

طراحی و تحلیل عددی پروانه جلوبرنده شناور لایروب خزر

سهیل اسدی^۱، احد عابدینی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
 ۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
 * صندوق پستی ۱۷۹-۳۵۱۴۵-ahad.abedini@gmail.com

چکیده

در این مقاله با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی که از زیر مجموعه‌های روش سطح پاسخ است به طراحی بهینه هندسه پروانه جلوبرنده برای شناور لایروب خزر پرداخته شده است. پروانه طراحی شده از نوع پروانه‌های سری استاندارد بی وگنینگن می‌باشد. برای بررسی صحت عملکرد و همچنین بررسی عدم وقوع کاویتاسیون بر روی پروانه طراحی شده با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، مدل‌سازی عددی شده و پارامترهای عملکردی حاصله از حل عددی با مقادیرشان در سری بی وگنینگن مقایسه شده است. نتایج نشان از توانایی روش سطح پاسخ در یافتن هندسه بهینه پروانه برای شناور لایروب خزر دارد. همچنین این روش تأثیر تغییر پارامترهای هندسی پروانه بر راندمان پروانه را نشان داده و در فهم عملکرد پروانه به طراح کمک می‌نماید. حل عددی جریان سیال، عدم وقوع کاویتاسیون در پروانه نهایی طراحی شده برای شناور لایروب خزر را به اثبات رساند.

کلیدواژگان

سری بی وگنینگن، روش سطح پاسخ، کاویتاسیون، دینامیک سیالات محاسباتی، شناور لایروب خزر

Design And Numerical Analysis of Propeller for Khazar Dredger

SoheilAsadi¹, AhadAbedini^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
 2- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
 * P.O.B. 35145-179, Semnan, Iran, ahad.abedini@gmail.com

Abstract

In this article, using a central composite design response surface methodology is that design of the optimal propeller geometry for khazar dredger will be discussed. B_Wageningen standard series is designed propeller-type licenses. To verify the performance and Check non-occurrence of cavitation, the propeller designed using Computational Fluid Dynamics, numerical modeling and compare with B_Wageningen series. The results show the ability of response surface methodology in finding the optimal geometry propeller. Numerical solution of fluid flow, to prove non-occurrence of cavitation in the propeller designed for khazar dredger.

Keywords

Wageningen B-series, Response Surface Methodology, Cavitation, Computational Fluid Dynamics, Khazar Dredger

۱- مقدمه

پروانه^۱ یکی از مهمترین بخش‌ها در سیستم پیشران شناورهای دریایی بوده و وظیفه اش ایجاد نیروی پیشران لازم برای به حرکت در آوردن شناور با یک سرعت مشخص می‌باشد. استفاده از پروانه در کشتی‌ها از بیش از دو قرن پیش آغاز شده است و همچنان فناوری طراحی آن در حال پیشرفت می‌باشد. دو روش کلی برای طراحی پروانه وجود دارد. در روش اول که به آن روش طراحی مستقیم نیز گفته می‌شود از تئوریهای موجود برای پروانه مثل تئوری خطوط برا^۲، تئوری سطح برا^۳ ویا تئوری المان مرزی^۴ برای تحلیل و از روش بیوریل^۵ و یا روش لربز^۶ به منظور طراحی مستقیم هندسه پروانه استفاده می‌شود [۱]. از این روش به علت نیازمندی به دانش طراحی، امکانات آزمایشگاهی و نیز نواقص موجود در تئوری‌های مربوطه بیشتر در کارهای آکادمیک و تحقیقاتی جهت طراحی پروانه‌ها بهره برده می‌شود. در روش دیگر با استفاده از سری‌های استاندارد، هندسه مطلوب پروانه به دست می‌آید. با آزمایش پروانه‌های موجود در این سری‌ها درون تونل کاویتاسیون و تخمین

رابطه تابعی ضرایب تراست، گشتاور و بازدهی مربوط به هر پروانه با تعداد محدودی پارامتر هندسی، این سری‌ها شکل گرفته‌اند و از این جهت که ضرایب عملکردی مربوطه از طریق آزمایش مشخص شده‌اند قابلیت اعتماد طراحی بالایی داشته و بیشتر صنایع شناور سازی از پروانه‌های موجود در این سری‌ها جهت طراحی پروانه پیش برنده شناور خود بهره می‌برند. پروانه‌های سری بی وگنینگن^۷ یکی از سری‌های استاندارد هستند که به صورت گسترده از آن‌ها جهت طراحی پروانه مطلوب در صنایع شناور سازی استفاده می‌گردد. این سری علاوه بر دارا بودن راندمان مناسب دارای خواص کاویتاسیونی مطلوب نیز می‌باشد. تا کنون ۱۲۰ مورد از پروانه‌های موجود در این سری در حوضچه‌های آب مورد آزمایش قرار گرفته است. خروجی این آزمایشات ضرایب تراست و گشتاور مربوطه بوده که به صورت تابع تحلیلی چند جمله‌ای بر حسب تعدادی از پارامترهای هندسی پروانه بیان گردیده است [۲]. بعلاوه تأثیر تغییر عدد رینولدز نیز در معادلات مربوط به ضرایب تراست و گشتاور پروانه اعمال شده است. فرآیند طراحی این سری‌ها معمولاً یا به صورت سعی وخطا یا استفاده از فرآیندهای بهینه سازی هوشمند برای به دست آوردن بهینه ترین حالات پارامترهای طراحی برای دستیابی شناور به یک سرعت مشخص در حداکثر راندمان پره می‌باشد. با به دست آوردن این پارامترها ابعاد

¹ Propeller
² Lifting Line
³ Lifting Surface
⁴ Boundary Element Method
⁵ Burrell's Analysis Method
⁶ Lerb's Analysis Method

⁷B_Wageningen

در این مقاله با استفاده از سری استاندارد بی وگنینگن به طراحی هندسه پروانه جلوبرنده برای شناور لایروب خزر پرداخته شده است و با استفاده از روش سطح پاسخ، امکان طراحی بهینه پروانه جلوبرنده شناور بررسی می‌گردد.

۲- پروانه سری بی وگنینگن

پروانه‌های سری بی وگنینگن یکی از سری‌های استاندارد هستند که به صورت گسترده از آن‌ها جهت طراحی پروانه مطلوب در صنایع شناور سازی استفاده می‌گردد. این سری علاوه بر دارا بودن راندمان مناسب دارای خواص کاویتاسیونی مطلوب نیز می‌باشد. تا کنون ۱۲۰ مورد از پروانه‌های موجود در این سری در حوضچه‌های آب مورد آزمایش قرار گرفته است. خروجی این آزمایشات ضرایب تراست و گشتاور مربوطه بوده که به صورت تابع تحلیلی چند جمله‌ای بر حسب ضریب پیشروی (J)، نسبت گام به قطر (P/D)، نسبت سطح پره (A_E/A_0) و تعداد پرها (Z) بیان شده است. این توابع توسط استرویلد^۴ و ون‌اسانن^۵ برای کارکرد پروانه در جریان با عدد رینولدز 2×10^6 به دست آمده است.

ضرایب تراست و تورک پروانه‌های موجود در این سری با رابطه زیر محاسبه می‌گردد[۱]:

$$\begin{cases} K_T = \sum_{n=1}^{39} C_n(J)^{S_n}(P/D)^{t_n}(A_E/A_0)^{u_n}(Z)^{v_n} \\ K_Q = \sum_{n=1}^{47} C_n(J)^{S_n}(P/D)^{t_n}(A_E/A_0)^{u_n}(Z)^{v_n} \end{cases} \quad (1)$$

ثوابت موجود در معادله فوق در جداول پیوست نشان داده شده‌اند. همچنین رابطه‌ای وجود دارد که معادلات فوق را با تصحیح صورت گرفته بین محدوده اعداد رینولدز 2×10^6 تا 2×10^9 معتبر می‌نماید. این رابطه به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{cases} K_T(R_n) = K_T(R_n = 2 \times 10^6) + \Delta K_T(R_n) \\ K_Q(R_n) = K_Q(R_n = 2 \times 10^6) + \Delta K_Q(R_n) \end{cases} \quad (2)$$

که در این معادلات عدد رینولدز بوده ΔK_T و ΔK_Q از روابط (۱۲) و (۱۳) که در پیوست آمده است، به دست می‌آیند. رابطه (۲) برای یافتن مقادیر ضریب تورک و تراست در محدوده‌های زیر معتبر است:

$$2 \leq Z \leq 7, \quad 0.3 \leq A_E/A_0 \leq 1.05, \quad 0.5 \leq P/D \leq 1.4 \quad (3)$$

علاوه بر روابطی که برای تخمین ضرایب تورک و تراست در این سری موجود است، معادله‌ای نیز وجود دارد که شرط عدم وقوع کاویتاسیون بر روی پروانه محسوب می‌گردد. این معادله تخمینی برای نسبت مساحت توسعه یافته به مساحت دیسک (به دست می‌دهد که در صورت در نظر گرفتن این نسبت A_E/A_0 پروانه یعنی) بیشتر از میزان تخمینی برآورد شده توسط این معادله کاویتاسیون به وقوع نخواهد پیوست. معادله ذکر شده عبارتست از [۲]:

$$\left(\frac{A_E}{A_0}\right)_{min} = \frac{1.3 + 0.3Z}{(P_0 - P_v)D^2} T + K \quad (4)$$

در معادله فوق P_0 فشار استاتیکی سیال در محور شفت پروانه، P_v فشار بخار در دمای T بر حسب (kg/m^3) و K برای شناورهای تک پروانه 0.7 و برای شناورهای دو پروانه‌ای 0.1 می‌باشد.

