دقیقه

برای محاسبه پاسخ تحریک اجباری پروانه، ابتدا میدان فشار میانگین در حوزه زمان محاسبه شد (تابعی به فرم $g(x,y,z)$ به دست می‌آید) و به صورت نقطه به نقطه بر پروانه اعمال گردید. سپس میانگین میدان فشار در هر زمان به صورت یکه

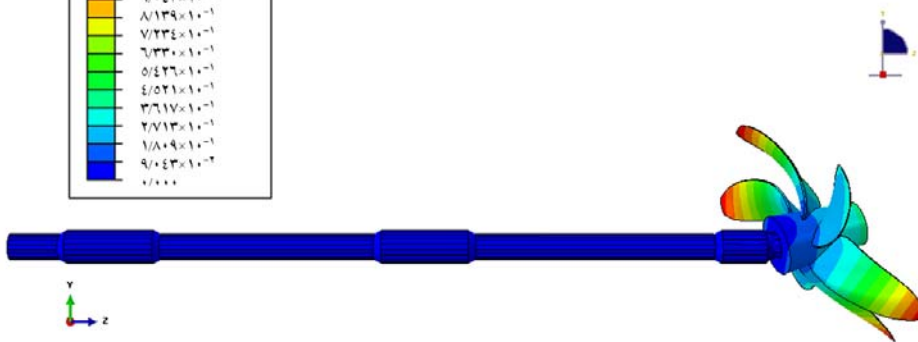
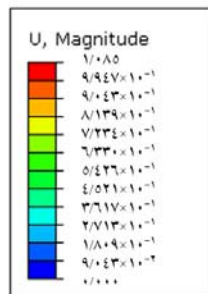
محاسبه گردید که در شکل (۳۱) نشان داده شده است (تابعی به فرم $f(t)$ به دست می‌آید). در هر زمان بر هر نقطه از پروانه مقدار فشار حاصل از ضرب دو تابع قبلی اعمال گردید $p=f(t)$, $g(x,y,z)$. تحلیل به صورت دینامیکی و ضمنی انجام گرفت. به دلیل وجود مستهلک کننده در تحلیل ضمنی، بعد از گذشت زمان کوتاهی جواب همگرا خواهد شد.

شکل (۳۲) تغییر مکان یک نقطه نوک پره را نشان می‌دهد که البته به دلیل اعمال فشار بر حسب کیلو پاسکال، نتایج باید در ۱۰۰۰ ضرب گردد تا تغییرات بر حسب متر به دست آید. این شکل نشان می‌دهد که نتایج تحلیل بعد از ۵/۰ ثانیه پایدار خواهد بود.

