



تحلیل عددی عملکرد پروانه در نزدیک سطح آب

عباس ولی¹، بهادر سرانجام²، رضا کمالی³، عطااله ربیعی^{4*}

- 1- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز
 2- دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز
 3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز
 4- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز
 * شیراز، صندوق پستی 7193616548، rabiee@shirazu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 10 آبان 1394
 پذیرش: 29 آذر 1394
 ارائه در سایت: 26 دی 1394

کلید واژگان:

پروانه

نیروی پیش رانش

تهویه

روش حجم سیال

عملکرد پروانه

چکیده

شبیه سازی جریان اطراف پروانه یک مسئله پیچیده سیالاتی می باشد خصوصاً وقتی پروانه در نزدیک سطح آزاد باشد. در این تحقیق، اثر عمق غوطه وری، سرعت پیش روی و پدیده تهویه روی عملکرد یک پروانه سری بی-وگتینگن در نزدیک سطح بصورت عددی بررسی شده است. بدین منظور از نرم افزار تجاری انسیس-فلونت برای حل میدان جریان سیال لزج، تراکم ناپذیر و دوفازی استفاده شده است. چرخش پروانه برای جریان دایمی بوسیله مدل دستگاه مرجع چرخان و برای جریان گذرا توسط شبکه لغزان مدل سازی شده است. برای مدل سازی جریان معشوش و شبیه سازی حرکت سطح آزاد به ترتیب از مدل $k-\omega$ SST و روش حجم سیال استفاده شده است. برای اعتبارسنجی نتایج حل عددی، با توجه به عدم دسترسی به نتایج تجربی پروانه در نزدیک سطح، حل شرایط آب آزاد انجام شده و ضریب های عملکردی پروانه محاسبه شده اند. مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی از تطابق خوبی برخوردار بوده و شبیه سازی عددی را تایید می نماید. نتایج حاصل از حل عددی نشان می دهد که نسبت غوطه وری و پدیده تهویه از عوامل موثر بر عملکرد پروانه می باشند به نحوی که با کاهش نسبت غوطه وری پروانه از 2.2 به 1.4 در نسبت پیش روی 0.4، نسبت ضریب های نیروی پیش-رانش و گشتاور پیچشی به ضریب های عملکرد در شرایط آب آزاد به ترتیب 7.7 و 6 درصد کاهش می یابد.

Numerical Analysis of the propeller performance close to water surface

Abbas Vali¹, Bahador Saranjam¹, Reza Kamali², Ataollah Rabiee^{2*}

1- Department of Naval Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shiraz, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

* P.O.B. 7193616548 Shiraz, Iran, rabiee@shirazu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 01 November 2015
 Accepted 20 December 2015
 Available Online 16 January 2016

Keywords:

Propeller
 Thrust
 Ventilation
 Volume of Fluid Method
 Propeller Performance

ABSTRACT

Simulation of the flow around propeller is a complex fluid flow problem, especially when the propeller is close to free surface. In this study, the effect of immersion depth, advance velocity and the ventilation phenomenon on the performance of a B-Wageningen series propeller close to surface of water have been numerically investigated. For this purpose the ANSYS-FLUENT commercial software has been used to solve the viscous, incompressible and two phase flow field. The rotation of the propeller has been implemented using the rotating reference frame model for steady flow and the sliding mesh for unsteady flow. For turbulent flow modeling and free surface simulation, the $k-\omega$ SST model and the volume of fluid method have been used, respectively. For validation of numerical results due to lack of access to experimental results of propeller close to surface, numerical solution in open water condition has been performed and performance coefficients have been calculated. Comparing the numerical results with the experiment ones shows good agreement and confirms the results of numerical simulation. Results of the numerical solution show that the submergence ratio and ventilation phenomenon affect the performance of propeller so that by reducing submergence ratio from 2.2 to 1.4 in advance ratio $J=0.4$, ratio of thrust and torsional moment coefficients to open water performance coefficients reduced to 7.7% and 6%, respectively.

1- مقدمه

سطحی، پروانه می تواند در فواصل مختلف از سطح آب قرارگیرد. در صورت کارکرد پروانه روی سطح (پروانه نیمه مغروق) و یا در نزدیکی سطح، ضریب پیش رانش $(K_T = T/\rho n^2 D^4)$ و گشتاور پیچشی $(K_Q = Q/\rho n^2 D^5)$ و در نتیجه راندمان پروانه نسبت به شرایط آب آزاد¹ تغییر می کنند، لذا لازم

لازمه حرکت یک شناور در یک سرعت معین، اعمال نیرویی می باشد که بر مقاومت هیدرودینامیکی سیال آب غلبه کند. این نیرو به وسیله سیستم پیش رانش شناور تولید می شود. متداول ترین سیستم پیش برنده دریایی، سیستم پروانه ای است. براساس نوع و رژیم حرکتی شناورهای سطحی و زیر

1- Open Water

Please cite this article using:

A. Vali, B. Saranjam, R. Kamali, A. Rabiee, Numerical Analysis of the propeller performance close to water surface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 291-299, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جهت درک بهتر از پدیده تهویه و بررسی تاثیر آن بر نیروی پیش‌رانش پروانه، کوشان [7] در سال 2006 اقدام به یک سری آزمایش بر روی یک پروانه در وضعیت‌های متفاوت قرارگیری نسبت به سطح آب نمود. نتایج حاصل از این تحقیق مورد استفاده بعضی از محققین قرار گرفت، از جمله کالیفانو و استین [8] در سال 2009 با تحلیل عددی مکانیزم تهویه پروانه‌های مورد آزمایش کوشان را بوسیله نرم‌افزار فلونتت بررسی کردند. آنان برای شبیه‌سازی عددی از مدل جریان آرام، غیرقابل تراکم و دوفازی و جهت مدل نمودن چرخش پروانه از هر دو روش دستگاه مرجع چرخان⁵ و شبکه‌های لغزان⁶ استفاده نمودند. از نتایج این تحقیق می‌توان به بارهای اعمالی بر روی تیغه‌های پروانه در حین وقوع پدیده تهویه (در نسبت غوطه‌وری $(h/R) = 1.4$ و نسبت پیش‌روی $(J = u/n \cdot D = 0.1)$) اشاره نمود.