هندسی پروانه از جداول موجود در این سری به دست می‌آید و پروانه از لحاظ هندسی ترسیم می‌گردد. روش سطح پاسخ^۱ یکی از روش‌های طراحی آماری است که در اصل برای طراحی و تحلیل آزمایش‌های فیزیکی ابداع شده است [۳]. امروزه از این روش برای طراحی و بهینه سازی آزمایش‌های عددی نیز استفاده می‌شود. این روش مکانیزم و نقشه راه نظام مندی ارائه می‌دهد که به کمک آن می‌توان میزان تاثیر ورودی‌ها بر خروجی یا خروجی‌ها در یک فرآیند را با دقت مطلوبی پیش بینی کرد و حالات بهینه پارامترهای ورودی فرآیند برای ماکزیمم یا مینیمم کردن خروجی، به دست آورد. از مزایای این روش سادگی اجرا، سرعت و کارایی بالا را می‌توان نام برد. به خاطر دارا بودن این روش از مزایای ذکر شده می‌توان در فرآیند طراحی بهینه پروانه جلوبرنده شناور از آن استفاده کرد. تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که مدلسازی جریان اطراف پروانه از مسایل پیچیده سیالاتی می‌باشد. پیچیده بودن آن به علت هندسه و شبکه بندی دامنه ی حل و طولانی بودن زمان حل معادلات حاکم بر مسئله می‌باشد. در مرجع [۴] با استفاده از یک روش بهینه سازی تئوری سطح برا به همراه روش تطبیقی پره ها به طراحی پروانه با کاربرد دریایی پرداخته شده است. روش کار بدین صورت است که با گسسته سازی سطح انحنای متوسط پره با استفاده از روش شبکه گردابه‌ای، به کمک حل عددی یک مساله تکراری سطح انحنای بهینه برای پروانه محاسبه می‌شود. سطح انحنای متوسط پره در حین فرآیند حل عددی تکراری تغییر شکل می‌یابد تا در نهایت شرط مرزی سرعت عمودی صفر جریان نسبت به سطح پره برآورده شود. در مرجع [۵] پیش بینی نقطه شروع کاویتاسیون بر روی نوک پره ی پروانه‌های دریایی مورد بررسی واقع شده است. آن‌ها با استفاده از حل عددی جریان اطراف پروانه با روش‌های توربولانسی RANS^۲ نقطه شروع کاویتاسیون بر روی پروانه را تخمین زده‌اند. آن‌ها کار عددی خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نموده و مطابقت خوب روش‌های RANS با نتایج آزمایشگاهی را نشان دادند. مرجع [۶] با کمک نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت^۳ و استفاده از مدل‌های توربولانسی k- ω و k- ϵ به تحلیل رفتار سیال اطراف یک نوع خاص از پروانه دریایی به نام پروانه 4119 پرداخته است که نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و دقت مناسب هر دو مدل آشفتگی نشان داده شده است. در مرجع [۷] جریان اطراف پروانه در دو حالت جریان آزاد آب و میدان برخاستگی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مدلسازی شده است. نتایج به دست آمده با نتایج مدل پروانه آزمایش شده در تونل کاویتاسیون مقایسه شده که همخوانی خوبی را نشان داده است. در حوزه پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه استفاده از روش سطح پاسخ به منظور بهینه‌سازی می‌توان به مرجع [۸] اشاره نمود. در این پژوهش یک مبدل گرمایی فین دار به منظور افزایش انتقال حرارت و کاهش افت فشار درون مبدل با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی که از زیر مجموعه‌های روش سطح پاسخ است بهینه سازی شده است. در مرجع [۹] نوسانات فشار با وجود جریان های توربولانسی ناپایدار اطراف یک پروانه‌ی دریایی تحت جریان غیر یکنواخت تجزیه و تحلیل شده است. در این پژوهش شبیه سازی عددی کاویتاسیون پروانه بر اساس معادلات ناویر استوکس حل شده و از مدل توربولانسی SST_k- ω استفاده شده است. نتایج با استفاده از نرم افزار CFX استخراج و ارتباط بین نوسانات فشار و تغییرات کاویتاسیون بر روی پره ها نمایش داده شده است.

¹ Response Surface Methodology

² Reynolds Averaged Navier Stokes

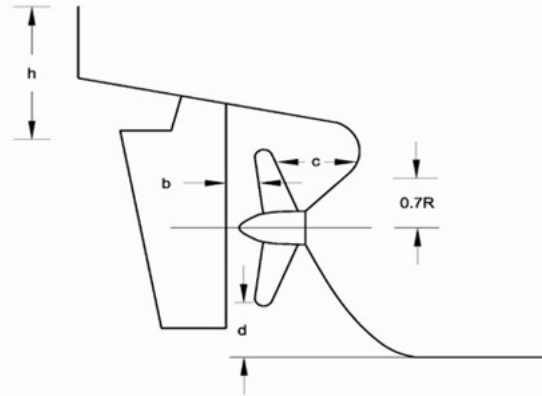
³ Fluent

⁴Oosterveld

⁵ Van Oossanen

۳- فرایند طراحی پروانه

اولین گام در طراحی پروانه‌های جلوبرنده مشخص کردن محدوده پارامترهای طراحی است. به عنوان مثال محدوده قطر مناسب پروانه از روی محدودیت‌های شناور با توجه به شکل ۱ انتخاب می‌گردد و یا انتخاب تعداد پره بر مبنای فرکانس ارتعاشی موتور و بدنه می‌باشد. برای این منظور برای موتورهای با تعداد سیلندر فرد تعداد پره زوج و بالعکس را انتخاب می‌نمایند. همچنین در این پژوهش به علت اینکه شناور مورد مطالعه دارای موتوری از پیش طراحی شده می‌باشد در نتیجه سرعت دورانی پروانه نیز از روی دور موتور در حداکثر توان انتخاب می‌گردد.



شکل ۱: انتخاب قطر بر مبنای توصیه موسسات رده بندی

گام بعدی در طراحی پروانه محاسبه تراسست مورد نیاز یا تورک وارد بر پروانه می‌باشد. موتور شناور توسط گیربکس و شفت به پروانه جلوبرنده متصل است بنابراین توان تحویل شده به پروانه^۱ (P_D) با رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_D = \eta_S P_B \quad (5)$$

که در رابطه فوق η_S راندمان شفت و گیربکس و P_B توان موتور شناور^۲ می‌باشد. در صورت در دسترس نبودن میزان η_S اندازه آن را به صورت تقریبی و از طریق رابطه زیر در نظر می‌گیرند:

$$0.96 \leq \eta_S \leq 0.98 \quad (6)$$

پس از محاسبه P_D ، تورک وارد بر پروانه را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$Q = \frac{P_D}{n} \quad (7)$$

که در معادله فوق n سرعت دورانی پروانه بر حسب (rad/sec) و P_D توان بر مبنای وات می‌باشد. نیروی تراسست لازم برای شناور را با توجه به نمودارهای مقاومت شناور در آب-سرعت شناور می‌توان برآورد نمود. در این پژوهش به علت در دسترس نبودن چنین نموداری نیروی تراسست لازم را نمی‌توان به درستی تخمین زد. در مجموع پروانه جلوبرنده باید به نحوی طراحی شود که ضمن حداکثر شدن راندمان، تورک تولیدی توسط پروانه که با ضریب تورک توسط رابطه (۱۶) پیوست محاسبه می‌گردد، معادل با تورک تولیدی توسط موتور شناور باشد و یا در مورد شناورهایی که هنوز موتور جلوبرنده برایشان انتخاب نشده و نمودار مقاومتشان مشخص است، نیروی

تراست پروانه که با رابطه (۱۵) محاسبه می‌گردد نیروی تراسست لازم برای رساندن شناور به سرعت طراحی را ایجاد نماید. انتخاب گام، نسبت سطح و تعداد پره بهینه برای پروانه گام نهایی در طراحی پروانه‌های سری استاندارد می‌باشد.

۳-۱- روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضیاتی است که برای توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرآیندها مناسب می‌باشد. بیشترین کاربرد RSM در دنیای صنعتی به خصوص در مواقعی که چندین متغیر ورودی بر روی مؤلفه‌های عملکردی و یا کیفیت کالای خروجی تأثیر گذار هستند، می‌باشد. این مؤلفه‌های عملکردی و یا مشخصه‌های کیفی پاسخ نامیده می‌شوند. متغیرهای ورودی که اغلب متغیرهای مستقل نامیده می‌شوند قابل تنظیم بوده و با تغییرشان متغیر پاسخ تغییر می‌نمایند. روش سطح پاسخ با استفاده از تکنیک‌های آماری و ریاضیاتی موجود درون خود قادر به ایجاد رابطه تابعی بین متغیرهای مستقل ورودی و متغیر یا متغیرهای پاسخ بوده و نیز توانایی شناسایی متغیرهای ورودی مناسب با پاسخ‌های مدنظر و یا همان فرآیند بهینه سازی را دارا می‌باشد. در این پژوهش برای طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ از نرم افزار دیزاین اکسپرت^۳ استفاده شده است.