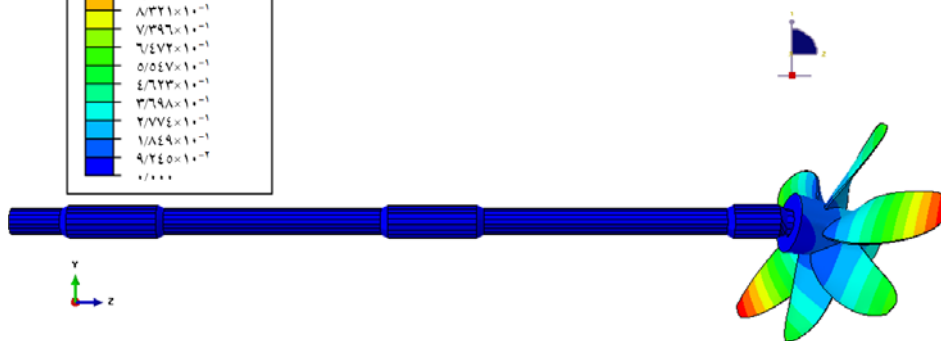
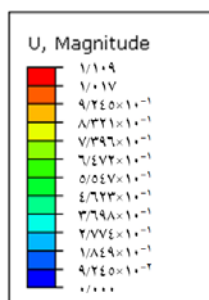
شکل (۳۳) جابجایی نوک پره را در حالت پایدار نشان می‌دهد. بر این اساس نوک پره حدود ۱ میلی متر جابجا خواهد شد و تغییرات جابه‌جایی آن حدود ۰/۷ میلی متر است. فرکانس این نوسانات نیز ۳۲ سیکل بر ثانیه خواهد بود. با توجه به اینکه تغییرات نیروی فشار وارد بر پره حدود ۲۰ درصد است، اگر تشدید رخ ندهد، مقدار جابه‌جایی نوسانی به مقداری نزدیک به ۲۰ درصد مقدار کل جابه‌جایی همگرا خواهد شد. رسیدن به چنین مقداری نیازمند زمان طولانی است. زیرا تعداد المان زیاد و همچنین میان‌یابی میدان فشار در هر لحظه با کمک زیر برنامه آباکوس روند تحلیل را کند خواهد کرد. لازم به ذکر است که از تحلیل ارتعاش اجباری عملاً نکته خاصی استحصال نمی‌گردد و فقط نتایج به منظور تایید عدم وجود تشدید آورده شده است. باید توجه گردد که در این مسئله از اندرکنش مستقیم بین سیال و جامد صرف نظر شده که دلیل آن میزان جابه‌جایی‌های کوچک پره است. به عبارت دیگر از تغییرات فشار روی پره به دلیل تغییرات جابجایی صرف نظر گردیده است. با این وجود حضور آب در میزان نوسانات بسیار مهم است. به دلیل سرعت بالای پره‌ها، عملاً محاسبه حتی حدودی این اثر غیرممکن است و آنچه در مورد نوسانات بیان گردیده تنها یک مقدار کلی برای درک بهتر ارتعاشات پروانه است.