به علت پیچیدگی حل میدان جریان حول پروانه در نزدیک سطح اغلب تحلیل‌های عددی انجام شده با در نظر گرفتن فرضیاتی جهت ساده‌سازی همراه بوده و بخش محدودی از عملکرد پروانه را شامل می‌شود.

مطالعه فعالیت‌های در دسترس موجود نشان می‌دهد که فعالیت‌های کمی بویژه در حوزه شبیه‌سازی عددی با توجه به تاثیرات عمق غوطه‌وری پروانه در نزدیکی سطح آزاد مایع صورت پذیرفته است. لذا در این تحقیق بررسی تاثیر نسبت‌های غوطه‌وری متفاوت بر عملکرد پروانه در نزدیک سطح با در نظر گرفتن اثر آشفتگی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر آن مشخصه‌های عملکردی پروانه در نسبت پیش‌روی متفاوت برای یک نسبت غوطه‌وری در نزدیکی سطح بررسی شده و تاثیر پدیده تهویه ناشی از افزایش سرعت چرخش پروانه بر روی ضریب‌های عملکرد پروانه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور مدل‌سازی عددی از مدل جریان مغشوش، غیرقابل تراکم و دوفازی استفاده شده و حل میدان جریان با استفاده از کد محاسباتی در دسترس موجود، نرم‌افزار انسیس - فلونتت انجام شده است.

2- معادلات حاکم و روش عددی

با در نظر گرفتن شرایط حاکم بر جریان سیال، معادلات ناویر-استوکس طبق رابطه (1) قابل ارایه می‌شود:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (1)$$

در این معادلات u مولفه سرعت، p فشار، ρ چگالی، μ لزجت و g_i مولفه گرانش می‌باشد.

لازم به ذکر است که در مرجع [2] اثر نوع مدل آشفتگی بر دقت محاسبه ضریب عملکرد پروانه بررسی شده است. مقایسه نتایج حاصله با نتایج تجربی، نشان دهنده برتری مدل $k - \omega$ نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی بوده است. علاوه بر آن با توجه به قابلیت این مدل در حل مسایل چند فازی [9] در این تحقیق برای حل مسئله از این مدل استفاده شده است. این مدل جریان آشفته براساس دو مفهوم انرژی جنبشی جریان آشفته⁷ (k) و نرخ اتلاف ویژه⁸ (ω) می‌باشد که معادلات آن طبق روابط (2) و (3) ارایه می‌شوند [10].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \bar{G}_k - Y_K + S_K \quad (2)$$

است در طراحی و انتخاب پروانه، تغییر ضریب‌های عملکردی (ضریب‌های پیش‌رانش و گشتاور پیچشی) در شرایط کارکرد در نزدیک سطح در نظر گرفته شوند.

مدل‌سازی جریان اطراف پروانه در شرایط آب آزاد به علت پیچیده بودن هندسه شبکه بندی دامنه حل و طولانی بودن زمان حل معادلات حاکم، از مسایل پیچیده سیالاتی می‌باشد. در صورت مدل‌سازی جریان اطراف پروانه در نزدیک سطح با توجه به لزوم در نظر گرفتن مدل دو فازی جریان، حل میدان جریان از پیچیدگی بیشتری برخوردار می‌شود.

تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با مدل‌سازی جریان اطراف پروانه صورت گرفته است [2,1]. در مرجع [1] با استفاده از نرم‌افزار انسیس - فلونتت¹ جریان حول دو پروانه دریایی چهار پره‌ای و پنج پره‌ای در حالت کاویتاسیون دائمی و گذرا شبیه‌سازی شده است. برای این منظور جریان یکنواخت و جریان ویک² به عنوان ورودی دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده و ضریب‌های پیش‌رانش و گشتاور پیچشی محاسبه شده است. دقت مناسب نتایج محاسباتی در مقایسه با نتایج تجربی نشان می‌دهد که از روش به کارگرفته شده در این مرجع، می‌توان برای شبیه‌سازی رفتار جریان در انواع پروانه‌ها استفاده نمود.

در مرجع [2] تحلیل عددی یک نمونه پروانه سری بی - وگنینگ³ در شرایط آب آزاد به وسیله نرم‌افزار فلونتت شرح داده شده و همچنین اثر تراکم شبکه، نوع مدل آشفتگی و الگوریتم حل عددی بر روی دقت ضریب‌های عملکردی محاسباتی در مقایسه با نتایج تجربی بررسی شده است. از نتایج ارایه شده در این مرجع، می‌توان در شبیه‌سازی عددی، شبکه‌بندی میدان جریان، انتخاب مدل آشفتگی پروانه‌ها استفاده نمود.

یکی از پدیده‌هایی که می‌تواند در حین کارکرد پروانه در نزدیک سطح بوجود آید پدیده تهویه⁴ ناشی از مکش هوا توسط پروانه می‌باشد. این پدیده در اثر تماس سطح تیغه‌های پروانه با اتمسفر و یا ایجاد حفره متصل کننده هوا از بالای سطح به پروانه در اثر کارکرد پروانه در نزدیک سطح ایجاد می‌شود. وقوع این پدیده بر همگرایی و در نتیجه پیچیدگی حل جریان می‌افزاید و همچنین به علت عدم پایداری و تغییرات ناگهانی در نیروی پیش‌رانش و گشتاور پیچشی و در نتیجه افزایش ناگهانی سرعت دورانی باعث آسیب جدی قطعات مکانیکی و اجزای موتور می‌شود.

در چند دهه اخیر، محققان زیادی پدیده تهویه در پروانه‌ها را بصورت تجربی و تحلیل عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. اغلب این تحقیقات در جهت شناخت بهتر مکانیزم تهویه و بررسی تاثیر این پدیده بر عملکرد پروانه‌ها متمرکز بوده است. فال‌تینسن [3] در سال 1981 نتایج حاصل از اثر تهویه پروانه بر روی متوسط مقادیر نیروی پیش‌رانش و گشتاور پیچشی در حین عملکرد بر روی امواج را ارایه نمود.