۳-۲- روش طراحی مرکب مرکزی^۴

برای طراحی ماتریس آزمایشات در روش RSM مکانیزم‌های مختلفی وجود دارد. یکی از آن‌ها روش طراحی مرکب مرکزی یا CCD می‌باشد که از زیر مجموعه‌های روش RSM است. این روش جزو روش‌های طراحی مرتبه دوم دسته بندی می‌گردد. این روش از سه بخش تشکیل شده است:

یک طراحی فاکتوری که در آن سطح ماکزیمم و مینیمم متغیرهای ورودی به ترتیب با ۱ و ۱- کدبندی می‌شود. در این حالت اگر k متغیر مستقل ورودی داشته باشیم چون هر متغیر تنها دو سطح ماکزیمم و مینیمم دارد در نتیجه ترکیب تمام حالات این متغیرها با یکدیگر تشکیل 2^k آزمایش می‌دهد که به آن طراحی فاکتوری عاملی می‌گویند. یک بخش طراحی محوری^۵ شامل $2k$ نقطه طراحی و به نحوی انتخاب می‌شوند که دو نقطه بر روی محور هر متغیر کنترلی به فاصله α از مرکز بازه همان متغیر قرار گیرند. تعداد n_0 نقطه طراحی مرکزی که ترکیب نقاط میانی هر متغیر مستقل با یکدیگر را شامل می‌شود. بنابراین تعداد کل آزمایش‌های مورد نیاز در این روش در مجموع عبارتست از:

$$n = 2^k + 2k + n_0 \quad (8)$$

که در معادله فوق n تعداد آزمایش‌های طراحی شده توسط روش CCD می‌باشد.

۳-۲- مدل سازی عددی جریان سیال

³ Design-Expert 7.1.5

⁴ Central composite design

⁵ Axial point

¹ Power delivered

² Brake power

محاسبه می‌نماییم. ذکر این نکته ضروری است که جعبه دنده کاهنده که توان موتور را به پروانه منتقل می‌نماید دارای نسبت یک به ۳/۹۵ می‌باشد و در محاسبه سرعت دورانی پروانه، ۱۲۲۵ دور بر دقیقه بر این عدد تقسیم شده و سرعت دورانی واقعی پروانه ۳۱۰/۱۲ دور بر دقیقه محاسبه می‌گردد.

$$Q = \frac{\eta_s P_B}{n} = \frac{0.96 * 575000 * 0.736}{32.46} = 12516 \text{ (N.m)} \quad (10)$$

پس تورک ۱۲۵۱۶ نیوتن-متر از طرف موتور به پروانه جلوبرنده وارد می‌گردد. بنابراین پروانه جلوبرنده بهینه برای شناور لایروب خزر پروانه‌ای است که در تورک ذکر شده حداکثر راندمان و نیروی تراست را ایجاد نماید. برای نیل به این اهداف در این پژوهش دو خروجی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. خروجی اول راندمان پروانه و خروجی دوم قدر مطلق اختلاف بین تورک پروانه و تورک ۱۲۵۱۶ نیوتن-متری موتور که در مورد خروجی اول مسأله حداکثر سازی این خروجی و در مورد دوم حداقل کردن یا مینیمم یابی می‌باشد. برای محاسبه راندمان پروانه جلوبرنده در این مقاله معادلات (۱)، (۲)، (۱۱) و (۱۲) در نرم افزار مطلب^۳ کدنویسی و همچنین ضرایب این معادلات از جدول ۳ پیوست در کد مذکور وارد گردید. با وارد کردن چهار فاکتور طراحی این پژوهش در کد مذکور راندمان پروانه، قدر مطلق اختلاف بین گشتاور پروانه و موتور، تراست و تورک پروانه و نیز حداقل نسبت مساحت توسعه یافته برای عدم وقوع کابیناسیون (معادله (۴)) محاسبه و در خروجی چاپ می‌شوند. برای ایجاد جدول طراحی با روش CCD از نرم افزار دیزاین اکسپرت در این مقاله بهره برده شده است. جدول طراحی با در نظر گرفتن یک نقطه مرکزی برای طراحی و همچنین $\alpha = 1$ ایجاد شده است. در مجموع برای افزایش دقت طراحی، نسبت مساحت توسعه یافته به دو زیر بازه مساوی تقسیم بندی شده و با استفاده از این دو زیر بازه دو جدول طراحی ایجاد شده است. زیر بازه اول از مقدار ۰/۳ تا ۰/۶۸ را شامل می‌شود و نام جدول طراحی آن شماره یک و زیر بازه دوم مقادیر ۰/۶۸ تا ۱/۰۵ را در بر می‌گیرد و نام جدول طراحی آن در این مقاله شماره دو اختیار شده است. هر کدام از این جداول، ۱۵ طراحی مختلف را پیشنهاد داده که با توجه به اینکه تنها ۳ فاکتور در طراحی این جداول استفاده شده. این تعداد طراحی با معادله (۸) مطابقت دارد. جداول ۶ و ۷ پیوست، هر ردیف نشان دهنده یک نقطه طراحی بوده که سه ستون اول آن ورودی‌های طراحی و دو ستون آخر به ترتیب از چپ به راست عبارتند از راندمان پروانه (η) و قدر مطلق اختلاف بین تورک پروانه و تورک موتور (X) که توسط کد مطلب ذکر شده، در هر مورد محاسبه شده‌اند. لازم به ذکر است که تعداد پره پروانه به علت ثابت بودن در ایجاد جدول طراحی در نظر گرفته نشده و تنها از سه متغیر دیگر در شکل دادن این جدول بهره برده شده است. بعد از ایجاد جدول طراحی، نرم افزار دیزاین اکسپرت با استفاده از داده‌های این جدول و روش تقریب کمترین مربعات گسسته به تخمین تابع با استفاده از فرم استاندارد معادلات مربوطه می‌پردازد. معادلات تخمینی که تابعیت دو خروجی η و X را از سه متغیر ورودی به دست می‌دهند به ترتیب بر حسب شماره جداول نامگذاری و به صورت معادلات (۱۳) و (۱۴) می‌باشند. که η_1 و X_1 مقادیر همین پارامترها در جدول شماره یک را نشان می‌دهد و به همین ترتیب η_2 و X_2 آمار کیفی مدل‌های تخمین زده شده در جدول ۸ نشان داده شده است. همینطوری که در این جدول مشخص است مدل‌های تخمینی برای طراحی شماره یک از کیفیت کمتری نسبت به طراحی شماره دو برخوردارند اما در مجموع هر دو طراحی دارای کیفیت قابل قبول می‌باشند.

معادلات حاکم بر حرکت سیال عبارتند از بقای جرم یا پیوستگی و معادله بقای مومنتم یا ناویر استوکس. این معادلات از نوع معادلات دیفرانسیل غیر خطی بوده که برای حل آن‌ها روش‌های متفاوتی وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از روش حجم محدود بوده که ابتدا حوزه حل جریان سیال را به حجم‌های گسسته که حجم محدود نامیده می‌شوند گسسته می‌نماید. در این مقاله جهت حل جریان سیال اطراف پروانه جلوبرنده از نرم افزار CFX 14.0 که بر پایه روش حجم محدود می‌باشد استفاده شده است. در نرم افزار 14.0 CFX دو مدل کلی جهت محاسبه جریان‌های چند فازی وجود دارد که عبارتند از مدل همگن^۱ و مدل غیر همگن^۲. برای مدلسازی کابیناسیون حول پروانه در این نرم افزار از هر دو مدل همگن و غیر همگن می‌توان استفاده کرد. اما به علت ساده بودن مدل همگن نسبت به غیر همگن و همگرایی قوی تر این مدل در این مقاله از مدل همگن برای شبیه سازی کابیناسیون استفاده می‌گردد. نرم افزار CFX 14.0 از روش حجم محدود بر پایه المان که ابتدا حوزه حل جریان را به حجم‌های کوچکتری به نام مش گسسته کرده، بهره می‌برد. از مش برای ساختن حجم محدودها استفاده می‌شود.