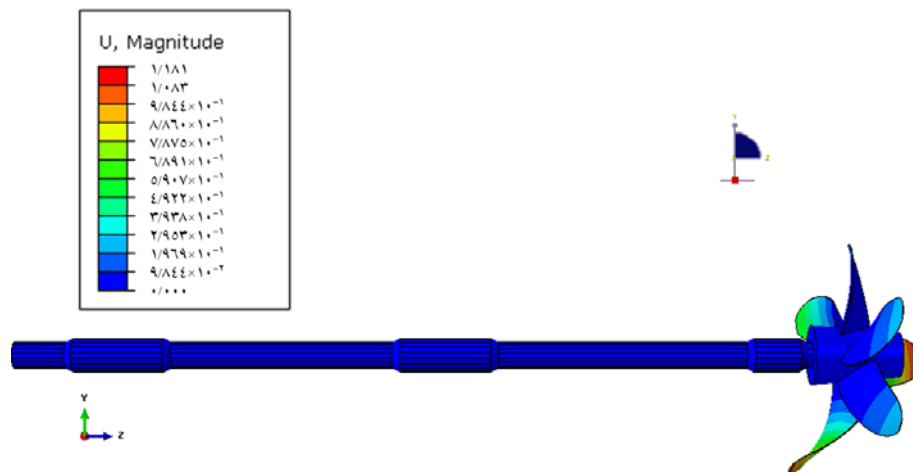
شکل ۲۵- مود اول - ارتعاشات پیچشی



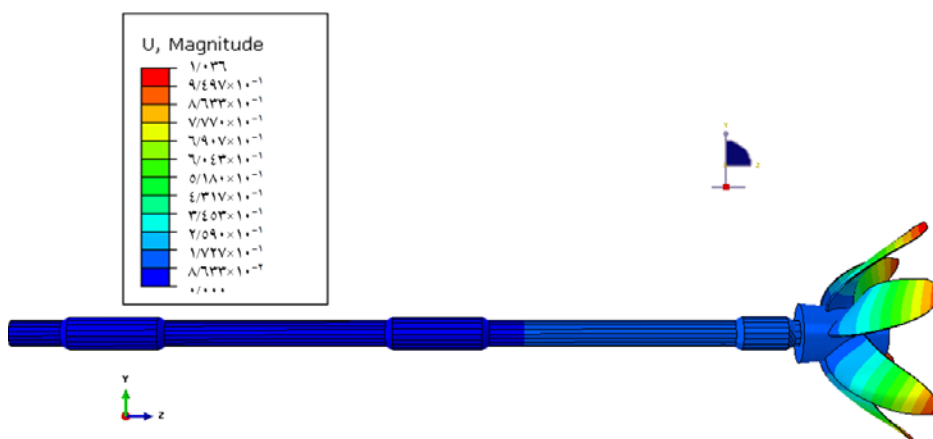
شکل ۲۶- مود دوم - ارتعاشات خمشی



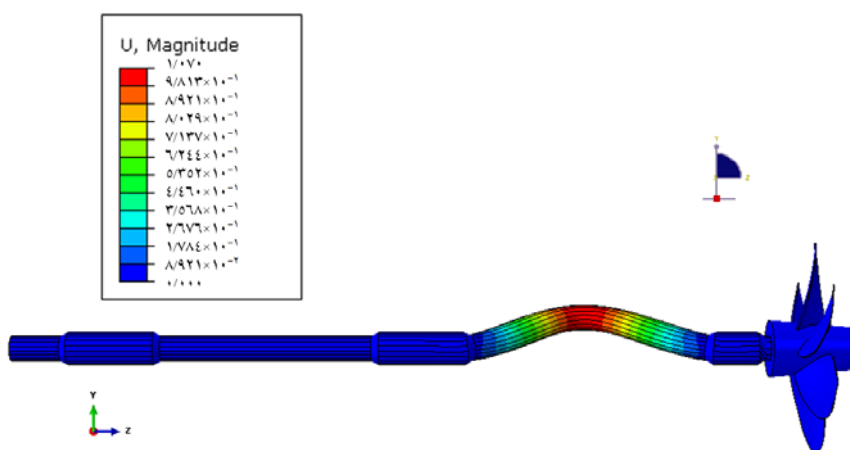
شکل ۲۷- مود سوم - ارتعاشات خمشی



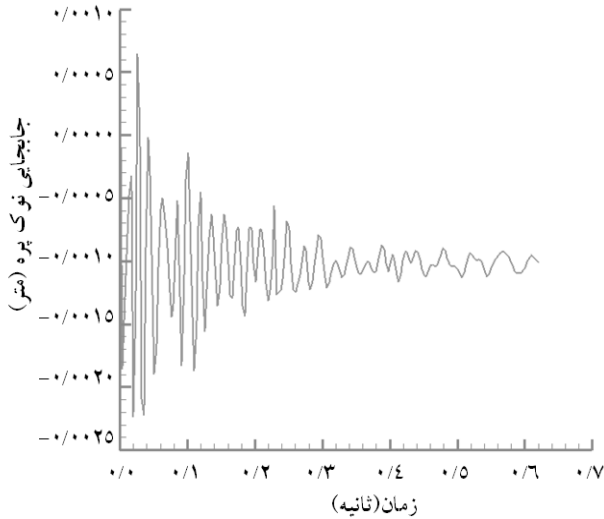
شکل ۲۸- مود چهارم - ارتعاشات پره‌ها



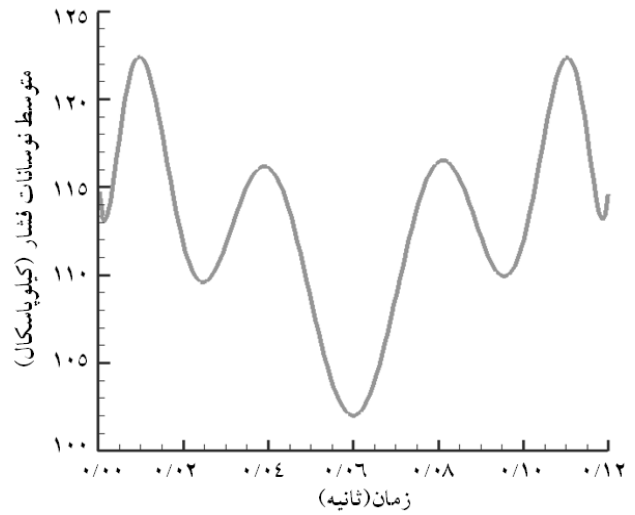
شکل ۲۹- مود هفتم - ارتعاشات محوری



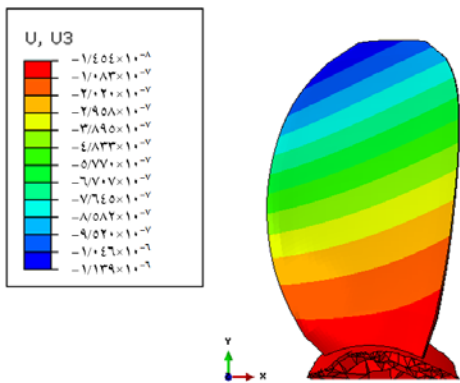
شکل ۳۰- مد یازدهم - ارتعاشات خمشی



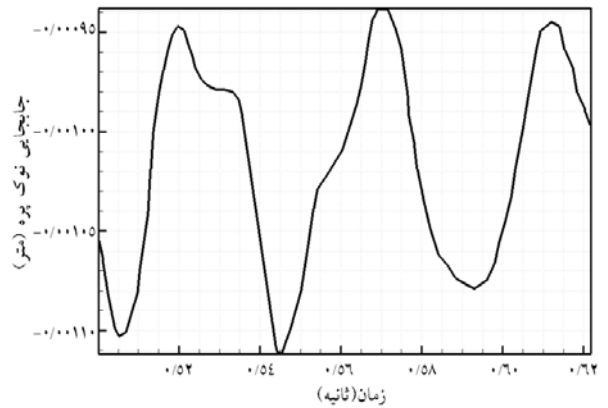
شکل ۳۲- جابجایی نوک پره



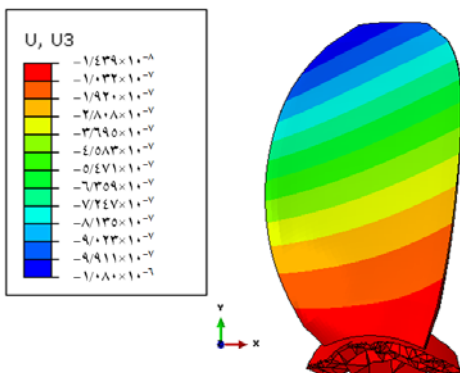
شکل ۳۱- تغییرات میانگین فشار وارد بر پره در سرعت دورانی ۴۶۰ دور بر دقیقه