یانگ و کیناس [4] در سال 2004 با استفاده از روش المان مرزی و کاپوننتو [5] با استفاده از متوسط‌گیری معادلات ناویر-استوکس در سال 2003 نتایج حاصل از محاسبه بارهای دینامیکی اعمالی بر پروانه‌های نیمه مغروقی که توسط الوفسون [6] در سال 1996 مورد آزمایش قرار گرفته شده بود را ارایه نمودند، مقایسه نتایج محاسباتی با نتایج تجربی نشان دهنده تطابق خوب داده‌های محاسباتی با تجربی می‌باشد.

5- Rotating Reference Frame
6- Sliding Mesh
7- Turbulence Kinetic Energy
8- Specific dissipation rate

1- Ansys-Fluent
2- Wake
3- B-Wageningen
4- Ventilation

تنظیمات اصلی انجام شده نرم‌افزار فلوئنت نشان داده شده است.

3- مشخصات هندسی و شرایط مرزی

در این تحقیق، مدل پروانه‌ای از سری استاندارد ب- وگنینگن استفاده شده که مشخصات هندسی آن در جدول 2 آورده شده است.

برای حل عددی جریان اطراف پروانه ابتدا ابعاد دامنه محاسباتی انتخاب شده است. این ابعاد طوری انتخاب شده که در کنار ارضای مرزهای بی‌نهایت، زمان محاسباتی کمتری داشته باشد. دامنه محاسباتی از دو ناحیه متحرک و ساکن تشکیل شده است. در شکل 1 ابعاد دامنه محاسباتی برحسب قطر پروانه (D) و همچنین شرایط مرزی نشان داده شده است.

یکی از مهم‌ترین بخش‌های تحلیل عددی تعیین شرایط مرزی است. با توجه به شرایط مسأله مورد نظر، مرز ورودی ناحیه حل از دو قسمت مجزای ورودی آب و هوا تشکیل شده است که به طور جداگانه تعریف شده‌اند. به همین دلیل از همان ابتدا صفحه ورودی به وسیله صفحه آب‌خور به دو بخش تقسیم شده، بخش بالایی صفحه آب‌خور ورودی هوا و بخش پایینی، ورودی آب در نظر گرفته شده است.

برای شرط مرزی این دو بخش در مرز ورودی شرط سرعت یکنواخت u روی سطح تیغه‌ها و تویی⁴ شرط عدم لغزش (سرعت صفر)، در مرزهای جانبی شرط مرزی لغزش و در مرز خروجی شرط مرزی فشار خروجی در نظر گرفته شده است.

4- شبکه بندی دامنه محاسباتی

در مطالعه حاضر برای تولید مدل هندسی پروانه از نرم‌افزار کتیا⁵ استفاده شده و سپس شبکه‌بندی بر روی مدل توسط نرم‌افزار گمبیت⁶ انجام شده است. به دلیل پیچیدگی هندسه پروانه در ناحیه متحرک دامنه محاسباتی از شبکه‌بندی سازمان نیافته با سلول‌های چهار وجهی تتراهدراال به‌نحوی

جدول 1 تنظیمات اصلی مورد استفاده در نرم‌افزار فلوئنت

Table 1 Basic settings used in Fluent software

عنوان	روش انتخابی
حل گر	ضمنی، مجزا
کوپل میدان سرعت - فشار	سیمپل ⁷
مدل توربولانسی	SST $k - \omega$
روش دو فاز	حجم سیال
روش گسسته سازی	
فشار	نیروی کالبدی وزین ⁸
تکانه	بالادست مرتبه دوم
نسبت حجمی	بالا دست مرتبه دوم
انرژی جنبشی آشفتگی	بالادست مرتبه اول

جدول 2 مشخصات هندسی پروانه

Table 2 Geometric characteristics of propeller

تعداد تیغه	قطر (m)	$\frac{A_E}{A_0}$	$\frac{P}{D}$	$\frac{D_{hub}}{D}$	ریک ⁹ (درجه)	اسکیو ¹⁰ (درجه)
5	0.25	0.5	0.8	0.167	15	11.8

4- Hub
5- Catia
6- Gambit
7- Simple
8- Body Force Weighted
9- Rake
10- Skew

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (3)$$

در این روابط Γ_k و G_ω نشان دهنده ترم تولید در معادلات k و ω ، Γ_k و Γ_ω نشان دهنده پخش موثر k و ω و Y_k و Y_ω اتلاف ناشی از جریان آشفته، D_ω نشان دهنده پارامتر پخش عرضی¹ و S_k و S_ω ترم‌های چشمه تعریف شده توسط کاربر می‌باشند.

با توجه به لزوم در نظر گرفتن تأثیر هم زمان جریان آب در زیر سطح آزاد و جریان هوا در بالای آن از روش حجم سیال² (VOF) که توسط هیرت و نیکولز [11] در سال 1981 ارائه شده برای مدل‌سازی جریان دو فازی استفاده شده است. در روش حجم سیال، در محل تماس دو فاز، معادله پیوستگی نسبت حجمی³ برای یک فاز یا هر دو فاز حل می‌شود. اگر تعداد فازها q باشد این معادله عبارت است از:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{aq} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (4)$$

به طوری که \dot{m}_{pq} دبی جرم انتقال یافته از فاز p به فاز q و \dot{m}_{qp} دبی جرم انتقال یافته از فاز q به فاز p می‌باشد. S_{aq} نیز ترم چشمه می‌باشد که در این تحقیق مقدار آن صفر است. α_q بیانگر درصد حجمی در یک سلول از فاز q و \vec{v}_q بردار سرعت فاز q می‌باشد. معادله درصد حجمی برای فاز اولیه قابل حل نخواهد بود. لذا درصد حجمی فاز اولیه براساس رابطه (5) بدست می‌آید.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (5)$$

معادله نسبت حجمی می‌تواند به هر دو روش ضمنی و صریح حل شود که در این تحقیق به روش ضمنی حل شده است.