۴- طراحی هندسه پروانه

برای طراحی هندسه پروانه جلوبرنده با استفاده از روش سطح پاسخ ابتدا نیاز است که فاکتورهای طراحی و حدود آن‌ها را مشخص نمود. فاکتورهای طراحی با توجه به استفاده از سری استاندارد بی-وگنینگن شامل متغیرهای ضریب پیشروی (J)، نسبت گام به قطر (P/D)، نسبت مساحت توسعه یافته پروانه (A_E/A_0) و همچنین تعداد پره پروانه (Z) می‌باشد. از میان متغیرهای فوق نسبت گام به قطر و مساحت توسعه یافته پروانه با توجه به محدودیت موجود در سری بی-وگنینگن (معادله (۳)) برای طراحی پروانه در این پژوهش انتخاب می‌گردند. تعداد پره پروانه هم با توجه به پروانه قبلی استفاده شده در شناور که دارای چهار پره بوده، همان چهار پره در نظر گرفته می‌شود. برای انتخاب ضریب پیشروی ابتدا باید محدوده قطر پروانه را مشخص کرد. با در نظر گرفتن شرایط پاشنه کشتی (شکل ۱) و عمق آب‌خور شناور لایروب خزر (جدول ۴) قطر حداکثر پروانه به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$h + D + d = 3.75 \rightarrow 0.5D + D + 0.035D = 3.75 \quad (9)$$

$$\rightarrow D = 2.44$$

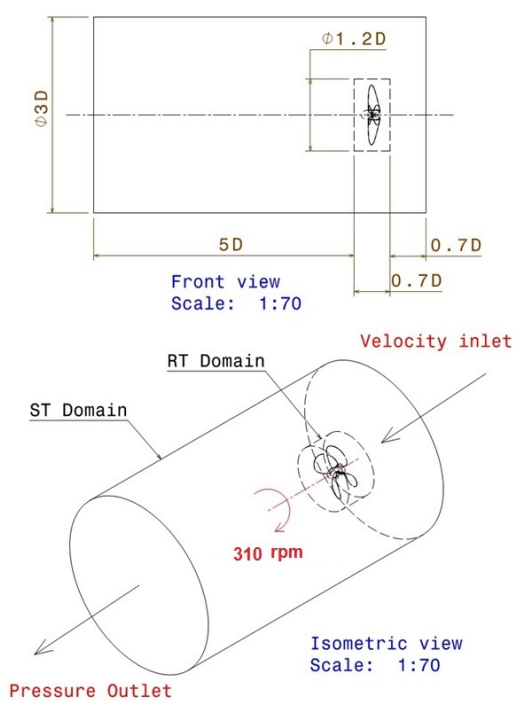
برای اطمینان قطر حداکثر کمتر از مقدار فوق و به میزان ۲ متر انتخاب می‌گردد. با توجه به اطلاعات جدول ۴ قطر پروانه قبلی به کار رفته در شناور ۱/۷۵ متر می‌باشد. قطر حداقلی با توجه به این قطر، ۱/۵ متر انتخاب می‌گردد. سرعت شناور ۱۰/۵ نات و سرعت دورانی حداکثر موتور شناور ۱۲۲۵ دور بر دقیقه است. با اطلاعات قطر پروانه، سرعت شناور و سرعت دورانی حداکثر و با بهره‌گیری از معادله (۱۷) که در آن پرنتر اول، ضریب پیشروی می‌باشد، محدوده ضریب پیشروی بین ۰/۴ تا ۰/۶ محاسبه می‌گردد. در جدول ۵ محدوده حداقل و حداکثر پارامترهای طراحی نشان داده شده است. با دقت در این موضوع که شناور لایروب خزر دارای دو موتور بوده که هر کدام به توان ۵۷۵ اسب بخار در دور موتور ۱۲۲۵ دور بر دقیقه می‌باشند هدف از طراحی بهینه پروانه آن است که پروانه‌ای انتخاب گردد که در این توان موتور دارای حداکثر راندمان و تراست باشد. بدین منظور ابتدا با استفاده از معادلات (۷) تا (۹) تورک وارد شده به پروانه از طرف موتور را

¹ Homogeneous

² Inhomogeneous

³ Matlab

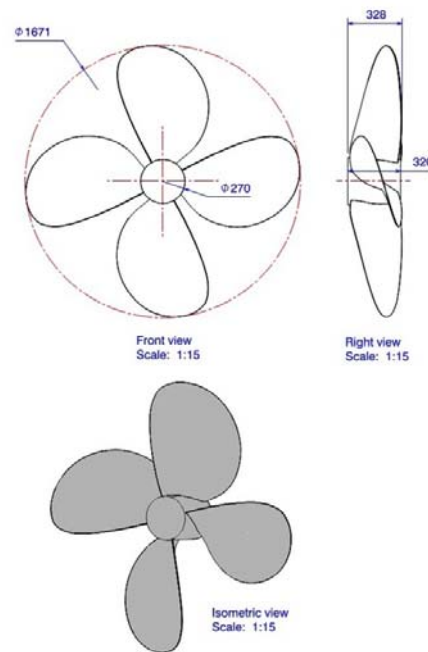
جهت بررسی عددی پروانه، ابتدا حوزه^۱ حل جریان سیال در اطراف پروانه جلوبرنده ایجاد شده است. حوزه حل جریان به دو بخش استوانه‌ای شکل تقسیم بندی شده است. یک بخش که پروانه را در خود جای داده و در این پژوهش با RT نامگذاری شده و بخش دیگری که حوزه RT را در درون خود جای داده و با ST نامگذاری گردیده است. این تقسیم بندی حوزه حل به دو بخش مجزا به منظور شبیه سازی حرکت پروانه با تکنیک مرجع چرخان متحرک^۲ می‌باشد. در این تکنیک مش ثابت بوده و یک جمله چشمه مومنت در حوزه چرخان جریان توربین (RT) به معادلات ناویر-استوکس اضافه می‌شود. در واقع پروانه به عنوان چشمه مومنت سرعت عمل می‌کند و حل به صورت پایا بررسی می‌گردد. این عمل باعث کاهش چشمگیر زمان محاسبات می‌گردد ضمن آنکه دارای دقت مطلوبی نیز می‌باشد. حوزه حل جریان به همراه شرایط مرزی مربوطه در شکل ۳ نشان داده شده است. شرایط مرزی در حقیقت توصیفی از فیزیک مسأله می‌باشند که در این پژوهش در ورودی حوزه حل جریان سیال شرط مرزی ورودی سرعت^۳ با سرعت یکنواخت ۵/۴ متر بر ثانیه در راستای x، در خروجی شرط مرزی فشار خروجی^۴ با فشار نسبی صفر و دیواره‌های خارجی استوانه حوزه حل جریان از نوع دیواره‌های متحرک با سرعت ۵/۴ متر بر ثانیه همراستا با جریان ورودی و با شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۳: حوزه حل جریان سیال و شرایط مرزی مربوطه

هندسه تولید شده با استفاده از نرم افزار AnsysICEMCFD 14.0 مش بندی شده است. مش‌ها از نوع مش غیر ساختار یافته^۵ هیبریدی می‌باشد. در مش هیبریدی مش در نزدیکی دیواره جهت مدلسازی رفتار نزدیک دیواره از

پس از تخمین تابع با استفاده از مفهوم تابع درجه تمایل در روش سطح پاسخ به بهینه‌سازی طراحی اقدام می‌شود. هدف از بهینه‌سازی طراحی حداکثر کردن راندمان و حداقل کردن قدر مطلق فاصله بین تورک پروانه طراحی شده و تورک موتور است. برای بهینه‌سازی طراحی در این مرحله نیز از نرم افزار دیزاین اکسپرت بهره برده شده است. در جدول ۹ تعدادی نقاط بهینه طراحی که توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت محاسبه شده‌اند نشان داده شده است. این تعداد نقاط به علت چند هدفه بودن طراحی است. تمامی این طراحی‌ها هم ارز با هم می‌باشند و بسته به نظر طراح هر کدام از آن‌ها می‌توانند به کار گرفته شوند. از میان این نقاط بهینه، نقطه‌ای که دارای بیشترین نیروی تراست و راندمان مناسب بوده و قید عدم وقوع کاویتاسیون (معادله (۴)) را ارضا می‌کند به عنوان هندسه نهایی طراحی انتخاب شده است. نقطه نهایی انتخابی ردیف ۶ جدول ۹ بوده که با دارا بودن راندمان ۵۰ درصدی و نیروی تراست ۴۸۵۰۵ نیوتن-متری، تورک مورد نیاز جهت چرخاندنش در دور ۳۱۰ دور بر دقیقه، ۱۳۰۳۶ نیوتن-متر است که مطابقت خوبی با تورک تولیدی ۱۲۵۱۶ نیوتنی موتور دارد. برای تهیه مدل هندسی پروانه با مشخصات موجود در ردیف ۶ جدول ۹، از نرم افزار پراپ کد استفاده شده است. هندسه نهایی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: هندسه بهینه نهایی پروانه طراحی شده برای شناور لایروب خزر

در ادامه این پژوهش، با استفاده از حل عددی جریان سیال آب اطراف پروانه عملکرد مورد انتظار پروانه طراحی شده سنجیده می‌شود. هندسه بهینه پروانه مدلسازی شده جهت اعتبار آزمایی عملکرد با استفاده از نرم افزار CFX 14.0 در حالت جریان آب تراکم ناپذیر، لزج، آشفته، پایا و سه بعدی اطراف پروانه مدلسازی عددی و ضرایب تراست و گشتاور حاصل از حل عددی با مقادیر متناظرشان که از معادلات مربوطه موجود در این سری حاصل می‌گردند مقایسه می‌شود.