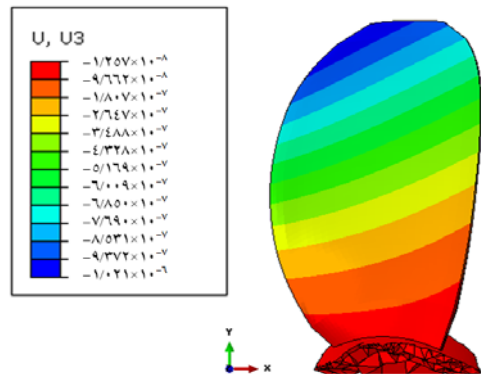
شکل ۳۴- تغییرات جابجایی در راستای شافت بر حسب متر در زمان ۰/۱. (نتایج در ۱۰۰۰ ضرب گردد)



شکل ۳۳- تغییر مکان نوک پره بر حسب متر



شکل ۳۶- تغییرات جابجایی در راستای شافت بر حسب متر در زمان ۰/۱۲۵. (نتایج در ۱۰۰۰ ضرب گردد)



شکل ۳۵- تغییرات جابجایی در راستای شافت بر حسب متر در زمان ۰/۱۱۵. (نتایج در ۱۰۰۰ ضرب گردد)

در شکل‌های (۳۴) تا (۳۶) تغییرات جابجایی نشان داده شده است. بر این اساس پره بر اساس مود اول خود تغییر شکل داده است و بیشترین جابجایی در همه زمان‌ها مربوط به نوک پره است. بنابراین بررسی تغییر مکان نوک پره برای مشخص شدن این پدیده کافی است.