برای مدل‌سازی حرکت چرخشی در مدل‌سازی ناحیه دوار و وارد کردن اثرات شتاب کوریولیس در معادلات حاکم از روش دستگاه مرجع چرخان و روش شبکه‌های لغزان موجود در نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است [12]. زمانیکه معادلات حرکت برای حالت دستگاه مرجع در حالت چرخش حل می‌شود، جمله شتاب در معادلات تکانه ظاهر می‌شود. نرم‌افزار فلوئنت مسائل دستگاه مرجع چرخان را با در نظر گرفتن سرعت مطلق u و سرعت نسبی u_r که وابسته به هم هستند مدل می‌کند (رابطه 6).

$$\vec{u}_r = \vec{u} - \vec{\Omega} \times \vec{r} \quad (6)$$

در این رابطه $\vec{\Omega}$ بردار سرعت زاویه‌ای و \vec{r} بردار موقعیت در دستگاه چرخشی است. سمت چپ معادلات تکانه در رابطه (7) آورده شده است

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \vec{u}) + \vec{\nabla}(\rho \cdot \vec{u} \cdot \vec{u}) \quad (7)$$

برای یک دستگاه چرخان، با اعمال سرعت نسبی رابطه (8) بدست می‌آید.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \vec{u}_r) + \vec{\nabla}(\rho \cdot \vec{u}_r \cdot \vec{u}_r) + \rho \vec{\Omega} \times (2\vec{u}_r + \vec{\Omega} \times \vec{r}) + \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} \times \vec{r} \quad (8)$$

جهت تحلیل جریان حول پروانه لازم است تنظیماتی برای نرم‌افزار فلوئنت در نظر گرفته شود. برای این منظور برای تحلیل پروانه در نزدیک سطح از تنظیمات ارائه شده در مرجع [8] استفاده شده است. در جدول 1

1- Cross- diffusion
2- Volume of Fluid
3- Volume Fraction

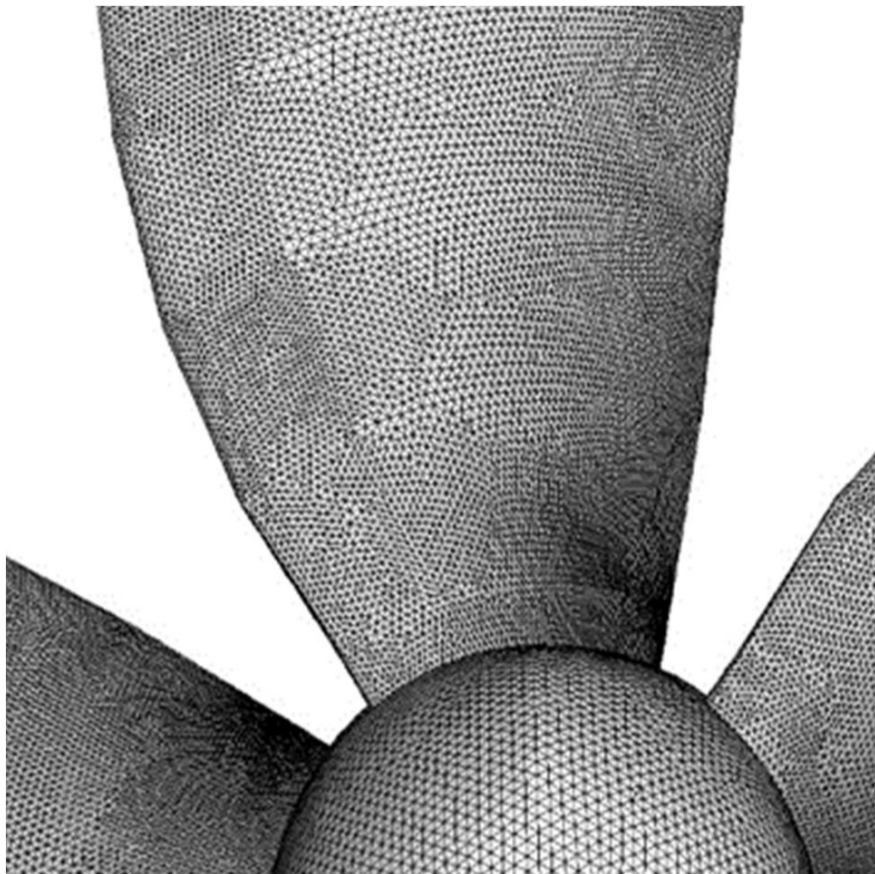


Fig. 2 A view of the grid generation on the propeller surface

شکل 2 نمایی از شبکه ایجاد شده بر روی سطح پروانه

برای بررسی استقلال شبکه، با تحلیل عددی در نسبت پیشروی 0.4 و سرعت چرخشی 60 rad/s میدان جریان حول پروانه در چند حالت شبکه بندی حل شده، و به مقایسه نسبت ضریب های عملکرد محاسباتی به تجربی پرداخته شده است.