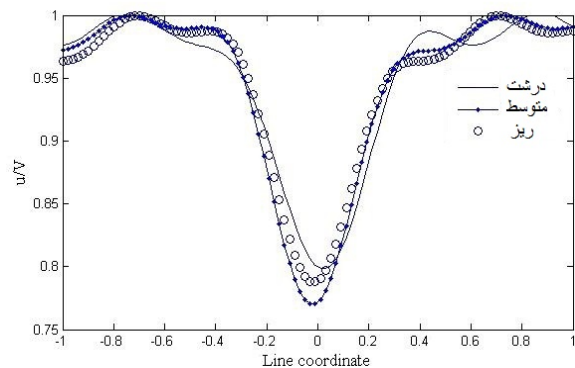
۶-۱- نتایج مدلسازی عددی پروانه جلوبرنده لایروب خزر

¹ Domain
² Moving reference frame
³ Velocity Inlet
⁴ Pressure outlet
⁵ Unstructure mesh

نوع مش منشوری^۱ بوده که عمود بر مرز در جریان سیال رشد کرده و گرادبان‌های شدید عمود بر مرز را در این نواحی پوشش می‌دهد. به این نوع مش بندی، مش تورمی^۲ می‌گویند. در نواحی دور از دیواره مش‌ها به صورت تتراهدرال^۳ انتخاب شده‌اند. الگوریتم مش‌بندی از نوع پیچ منطبق^۴ انتخاب و جهت اندازه‌گذاری بر روی لبه‌ها و سطوح مش از تابع سایز پیشرفته^۵ (ASF) استفاده گردیده است. تابع سایز پیشرفته دارای پنج گزینه است که در این مقاله از قسمت انحنای آن بهره برده شده است. کیفیت مش تولید شده بر حسب دو کمیت نرخ کشیدگی^۶ و نرخ اعوجاج^۷ سنجیده شده است. نرخ کشیدگی حداکثری المان‌ها برای المان‌های باکیفیت مقادیر زیر ۵۰۰ و نرخ اعوجاج نیز مقادیر نزدیک به صفر توصیه می‌شوند که مش مذکور این شرایط را به خوبی ارضا می‌نماید. جهت بررسی استقلال حل از شبکه سه سطح مش مختلف تولید شده که در هر مورد برای ارزیابی همگرایی حل پس از رسیدن باقیمانده‌های حل به $1E - 05$ و ثابت شدن ضریب تورک پروانه فرآیند حل متوقف می‌شود. پس از توقف حل نسبت سرعت سیال در راستای x جریان (u) به نسبت کلی سرعت جریان (V) بر روی خطی همراستا با محور z و قرار گرفتن در فاصله نیم متری از مرکز دوران پروانه، برای هر سه سطح مش تولیدی ترسیم شده است.

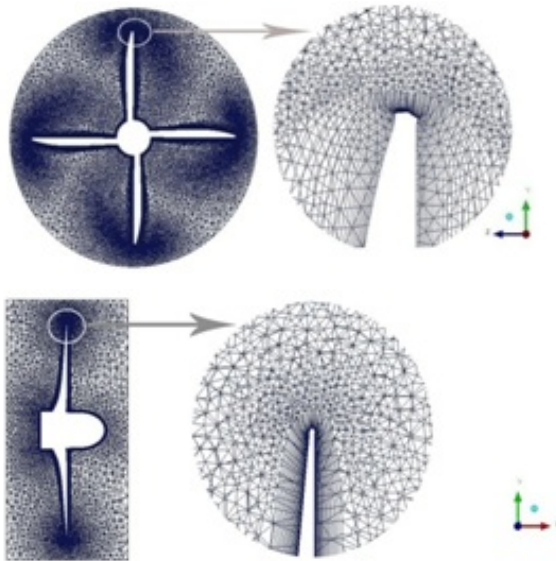
جدول ۲: نتایج استقلال حل از شبکه

سطوح مش	تعداد مش
درشت	۵۴۴۷۵۴
متوسط	۱۰۳۶۵۴۸
ریز	۲۱۴۴۳۶۵

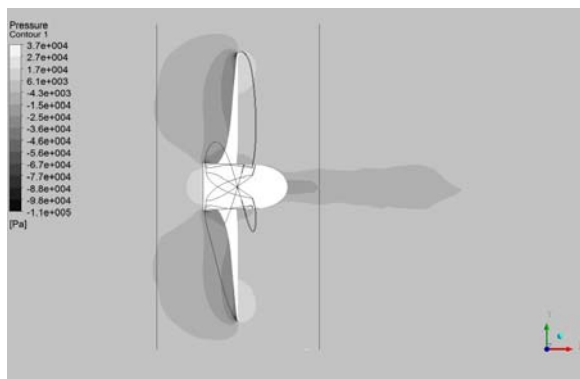


شکل ۴: نتایج استقلال حل از شبکه

همانطوری که در شکل ۴ مشخص است نتایج حل عددی جریان برای دو سطح مش متوسط و ریز به میزان مطلوبی به یکدیگر نزدیک شده و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حل عددی مستقل از تعداد مش شده است. در جدول ۲ تعداد المان در سه سطح مش مورد بحث نشان داده شده است.



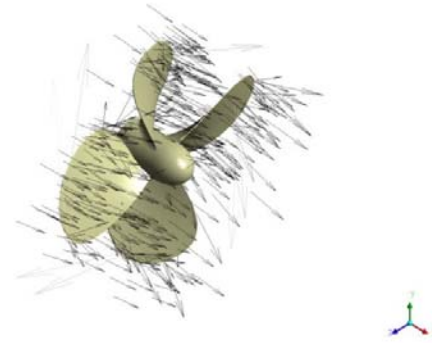
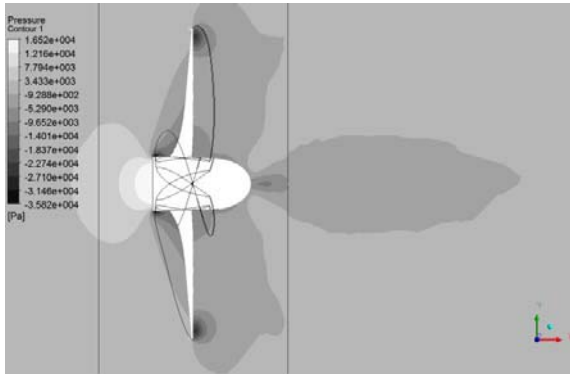
شکل ۵: نماهایی از مش تولید شده برای حوزه RT جریان



شکل ۶: کانتور فشار حول پروانه ی طراحی شده در راستای x

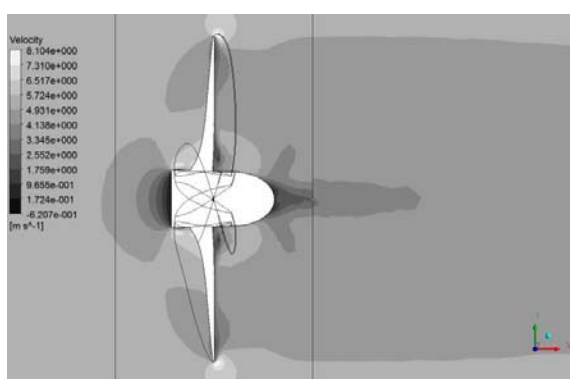
⁹ Scalable
¹⁰ Inflation mesh

¹ Prism mesh
² Inflation mesh
³ Tetrahedral mesh
⁴ Patch conforming
⁵ Advanced size function
⁶ Curvature
⁷ Aspect ratio
⁸ Skewness

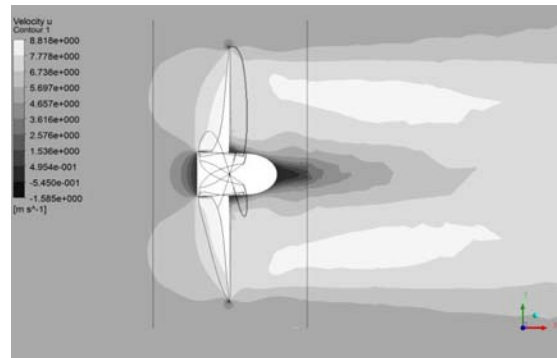


شکل ۷: بردارهای سرعت سیال حول پروانه ی طراحی شده

در شکل ۸ کانتور سرعت در صفحات گذرنده از مرکز محور دوران پروانه ترسیم شده است.



شکل ۹: کانتور فشار و سرعت سیال حول پروانه با نصف دور طراحی



شکل ۸: کانتور سرعت سیال حول پروانه ی طراحی شده

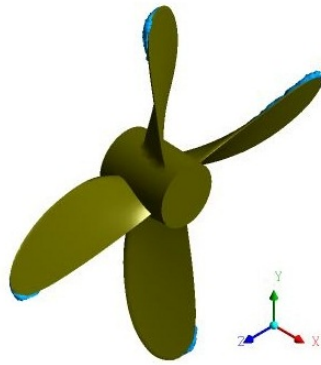
نیروی تراست و تورک مورد نیاز پروانه برای چرخش محاسبه و در جدول ۱۰ نشان داده شده‌اند. این جدول مقایسه‌ای بین نیروی تورک و تراست خروجی حل عددی جریان و مقادیر همین متغیرها محاسبه شده توسط معادله موجود در سری استاندارد بی و گتینگن (معادله ۱))، ارائه می‌دهد. همانطور که در جدول مشخص است حل عددی جریان سیال دارای درصدی اختلاف با مقادیر پیش بینی شده نیروی تراست و تورک پروانه توسط معادله سری استاندارد می‌باشد. این موضوع می‌تواند ناشی از عدم دقت معادله موجود و یا عدم دقت کافی حل عددی باشد.