۹- نتیجه‌گیری

بر اساس تحلیل انجام گرفته تنها اولین فرکانس طبیعی که شکل مود آن پیچشی است تحریک خواهد شد. نیروی تحریک کننده این فرکانس، گشتاور پیچشی وارد بر پروانه است که فرکانس آن تا ۴۶ دور بر ثانیه است در حالی که فرکانس طبیعی مود پیچش شافت - پروانه حدوداً ۲۴ دور بر ثانیه خواهد بود. به عبارت دیگر فرکانس طبیعی اول سیستم حدوداً در دور ۲۴۰ و ۴۶۰ دور بر دقیقه تحریک خواهد شد. در عمل سرعت ۲۴۰ دور بر دقیقه به عنوان یک سرعت گذرا در نظر گرفته می‌شود و بنابراین مشکلات این دور به دلیل پایین بودن توان و همچنین گذرابودن قابل اغماض است. با این وجود سرعت ۴۶۰ دور بر دقیقه به دلیل اینکه باعث محدودیت بر روی ماکزیمم سرعت

شناور می‌شود قابل اغماض نیست. برای اصلاح آن اقدامات زیر قابل انجام است:

- افزایش نرمی شافت: (در برخی ناوشکن‌ها از این راه کار استفاده می‌گردد) سرعت بحرانی ۴۶۰ دور بر دقیقه به دورهای پایین‌تر منتقل شود تا شناور در ماکزیمم توان خود دچار تشدید نشود. افزایش وزن پروانه، کاهش قطر شافت و همچنین اضافه کردن یک شافت انعطاف‌پذیر از جمله راه‌های انجام این مورد است.

- افزایش سختی شافت: انتقال سرعت بحرانی به سرعت‌های بیش از سرعت ماکزیمم به عنوان یک راه‌کار عمومی پیشنهاد می‌گردد. افزایش قطر شافت و یا اضافه کردن مستهلک کننده پیچشی قابل بررسی است.

بررسی انجام گرفته نشان می‌دهد که سایر فرکانس‌های طبیعی شافت پروانه از فرکانس تحریک فاصله زیادی داشته و امکان تحریک آنها نیست. در هنگام تحریک اجباری، پره‌ها حداکثر ۰/۷ میلی‌متر نوسان خواهند داشت که این نوسان در هر دور چهار بار تکرار می‌گردد. میانگین جابه‌جایی هر پره نیز ۱ میلی‌متر خواهد بود.

واژه‌نامه

- | | | |
|----------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1. wake | 11. developed blade area | 21. Fredholm |
| 2. LDV | 12. Ansys Fluent Guide | 22. MIT |
| 3. mono pole | 13. Knot | 23. lifting surface |
| 4. dipole | 14. velocity inlet | 24. port side |
| 5. resonance changer | 15. pressure outlet | 25. upstream of propeller |
| 6. skew | 16. symmetry | 26. newman condition |
| 7. Rake | 17. pressure based | 27. circulation |
| 8. Hub | 18. dissipation | 28. downstream |
| 9. trailing edge | 19. upwind | 29. Von Mises |
| 10. disc area ratio | 20. URANS | |