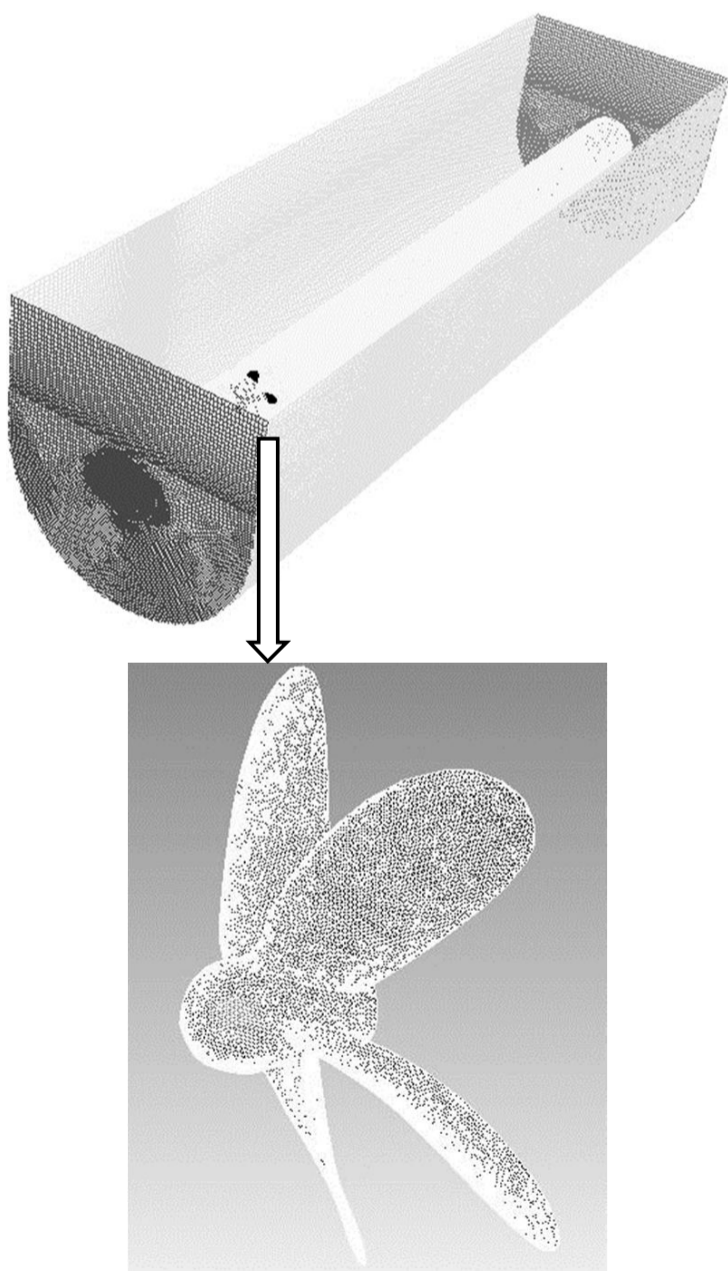
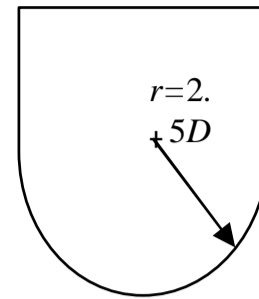


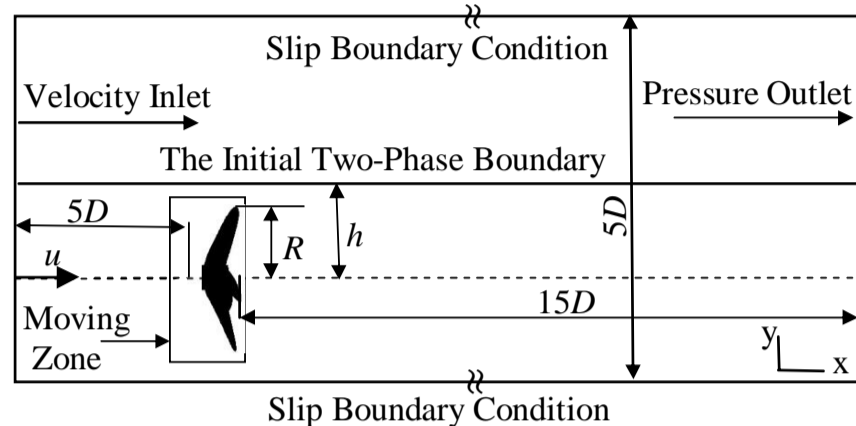
Fig. 3 Grid generation of propeller computational domain

شکل 3 شبکه بندی دامنه محاسباتی پروانه



a)

(الف)



b)

(ب)

Fig. 1 The size of the computational domain and boundary conditions; a) Lateral Cross Section View, b) Longitudinal Section View

شکل 1 ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی؛ الف) نمای مقطع عرضی، ب) نمای مقطع طولی

استفاده شده است، که شبکه سطح تیغه های پروانه ها از سلول های مثلثی تشکیل شده است [12].

از موارد مهمی که در تحلیل عددی باید به آن توجه نمود، اندازه شبکه های تولید شده می باشد. اندازه شبکه در نتایج تحلیل بسیار تأثیرگذار است، درشت بودن شبکه سبب خطا در تحلیل می گردد. لذا بهتر است سایز شبکه ها تا حد امکان ریز باشد. اما با افزایش تعداد شبکه ها، حجم محاسبات زیاد و در نتیجه زمان محاسبات زیاد می شود. از طرفی باید اندازه شبکه ها به گونه ای باشد که با افزایش تعداد شبکه ها تغییر زیادی در نتایج ایجاد نگردد. نکته ای دیگری که در هنگام استفاده از شبکه بندی سازمان نیافته باید رعایت کرد نسبت منطقی سلول است، به طوری که می تواند در نهایت بر کیفیت کلی شبکه تولید شده و حتی نرخ همگرایی تأثیر گذار باشد.

با توجه به نکات ذکر شده شبکه بندی سطح تیغه های پروانه به نحوی انجام شده که ناحیه نزدیک نوک، ریشه تیغه ها و لبه های تیغه با مثلث های کوچکتری با طول ضلع تقریبی 0.0025 قطر پروانه شبکه بندی شده است [12]. نواحی داخلی روی تیغه با مثلث های بزرگتری شبکه بندی شده به طوری که اندازه ضلع های آن به تدریج و با نسبت رشد 1.1 افزایش یافته است شکل 2 قسمتی از شبکه تولید شده در سطح پروانه را نشان می دهد.

اگر از شبکه بندی سازمان نیافته برای کل دامنه حل استفاده شود، تعداد شبکه ها بالا رفته، زمان محاسباتی نیز افزایش می یابد؛ بنابراین برای کاهش تعداد سلول ها در ناحیه ساکن از شبکه سازمان یافته با المان های مکعبی هگزاهدرا استفاده شده است.

شکل 3 شبکه بندی دامنه محاسباتی را برای مدل پروانه نمایش می دهد. تعداد کل سلول های ناحیه حل 2865732 می باشد که تعداد سلول های قسمت متحرک 967366 و مابقی آن برای قسمت ثابت در نظر گرفته شده است. در حالت حل گذرا گام زمانی مناسب جهت همگرایی 0.0004 به کار برده شده است.