برای اطمینان از عدم وقوع کاویتاسیون ابتدا پروانه جلوبرنده‌ای را که در شرط عدم وقوع کاویتاسیون (معادله ۴)) صدق نمی‌کرد به عنوان نمونه انتخاب و با استفاده از حل عددی جریان سیال مدلسازی عددی گردید. پروانه مذکور در این مقاله به اسم پروانه کاویتاسیونی نامگذاری شده است. برای مدلسازی عددی این پروانه که تمامی مشخصات هندسی به جز نسبت مساحت توسعه یافته آن $(A_E/A_0) = 0.3$ با پروانه نهایی طراحی شده این مقاله منطبق است، از مدل چند فازی همگن نرم افزار CFX 14.0 بهره برده شده است. بدین منظور در حوزه حل جریان، دو سیال آب مایع و بخار آب هر دو در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است.

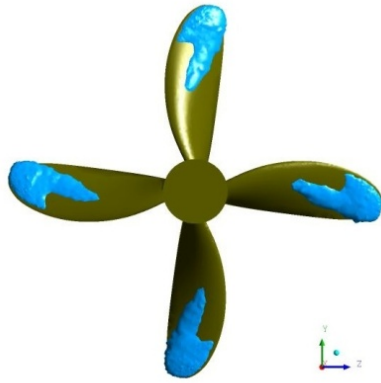
در پنجره انتقال جرم این نرم افزار گزینه کاویتاسیون^۱ انتخاب و فشار اشباع ۳۵۷۴ پاسکال معادل با فشار اشباع آب در دمای ۲۵ درجه انتخاب شده است. در صد حجمی بخار آب در ورودی برابر صفر و درصد حجمی آب مایع ۱ قرار داده شده است. تمامی تنظیمات دیگر حلگر مثل مدل بدون کاویتاسیون پروانه بهینه طراحی شده در نظر گرفته شده است. از حل عددی

شکل ۹ مربوط به کانتورهای فشار و سرعت پروانه ی طراحی شده در دور پایین تر از دور طراحی (۱۵۵ rpm) می باشد و با استفاده از نرم افزار CFX14.0 و بررسی شرایط کاویتاسیونی ، هیچگونه کاویتاسیون در اطراف پره ها تشکیل نشد. بدیهی است با دوره‌های بالاتر از دور طراحی امکان ایجاد کاویتاسیون وجود خواهد داشت ولی با توجه به اینکه شرایط طراحی پروانه در این مقاله بر اساس دور موتور لایروب خزر که به صورت پیش فرض در نظر گرفته شده است، با این وجود پروانه ی طراحی شده، پروانه ی بهینه شده ی لایروب خزر می باشد که هیچگونه کاویتاسیونی در اطراف پره ها در شرایط حاضر ایجاد نخواهد شد.

¹ Cavitation



نمای ایزومتریک



نمای پشتی

شکل ۱۱: در صد حجمی بخار آب بیش از ۱۰ درصد بر روی سطوح پروانه کاپیتاسیونی

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی که از زیر مجموعه‌های روش سطح پاسخ می‌باشد هندسه بهینه پروانه جلوبرنده برای شناور لایروب خزر از میان سری استاندارد بی وگنینگن استخراج گردید. به طور کلی نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود: راندمان پروانه با افزایش ضریب پیشروی و کاهش نسبت مساحت توسعه یافته افزایش می‌یابد. تأثیر پذیری راندمان از ضریب پیشروی بیشتر از نسبت مساحت توسعه یافته است.

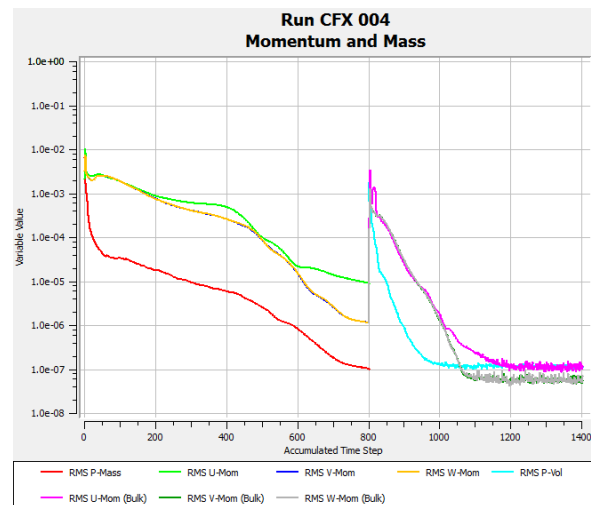
با بررسی همزمان اثر تغییرات ضریب پیشروی و نسبت گام به قطر مشاهده می‌گردد که در نسبت گام به قطر حدود ۰/۵ راندمان پروانه با افزایش ضریب پیشروی کاهش یافته و با افزایش نسبت گام به قطر تأثیر افزایش ضریب پیشروی، افزایش راندمان پروانه می‌باشد. همچنین با افزایش نسبت گام به قطر تا حدود ۰/۹۵ راندمان سیر افزایشی و بعد از آن کاهش را از خود نشان می‌دهد.

از بررسی تأثیر همزمان تغییر نسبت گام به قطر و نسبت مساحت توسعه یافته پیداست که با کاهش نسبت مساحت توسعه یافته و افزایش گام به قطر تا ۰/۹۵ راندمان افزایش داشته حال آنکه این افزایش نسبت مستقیمی با کاهش نسبت مساحت توسعه یافته دارد. با افزایش نسبت گام به قطر به بیشتر از ۰/۹۵ راندمان رفتار نزولی پیدا می‌کند.

جریان غیر کاپیتاسیونی برای مقدار دهی اولیه به حل استفاده شده که این کار پایداری حل را افزایش می‌دهد. در

شکل ۱۰ باقیمانده‌های حل عددی جریان سیال را برای پروانه کاپیتاسیونی مشاهده می‌نمایید. همانگونه که در شکل مشخص است تا تکرار ۸۰۰ مسأله به صورت غیر کاپیتاسیونی حل شده و پس از رسیدن باقیمانده‌های حل اولیه به مقدار $1E-05$ فرآیند حل متوقف و مدل کاپیتاسیون فعال شده است. از این حل به عنوان مقدار دهی اولیه به حل سیال کاپیتاسیونی استفاده شده است. پس از انتخاب مدل کاپیتاسیون، باقیمانده‌های حل تا $1E-07$ سیر کاهشی داشته و از آن به بعد ثابت شده که نشان از همگرایی حل عددی دارد.

نتایج نشان از وقوع کاپیتاسیون بر روی پروانه کاپیتاسیونی می‌دهد. کسر حجمی بیش از ۱۰ درصدی بخار آب بر روی پروانه کاپیتاسیونی ترسیم و در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: باقیمانده‌های حل عددی سیال برای پروانه کاپیتاسیونی

$$\begin{aligned} \Delta K_T &= 0.000353485 - 0.00333758(A_E/A_0)J^2 \\ &- 0.00478125(A_E/A_0)(P/D)J \\ &+ 0.000257792(\log R_n - 0.301)^2(A_E/A_0)J^2 \\ &+ 0.0000643192(\log R_n - 0.301)(P/D)^6J^2 \\ &- 0.0000110636(\log R_n - 0.301)^2(P/D)^6J^2 \\ &- 0.0000276305(\log R_n - 0.301)^2Z(A_E/A_0)J^2 \\ &+ 0.0000954(\log R_n - 0.301)Z(A_E/A_0)(P/D)J \\ &+ 0.0000032049(\log R_n \\ &- 0.301)Z^2(A_E/A_0)(P/D)^3J \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta K_Q &= -0.000591412 + 0.00696898(P/D) \\ &- 0.0000666654Z(P/D)^6 \\ &+ 0.0160818(A_E/A_0)^2 \\ &- 0.000938091(\log R_n \\ &- 0.301)(P/D) \\ &- 0.00059593(\log R_n \\ &- 0.301)(P/D)^2 \\ &+ 0.0000782099(\log R_n \\ &- 0.301)^2(P/D)^2 \\ &+ 0.0000052199(\log R_n \\ &- 0.301)Z(A_E/A_0)J^2 \\ &- 0.00000088528(\log R_n \\ &- 0.301)^2Z(A_E/A_0)(P/D)J \\ &+ 0.0000230171(\log R_n \\ &- 0.301)Z(P/D)^6 \\ &- 0.00000184341(\log R_n \\ &- 0.301)^2Z(P/D)^6 \\ &- 0.00400252(\log R_n \\ &- 0.301)(A_E/A_0)^2 \\ &+ 0.000220915(\log R_n \\ &- 0.301)^2(A_E/A_0)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \eta_1 &= 0.52 - 0.034J + 0.032\left(\frac{P}{D}\right) - 0.049\left(\frac{A_E}{A_0}\right) \\ &+ 0.12j\left(\frac{P}{D}\right) - 0.012J\left(\frac{A_E}{A_0}\right) \\ &+ 0.051\left(\frac{P}{D}\right)\left(\frac{A_E}{A_0}\right) - 0.033J^2 \\ &- 0.11\left(\frac{P}{D}\right)^2 - 0.031\left(\frac{A_E}{A_0}\right)^2 \\ \chi_1 &= 0.72 - 0.86J + 0.73\left(\frac{P}{D}\right) - 0.39\left(\frac{A_E}{A_0}\right) \\ &- 1.2J\left(\frac{P}{D}\right) + 0.51J\left(\frac{A_E}{A_0}\right) \\ &- 0.49\left(\frac{P}{D}\right)\left(\frac{A_E}{A_0}\right) + 0.94J^2 \\ &+ 0.39\left(\frac{P}{D}\right)^2 - 0.69\left(\frac{A_E}{A_0}\right)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

معادله تخمینی راندمان که با استفاده از روش سطح پاسخ محاسبه گردید به خوبی مقادیر راندمان پروانه را در محدوده دامنه متغیرهای ورودی پیش بینی نمود.