مراجع

- Castellini, P., and Santolin, C., "Vibration Measurements on Blades of a Naval Propeller Rotating in Water with Tracking Laser Vibrometer", *Journal of Measurement*, Vol. 24, pp.43-54, 1998.
- Aleyaasin, M., Ebrahimi, M., and Whalley, R., "Flexural Vibration of Rotating Shafts by Frequency Domain Hybrid Modelling", *Computers and Structures*, Vol. 79, pp. 319-331, 2001.
- Kinns, R., and Bloor, C.D., "Hull Vibration Excitation Due to Monopole and Dipole Propeller Sources", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 270,

- pp. 951-980, 2004.
4. Dylejko, P. G., Kessissoglou, N. J., Tso, Y. and Norwood, Ch. J., "Optimisation of a Resonance Changer to Minimise the Vibration Transmission in Marine Vessels", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 300, pp. 101-116, 2007.
 5. Chen, G. H., and Shih, Y. Sh., "Basic Design of a Series Propeller with Vibration Consideration by Genetic Algorithm", *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 12, pp. 119-129, 2007.
 6. Mutasher, S. A., "Prediction of the Torsional Strength of the Hybrid Aluminum/Composite Drive Shaft", *Journal of Materials and Design*, Vol. 30, pp. 215-220, 2009.
 7. Merz, S., Kessissoglou, N., Kinns, R., and Marburg, S., "Minimisation of the Sound Power Radiated by a Submarine through Optimisation of Its Resonance Changer", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, pp. 980-993, 2010
 8. Verichev, N. N., "Chaotic Torsional Vibration of Imbalanced Shaft Driven by a Limited Power Supply", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 331, pp. 384-393, 2012.
 9. Hong, Y., He, X. D., and Wang, R.G., "Vibration and Damping Analysis of a Composite Blade", *Journal of Materials and Design*, Vol. 34, pp. 98-105, 2012.
 10. Wei, Y. S., Wang, Y.Sh., Chang, Sh. P., and Fu, J., "Numerical Prediction of Propeller Excited Acoustic Response of Submarine Structure Based on CFD, FEM and BEM", *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 24, No. 2, pp. 207-216, 2012.
 11. Versteeg, H. K., and Malalasekera, W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics", First ed., Longman Malaysia, 1995.
 12. Boudet, J., Casalino, D., Jacob, M. C., and Ferrand, P. M., "Unsteady RANS Computations of the Flow Past an Airfoil in the Wake of a Rod", *ASME 2002 Joint U.S.-European Fluids Engineering Division Conference*, Montreal, Canada, July, 14-18, 2002.
 13. Hess, J. L. and Valarezo, W. O., "Calculation of Steady Flow About Propeller Using a Surface Panel Method", *Journal of Propulsion Power*, Vol. 1, No. 6, pp. 470-476, 1985.
 14. Hsin, C., "Development and Analysis of Panel Methods for Propellers in Unsteady Flow", Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology- MIT, September 1990.
 15. Fine, N., "Non-Linear Analysis of Cavitating Propellers in Nonuniform Flow", Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology- MIT, October 1992.
 16. Kim, Y. G., Lee, C. S., and Suh, J. C., "Surface Panel Method for Prediction of Flow Around 3d Steady or Unsteady Cavitating Hydrofoil", *Proceedings of the 2nd International Symposium on Cavitation*, Tokyo, pp. 113-120, April 1994.
 17. Kim, Y. G., and Lee, C. S., "Prediction of Unsteady Performance on Marine Propellers with Cavitation Using a Surface Panel Method", *Proceedings of the 21st Symposium on Naval Hydrodynamics*, Norway, June 1996.
 18. Vaz, G. "Modelling of Sheet Cavitation on Hydrofoils and Marine Propellers", Ph.D Thesis Technical University of Lisbon -IST, 2005.
 19. Hess, J. T., and Smith, A. M., "Calculation of Nonlifting Potential Flow About Arbitrary Three-Dimensional Bodies", *Journal of Ship Research*, Vol. 8, No. 2, 1964.
 20. Morino, L., and Kuo, C., "Subsonic Potential Aerodynamics for Complex Configurations: a General Theory", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 12, No. 2, pp. 191-197, 1974.