شده در بعضی از گزارشات به کمتر بودن نتایج محاسباتی نسبت به مقدار داده‌های تجربی در تمام محدوده نسبت پیش‌روی (بالتن و واپری در سال 2005 [13]، ریو و جوشی سال 2006 [14] و برجیچ و جانسون سال 2008 [15]) و در بعضی از مستندات به بیشتر بودن نتایج حاصل از محاسبات نسبت به داده‌های تجربی اشاره شده است [8].

با بررسی ضریب‌های محاسباتی ارائه شده در جدول 4 و 5 می‌توان بیان نمود که بیشترین خطای ضریب‌های پیش‌رانش و گشتاور پیچشی در کمترین بار پروانه ($J=0.8$) می‌باشد و همچنین ملاحظه می‌شود که مدل چرخشی شبکه لغزان در محاسبه ضریب‌های گشتاور پیچشی دارای خطای کمتری نسبت به دستگاه مرجع چرخان بوده اما در محاسبه ضریب نیروی پیش‌رانش در نسبت‌های پیش‌روی کمتر از 0.5 دارای خطای بیشتری نسبت به دستگاه مرجع چرخان می‌باشد.

در جدول 6 راندمان حاصل از روش‌های عددی با استفاده از دستگاه مرجع چرخان و شبکه لغزان جهت مقایسه با مقادیر تجربی ارائه شده است. مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که راندمان پروانه در نسبت‌های پیش‌روی 0.2 الی 0.7 دارای خطای کمتری نسبت به مدل شبکه لغزان می‌باشد.

با وجود دقت مناسب این مدل برای محاسبه ضریب‌های پیش‌رانش و راندمان در محدوده‌ای از نسبت پیش‌روی، باید به این نکته توجه داشت که این مدل در حل جریان شبه دائمی کاربرد دارد و در حل جریان گذرا لازم است از مدل چرخشی شبکه لغزان استفاده شود [8].

در شکل 4 منحنی نتایج بدست آمده جهت نشان دادن نحوه تغییرات ضریب‌های عملکرد پروانه براساس نتایج محاسباتی حاصل از مدل‌های دستگاه مرجع چرخان و شبکه لغزان و نتایج تجربی ارائه شده است.

جدول 4 مقایسه ضریب پیش‌رانش حاصل از روش‌های عددی با نتایج تجربی

Table 4 Comparison of thrust coefficient for numerical methods with experimental results

J	K_T	K_T		$\% \Delta$
		نتایج تجربی [16]	دستگاه مرجع چرخان	
	شبکه لغزان	شبکه لغزان	شبکه لغزان	
0.1	0.323	0.296	0.296	8.36
0.2	0.290	0.270	0.270	6.9
0.3	0.256	0.241	0.241	5.86
0.4	0.220	0.207	0.207	5.90
0.5	0.185	0.170	0.170	8.11
0.6	0.146	0.130	0.130	10.96
0.7	0.100	0.083	0.083	17.00
0.8	0.047	0.034	0.034	27.66

جدول 5 مقایسه ضریب گشتاور پیچشی حاصل از روش‌های عددی با نتایج تجربی

Table 5 Comparison of torsional moment coefficient for numerical methods with experimental results

J	K_Q	K_Q		$\% \Delta$
		نتایج تجربی [16]	دستگاه مرجع چرخان	
	شبکه لغزان	شبکه لغزان	شبکه لغزان	
0.1	0.0368	0.0355	0.0355	3.53
0.2	0.0345	0.0334	0.0334	3.19
0.3	0.0320	0.0310	0.0310	3.13
0.4	0.0282	0.0279	0.0279	1.06
0.5	0.0241	0.0244	0.0244	1.24
0.6	0.0200	0.0204	0.0204	2.00
0.7	0.0144	0.0155	0.0155	7.64
0.8	0.0080	0.0100	0.0100	25.00

جدول 3 نسبت ضریب‌های عملکرد محاسباتی به تجربی برحسب تعداد سلول‌ها
Table 3 Ratio of computed performance coefficients to experimental in terms of the number of cells

شبکه	تعداد سلول	نسبت نیروی پیش‌رانش محاسباتی به تجربی	نسبت گشتاور پیچشی محاسباتی به تجربی
1	1846532	0.893	0.948
2	2310040	0.914	0.975
3	2865732	0.932	0.992
4	3453234	0.937	0.995

نتایج این بررسی در جدول 3 آورده شده، با توجه به این نکته که افزایش تعداد سلول‌ها باعث افزایش زمان محاسباتی می‌شود بنابراین با توجه به خطای ناچیز شبکه 3 و 4 نسبت به دیگر شبکه‌ها و همچنین تعداد سلول کمتر شبکه 3 از این شبکه جهت حل میدان جریان دوفازی حول پروانه استفاده شده است.

در این تحقیق میزان بیشینه y^+ در نزدیک سطح پروانه در شبکه انتخاب شده، 124 می‌باشد. با توجه به مدل آشفتگی انتخاب شده، تغییرات y^+ در محدوده مناسب بوده و شبکه انتخابی دارای کیفیت لازم در محدوده لایه مرزی ایجاد شده، می‌باشد.

5- ارزیابی نتایج و بحث

5-1- بررسی صحت حل عددی با شبیه سازی جریان اطراف پروانه در شرایط آب آزاد

در این تحقیق با توجه به عدم دسترسی به نتایج تجربی پروانه در نظر گرفته شده در نزدیک سطح، به بررسی صحت حل عددی با استفاده از مدل‌های چرخشی دستگاه مرجع چرخان در حالت دائمی جریان و شبکه لغزان در حالت گذرا در شرایط آب آزاد پرداخته شده که نتایج مذکور جهت بررسی مناسب بودن شبکه بندی انتخاب شده و همچنین در نحوه تحلیل عددی قابل کاربرد می‌باشد.

برای حل میدان جریان با استفاده از روش شبکه لغزان به علت چرخش تناوبی پروانه، کمیت‌های مختلف توابعی از زمان خواهند بود لذا جهت تعیین کمیت‌های مورد نیاز لازم است میانگین کمیت‌ها در گام‌های زمانی مناسب محاسبه شود. نتایج ارائه شده در این تحقیق بر مبنای روش شبکه لغزان در واقع میانگین زمانی کمیت‌ها می‌باشد.