روش عددی به کار رفته مقادیر نیروی تراست و تورک پروانه جلوبرنده را با ماکزیمم خطای ۱۵ در صد نسبت به مقادیر پیش بینی شده همین متغیرها با استفاده از معادلات استاندارد سری بی وگنینگن محاسبه نمود. این خطا می‌تواند ناشی از عدم دقت کافی معادله استاندارد سری بی وگنینگن بوده و یا از عدم دقت کافی حل عددی باشد. در صورت اثبات عدم دقت کافی حل عددی می‌توان از مدل‌های توربولانسی دیگر مانند مدل SST k-w برای حل جریان بهره برد و نتایج را مقایسه نمود.

مدلسازی کاویتاسیون با استفاده از حل عددی جریان سیال حول پروانه برای یک پروانه کاویتاسیونی در شرایط عملکرد مشابه با پروانه نهایی طراحی شده این پژوهش انجام گردید. نتایج وجود کاویتاسیون در این پروانه را به درستی نشان داد. اما با حل مشابه جریان برای پروانه نهایی طراحی شده این پژوهش وجود کاویتاسیون در اطراف پروانه اثبات نگردید.

نتایج این پژوهش ثابت کرد که روش سطح پاسخ می‌تواند به عنوان روشی کارا در طراحی بهینه هندسه پروانه جلوبرنده از سری استاندارد بی وگنینگن به کار گرفته شود.

۶- فهرست علائم

Ps	فشار استاتیکی
ρ	چگالی
AD	مساحت گسترش یافته پروانه
AE	مساحت توسعه یافته پروانه
Ao	مساحت دیسک پروانه
D	قطر پروانه
Z	تعداد پره پروانه
KT	ضریب تراست
KQ	ضریب تورک
J	ضریب پیشروی
Ca	عدد کاویتاسیون
PD	توان وارد بر پروانه
PB	توان موتور شناور
η_s	راندمان شفت و گیربکس
n	سرعت دورانی پروانه
T	تراست
Q	تورک
Rn	عدد رینولدز

۷- پیوست

2	-0.204554	1	0	0	0	$\eta_2 = 0.44 + 0.085J + 0.11 \left(\frac{P}{D}\right) - 0.035 \left(\frac{A_E}{A_0}\right) + 0.099J \left(\frac{P}{D}\right) + 0.026J \left(\frac{A_E}{A_0}\right) + 0.023 \left(\frac{P}{D}\right) \left(\frac{A_E}{A_0}\right) + 0.00055(J)^2 - 0.2 \left(\frac{P}{D}\right)^2 + 0.00055 \left(\frac{A_E}{A_0}\right) - 0.029J \left(\frac{P}{D}\right) \left(\frac{A_E}{A_0}\right) + 0.0017J^2 \left(\frac{P}{D}\right) + 0.0032J^2 \left(\frac{A_E}{A_0}\right) - 0.12J \left(\frac{P}{D}\right)^2$												
3	0.166351	0	1	0	0													
4	0.158114	0	2	0	0													
5	-0.147581	2	0	1	0													
6	-0.481497	1	1	1	0													
7	0.415437	0	2	1	0													
8	0.0144043	0	0	0	1													
9	-0.0530054	2	0	0	1													
10	0.0143481	0	1	0	1													
11	0.0606826	1	1	0	1		$\chi_2 = 0.5 - 2.15J + 1.93 \left(\frac{P}{D}\right) + 0.3 \left(\frac{A_E}{A_0}\right) - 2.56J \left(\frac{P}{D}\right) - 0.33J \left(\frac{A_E}{A_0}\right) + 0.21 \left(\frac{P}{D}\right) \left(\frac{A_E}{A_0}\right) + 1.6J^2 + 0.95 \left(\frac{P}{D}\right)^2 - 0.2 \left(\frac{A_E}{A_0}\right)^2$											
12	-0.0125894	0	0	1	1													
13	0.0109689	1	0	1	1													
14	-0.133698	0	3	0	0													
15	0.00638407	0	6	0	0													
16	-0.00132718	2	6	0	0		$Q = \rho n^2 D^5 \left(\frac{V_a}{nD}\right)^c \cdot \left(\frac{\mu}{\rho n D^2}\right)^f \cdot \left(\frac{P_s}{\rho n^2 D^2}\right)^g$											
17	0.168496	3	0	1	0													
18	-0.0507214	0	0	2	0													
19	0.0854559	2	0	2	0													
20	-0.0504475	3	0	2	0													
21	0.010465	1	6	2	0													
22	-0.00648272	2	6	2	0	$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$												
23	-0.00841728	0	3	0	1													
24	0.0168424	1	3	0	1	$T = \rho n^2 D^4 \left(\frac{V_a}{nD}\right)^c \cdot \left(\frac{\mu}{\rho n D^2}\right)^f \cdot \left(\frac{P_s}{\rho n^2 D^2}\right)^g$												
25	-0.00102296	3	3	0	1													
26	-0.0317791	0	3	1	1													
27	0.018604	1	0	2	1													
28	-0.00410798	0	2	2	1													
29	-0.000606848	0	0	0	2													
30	-0.0049819	1	0	0	2													
31	0.0025983	2	0	0	2	$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$												
32	-0.000560528	3	0	0	2													
33	-0.00163652	1	2	0	2	<p>جدول ۳: ضرایب مربوط به چند جمله‌ای‌های K_Q و K_T [۱]</p> <hr/> <p style="text-align: center;">Trust(K_T)</p> <hr/> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">n</th> <th style="width: 40%;">c</th> <th style="width: 10%;">s</th> <th style="width: 10%;">t</th> <th style="width: 10%;">u</th> <th style="width: 10%;">v</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.00880496</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	n	c	s	t	u	v	1	0.00880496	0	0	0	0
n	c	s	t	u	v													
1	0.00880496	0	0	0	0													
34	-0.000328787	1	6	0	2													
35	0.000116502	2	6	0	2													
36	0.000690904	0	0	1	2													

31	-0.00142121	0	6	1	1	37	0.00421749	0	3	1	2
32	-0.00383637	1	0	2	1	38	5.65229E-05	3	6	1	2
33	0.0126803	0	2	2	1	39	-0.00146564	0	3	2	2
34	-0.00318278	2	3	2	1	Torque(Kg)					
35	0.00334268	0	6	2	1	n	C	s	t	u	v
36	-0.00183491	1	1	0	2	1	0.00379368	0	0	0	0
37	0.000112451	3	2	0	2	2	0.00886523	2	0	0	0
38	-0.0000297228	3	6	0	2	3	-0.032241	1	1	0	0
39	0.000269551	1	0	1	2	4	0.00344778	0	2	0	0
40	0.00083265	2	0	1	2	5	-0.0408811	0	1	1	0
41	0.00155334	0	2	1	2	6	-0.108009	1	1	1	0
42	0.000302683	0	6	1	2	7	-0.0885381	2	1	1	0
43	-0.0001843	0	0	2	2	8	0.188561	0	2	1	0
44	-0.000425399	0	3	2	2	9	-0.00370871	1	0	0	1
45	8.69243E-05	3	3	2	2	10	0.00513696	0	1	0	1
46	-0.0004659	0	6	2	2	11	0.0209449	1	1	0	1
47	5.54194E-05	1	6	2	2	12	0.00474319	2	1	0	1
جدول ۴: مشخصات شناور و اطلاعات پروانه قبلی						13	-0.00723408	2	0	1	1
قطر پروانه: ۱۷۵۰ میلیمتر		نام شناور: لایروب خزر				14	0.00438388	1	1	1	1
گام پروانه: ۱۴۷۶ میلیمتر		کشور سازنده: بلژیک				15	-0.0269403	0	2	1	1
نوع پروانه: گام ثابت		سال ساخت: ۱۹۷۴				16	0.0558082	3	0	1	0
سازنده پروانه: آمریکا		کاربری: لایروب مکنده مخزن دار				17	0.0161886	0	3	1	0
تعداد موتور اصلی: ۲		بندر محل استقرار: امیرآباد				18	0.00318086	1	3	1	0
قدرت کلی موتور (hp): ۱۱۵۰		نوع کلاس: 100A1 Hopper Dredger				19	0.015896	0	0	2	0
سرعت دورانی موتور (RPM): ۱۲۲۵		عمق آبخور: ۳/۷۵ متر				20	0.0471729	1	0	2	0
تناژ ناخالص شناور: ۹۴۱ تن		سرعت (Knot): ۱۰/۵				21	0.0196283	3	0	2	0
جدول ۵: محدوده مقادیر پارامترهای طراحی						22	-0.0502782	0	1	2	0
تعداد پره						23	-0.030055	3	1	2	0
نسبت مساحت توسعه یافته (A_E/A_0)		نسبت گام به قطر (P/D)		نسبت مساحت توسعه یافته (A_E/A_0)		24	0.0417122	2	2	2	0
مقدار حداکثر		مقدار حداقل		مقدار حداکثر		25	-0.0397722	0	3	2	0
۰/۶		۰/۴		۰/۳		26	-0.00350024	0	6	2	0
۰/۴		۰/۵		۰/۳		27	-0.0106854	3	0	0	1
جدول ۶: جدول طراحی به روش CCD برای هندسه پروانه شناور لایروب خزر شماره یک						28	0.00110903	3	3	0	1
ردیف		J		P/D		29	-0.000313912	0	6	0	1
		A_E/A_0		η		30	0.0035985	3	0	1	1
		χ									