در این مطالعه با استفاده از تحلیل عددی ضریب‌های پیش‌رانش، گشتاور پیچشی و راندمان پروانه ($\eta = J \cdot K_T / (2\pi \cdot K_Q)$) برحسب نسبت پیش‌روی در سرعت چرخشی ثابت پروانه ($n = 60 \text{ rad/s}$) جهت مقایسه با داده‌های تجربی محاسبه شده و نتایج این بررسی به ترتیب در جداول 4 و 5 و 6 و همچنین شکل 4 آورده شده، بررسی درصد خطای نسبی نتایج محاسباتی ($\% \Delta$) نشان دهنده دقت مناسب نتایج حاصل از حل عددی انجام شده می‌باشد.

همان‌طور که از جدول 4 ملاحظه می‌شود، در تمام محدوده نسبت پیش‌روی، مقدار ضریب پیش‌رانش محاسباتی کمتر از داده‌های تجربی می‌باشد. با توجه به ضریب‌های گشتاور پیچشی درج شده در جدول 5 مشخص گردید که در نسبت پیش‌روی پایین، مقدار ضریب‌های گشتاور پیچشی محاسباتی کمتر از داده‌های تجربی می‌باشد. با افزایش نسبت پیش‌روی (از نسبت پیش‌روی 0.5 برای مدل چرخشی دستگاه مرجع چرخان و 0.6 برای شبکه لغزان) ضریب‌های محاسباتی بیش از نتایج تجربی می‌گردد. گزارشات متعددی در مورد خطای محاسباتی ضریب گشتاور پیچشی ارائه

جدول 7 نسبت ضریب‌های عملکرد پروانه به ضریب‌های عملکرد در شرایط آب آزاد به ازای نسبت غوطه‌وری

Table 7 Ratio of Propeller performance coefficients in terms of submergence ratio

$\frac{K_Q}{K_{Q0}}$	$\frac{K_T}{K_{T0}}$	$\frac{h}{R}$
0.920	0.873	1.4
0.950	0.910	1.6
0.962	0.930	1.8
0.969	0.939	2.0
0.980	0.950	2.2

کاسته می‌شود.

با توجه به درصد ضریب‌های پیش‌رانش و گشتاور پیچشی ناشی از لزجت نسبت به ضریب‌های عملکرد پروانه مندرج در جدول 8، مشاهده می‌شود که حداکثر تاثیر لزجت بر ضریب گشتاور پیچشی و پیش‌رانش به ترتیب 8.8 و 1.6 درصد می‌باشد و به ازای تغییر نسبت غوطه‌وری این ضریب‌ها تقریباً ثابت می‌باشند.

با توجه به ضریب‌های عملکرد بدست آمده، نسبت بازده محاسباتی پروانه به بازده محاسباتی در شرایط آب آزاد برحسب نسبت غوطه‌وری طبق شکل 6 قابل ارائه می‌باشد. با توجه به شکل، ملاحظه می‌شود که کاهش عمق غوطه‌وری باعث کاهش بازده پروانه نسبت به شرایط آب آزاد می‌شود.

جهت بررسی موج‌سازی پروانه در نزدیک سطح، نمای امواج تولیدی توسط پروانه در نسبت‌های غوطه‌وری در نظر گرفته شده در شکل 7 ارایه

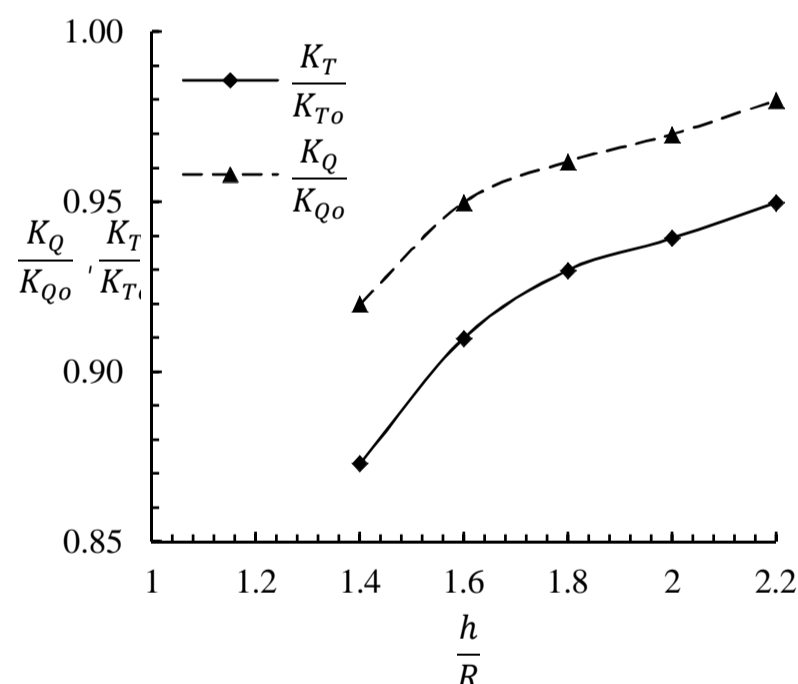


Fig. 5 Ratio of Propeller performance coefficients changes to open water performance coefficients in terms of submergence ratio

شکل 5 تغییرات نسبت ضریب‌های عملکرد پروانه به ضریب‌های عملکرد آب آزاد بر حسب نسبت غوطه‌وری

جدول 8 درصد ضریب‌های لزجت نسبت به ضریب‌های عملکرد به ازای نسبت غوطه‌وری پروانه

Table 8 percent of coefficient viscosity to performance coefficients in terms of propeller submergence ratio

$\% \frac{K_{Qv}}{K_Q}$	$\% \frac{K_{Tv}}{K_T}$	$\frac{h}{R}$
8.8	1.6	1.4
8.7	1.5	1.6
8.5	1.4	1.8
8.4	1.4	2.0
8.1	1.4	2.2

جدول 6 مقایسه راندمان حاصل از روش‌های عددی با نتایج تجربی

Table 6 Comparison of the efficiency for numerical methods with experimental results