۱۳	۰/۶	۱/۴	۱/۰۵	۰/۴	۰/۲۸	۱	۰/۶	۱/۴	۰/۳	۰/۴۶۹	۰/۱۴۰۳
۱۴	۰/۵	۱/۴	۰/۸۶	۰/۳۴	۲/۲۹	۲	۰/۴	۱/۴	۰/۳	۰/۳۲۲	۶/۱۱
۱۵	۰/۴	۱/۴	۰/۶۸	۰/۲۷	۱۰/۹۱	۳	۰/۵	۰/۵	۰/۴۹	۰/۴۵۶	۰/۸۰۱۲

جدول ۸: آمار کیفی مدل‌های تخمین زده شده با روش سطح پاسخ

	R^2	$RMSE$	$Prop>F$
η_1	۰/۸۲۵	۰/۱۵	۰/۲
χ_1	۰/۹	۱/۱	۰/۲۸
η_2	۰/۹۲	۰/۲۱	۰/۰۲۴۹
χ_2	۰/۹۷	۲/۱۸۸	۰/۰۴۵۵

جدول ۹: نقاط بهینه طراحی هئدسه پروانه جلوبرنده برای شناور لایروب خزر

J	P/D	A_E/A_0	η	$Thrust(N)$	$Torque(N.m)$	$Desirability$
۰/۴۴	۰/۵	۰/۳	۰/۵۷	۴۴۷۵۱	۱۰۳۴۹	۰/۹۸۴
۰/۶	۱/۲۸	۰/۶۳	۰/۴۵	۳۷۶۵۸	۱۰۹۹۹	۰/۹۳۹
۰/۴۲	۰/۵	۰/۳۴	۰/۵۷	۳۳۰۱۳	۷۶۴۳	۰/۹۲۹
۰/۴	۰/۵	۰/۶۵	۰/۳۹	۳۶۵۳۱	۱۲۳۹۲	۰/۹۲۱
۰/۵۲	۰/۹۹	۰/۶۲	۰/۴۸	۴۷۹۹۱	۱۳۲۴۱	۰/۹۰۴
۰/۵	۰/۵	۰/۶۲	۰/۵	۴۸۵۰۵	۱۳۰۳۶	۰/۹۰۳
۰/۵۸	۱/۱۷	۰/۸۸	۰/۴۵	۴۰۳۱۹	۱۱۹۳۸	۰/۹۹۸
۰/۵۵	۱/۱۶	۰/۷۲	۰/۴۴	۴۹۴۸۰	۱۴۸۶۴	۰/۹۸۹
۰/۵۷	۱/۲۲	۰/۷۵	۰/۴۴	۴۵۸۵۵	۱۳۸۸۳	۰/۹۸۶
۰/۴	۰/۵۷	۰/۶۸	۰/۴۳	۵۳۳۰۹	۱۶۶۴۰	۰/۸۴۴

جدول ۱۰: مقایسه نیروی تراست و تورک محاسبه شده با حل عددی و معادله سری استاندارد بی وگنینگن

استاندارد بی وگنینگن	حل عددی	در صد اختلاف
نیروی تراست (N)	۴۸۵۰۵	۴۱۷۶۸
تورک پروانه ($N.m$)	۱۳۰۳۶	۱۱۰۶۴/۵

۸- مراجع

۱	۰/۶	۱/۴	۰/۳	۰/۴۶۹	۰/۱۴۰۳
۲	۰/۴	۱/۴	۰/۳	۰/۳۲۲	۶/۱۱
۳	۰/۵	۰/۵	۰/۴۹	۰/۴۵۶	۰/۸۰۱۲
۴	۰/۵	۰/۹۵	۰/۶۸	۰/۴۶۹	۰/۲۶۶
۵	۰/۶	۰/۵	۰/۳	۰/۲۱۹	۰/۹۵۵
۶	۰/۴	۰/۵	۰/۳	۰/۵۷۶	۰/۱۴۶۸
۷	۰/۶	۰/۹۵	۰/۴۹	۰/۵۸	۰/۵۹۴
۸	۰/۴	۰/۹۵	۰/۴۹	۰/۴۰۵۷	۲/۹۹
۹	۰/۵	۰/۹۵	۰/۳	۰/۵۲۲۱	۰/۰۶۷
۱۰	۰/۴	۰/۵	۰/۶۸	۰/۳۷۱۳	۰/۰۵۶۴
۱۱	۰/۶	۰/۵	۰/۶۸	.	۰/۹۴۳۴
۱۲	۰/۵	۰/۹۵	۰/۴۹	۰/۴۹۷۷	۰/۱۶۲۵
۱۳	۰/۶	۱/۴	۰/۶۸	۰/۴۲۴۲	۰/۱۳۵۲
۱۴	۰/۵	۱/۴	۰/۴۹	۰/۳۷۰۶	۱/۶۹
۱۵	۰/۴	۱/۴	۰/۶۸	۰/۳۵۴۵	۲/۰۸۴

جدول ۷: جدول طراحی به روش CCD برای هئدسه پروانه شناور لایروب خزر شماره دو

ردیف	J	P/D	A_E/A_0	η	χ
۱	۰/۶	۱/۴	۰/۶۸	۰/۴۲۴	۰/۱
۲	۰/۴	۱/۴	۰/۶۸	۰/۲۸۳	۸/۸۷
۳	۰/۵	۰/۵	۰/۸۶	۰/۱۳	۰/۶۸
۴	۰/۵	۰/۹۵	۰/۶۸	۰/۴۷	۰/۲۲۷
۵	۰/۶	۰/۵	۰/۶۸	.	۰/۹۴۵
۶	۰/۴	۰/۵	۰/۶۸	۰/۳۷	۰/۰۲۳
۷	۰/۶	۰/۹۵	۰/۸۶	۰/۵۲	۰/۵۵
۸	۰/۴	۰/۹۵	۰/۸۶	۰/۳۵	۳/۷۳
۹	۰/۵	۰/۹۵	۰/۶۸	۰/۴۷	۰/۲۲۷
۱۰	۰/۴	۰/۵	۱/۰۵	۰/۱۵۳	۰/۶۹۶
۱۱	۰/۶	۰/۵	۱/۰۵	.	۰/۸۵
۱۲	۰/۵	۰/۹۵	۰/۸۶	۰/۴۴	۰/۳۳

- [1] J. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, USA: Elsevier Ltd., 2007.
- [2] G. Xie, Optimal Preliminary Propeller Design Based on Multi-objective Optimization Approach, *Procedia Engineering*, Vol. 16, pp. 278-283, 2011.
- [3] A. I. Khuri, S. Mukhopadhyay, Response surface methodology, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, Vol. 2, No. 2, pp. 128-149, 2010.
- [4] K. J. Lee, T. Hoshino, J. H. Lee, A lifting surface optimization method for the design of marine propeller blades, *Ocean Engineering*, Vol. 88, pp. 472-479, 2014.
- [5] S. Gaggero, G. Tani, M. Viviani, F. Conti, A study on the numerical prediction of propellers cavitating tip vortex, *Ocean Engineering*, Vol. 92, pp. 137--161, 2014.
- [6] J. Kulczyk, Ł. Skraburski, M. Zawislak, Analysis of screw propeller 4119 using the Fluent system, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2007.
- [7] M. Reishahri, M.S. Seif, Check the performance of propeller in wake for ships using with computational fluid dynamics, *Ninth Marine Industries Conference in Noor-Mazandaran*, 2007. (In Persian)
- [8] M. Hatami, M. Jafaryar, D. D. Ganji, M. Gorji-Bandpy, Optimization of finned-tube heat exchangers for diesel exhaust waste heat recovery using CFD and CCD techniques, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, pp. 254-263, 2014.
- [9] Bin Ji, Xianwu Lu, Xiaoxing Peng, Yulin Wu, Hongyuan Xu, Numerical Analysis of Cavitation Evolution and Excited Pressure Fluctuation Around a Propeller in Non-Uniform Wake, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 43, pp. 13-21, 2012.