$\% \Delta$	η	$\% \Delta$	η	η	J
شبهه لغزان	شبهه لغزان	دستگاه مرجع چرخان	دستگاه مرجع چرخان	نتایج تجربی [16]	
4.36	0.1273	8.77	0.1327	0.1220	0.1
3.60	0.2410	2.93	0.2573	0.2500	0.2
3.93	0.3506	1.70	0.3712	0.3650	0.3
0.95	0.4655	0.50	0.4723	0.4700	0.4
1.38	0.5637	0.28	0.5544	0.5560	0.5
3.63	0.6446	2.16	0.6085	0.6220	0.6
6.10	0.6536	3.15	0.5966	0.6160	0.7
6.40	0.5384	14.44	0.4329	0.5060	0.8

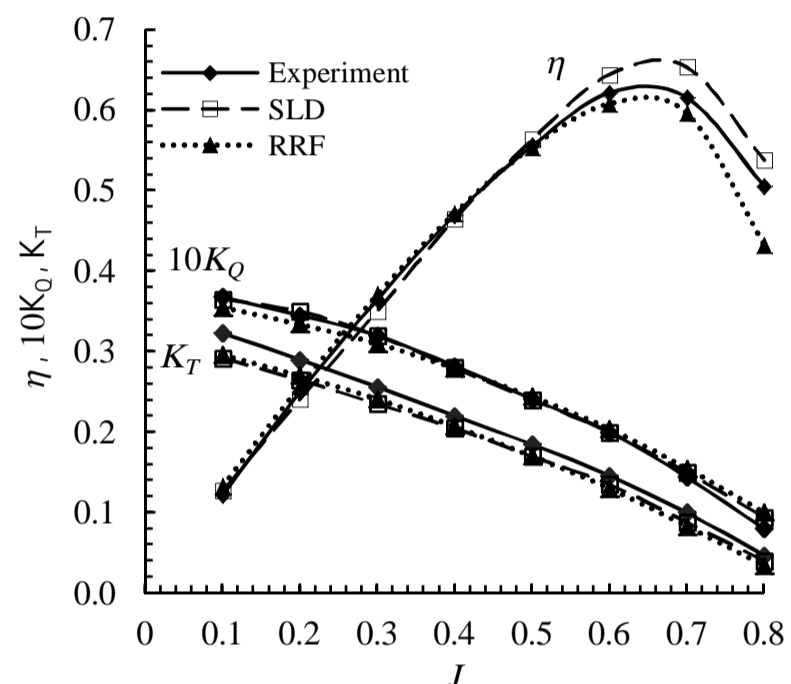


Fig. 4 Comparison of performance and efficiency curves of propeller in open water condition

شکل 4 مقایسه منحنی‌های عملکردی و راندمان پروانه در شرایط آب آزاد

5-2- بررسی تاثیر عمق غوطه‌وری بر عملکرد پروانه

در این بخش اثر عمق غوطه‌وری بر ضریب‌های عملکرد پروانه مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور حل عددی جریان حول پروانه در نسبت پیش‌روی 0.4 و نسبت‌های غوطه‌وری 1.4، 1.6، 1.8، 2 و 2.2 انجام شده است. با توجه به حل جریان در حالت گذرا، جهت مدل نمودن چرخش پروانه از شبکه لغزان در سرعت چرخشی ثابت ($n = 60 \text{ rad/s}$) استفاده شده است. نتایج حاصل از حل جریان شامل، نسبت ضریب‌های عملکرد پروانه به ضریب‌های مربوطه در شرایط آب آزاد (K_Q/K_{Q0} و K_T/K_{T0}) و در صد ضریب‌های پیش‌رانش و گشتاور پیچشی ناشی از لزجت نسبت به ضریب‌های عملکرد پروانه (K_{Qv}/K_Q و K_{Tv}/K_T) برحسب نسبت‌های غوطه‌وری پروانه به ترتیب در جدول‌های 7 و 8 ارایه شده است. با توجه به نتایج مندرج در جدول 7 مشاهده می‌گردد که با کاهش نسبت غوطه‌وری پروانه از 2.2 به 1.4، ضریب پیش‌رانش 7.7 درصد و ضریب گشتاور پیچشی پروانه 6 درصد نسبت به ضریب‌های عملکرد در شرایط آب آزاد کاهش یافته است.

جهت مشخص نمودن نحوه تغییرات ضریب‌های نسبی، منحنی ضریب‌ها در شکل 5 ارایه شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که با کاهش نسبت غوطه‌وری از ضریب‌های عملکرد پروانه نسبت به شرایط آب آزاد کاسته شده به نحوی که در نسبت غوطه‌وری 1.4 با توجه به تحلیل عددی انجام شده به میزان 12.7 درصد از نیروی پیش‌رانش پروانه در شرایط آب آزاد

در شکل‌های 8 و 9 منحنی‌های ضریب‌های گشتاور پیچشی، نیروی پیش‌رانش و همچنین راندمان پروانه حاصل از تحلیل عددی در نسبت غوطه‌وری 1.4 و در شرایط آب آزاد جهت مقایسه ارائه شده است.

با توجه به شکل 8 ملاحظه می‌شود که ضریب‌های عملکرد پروانه در کنار سطح به ازای نسبت‌های پیش‌روی متفاوت، کمتر از ضریب‌های عملکرد در شرایط آب آزاد می‌باشد. براساس تحلیل انجام شده میزان درصد کاهش ضریب گشتاور پیچشی و نیروی پیش‌رانش نسبت به شرایط آب آزاد به ترتیب از 4.4 تا 7.5 و 2.3 تا 8.4 درصد تغییر می‌کند، از طرفی معلوم است که نحوه تغییرات منحنی ضریب‌های گشتاور پیچشی و نیروی پیش‌رانش یکسان بوده و از یک دیگر تبعیت می‌کند.

در یک مقایسه دیگر در شکل 9 نمودار راندمان پروانه در نسبت غوطه‌وری 1.4 و شرایط آب آزاد برحسب نسبت پیش‌روی ارائه شده، همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نسبت پیش‌روی کمتر از 0.4 کاهش

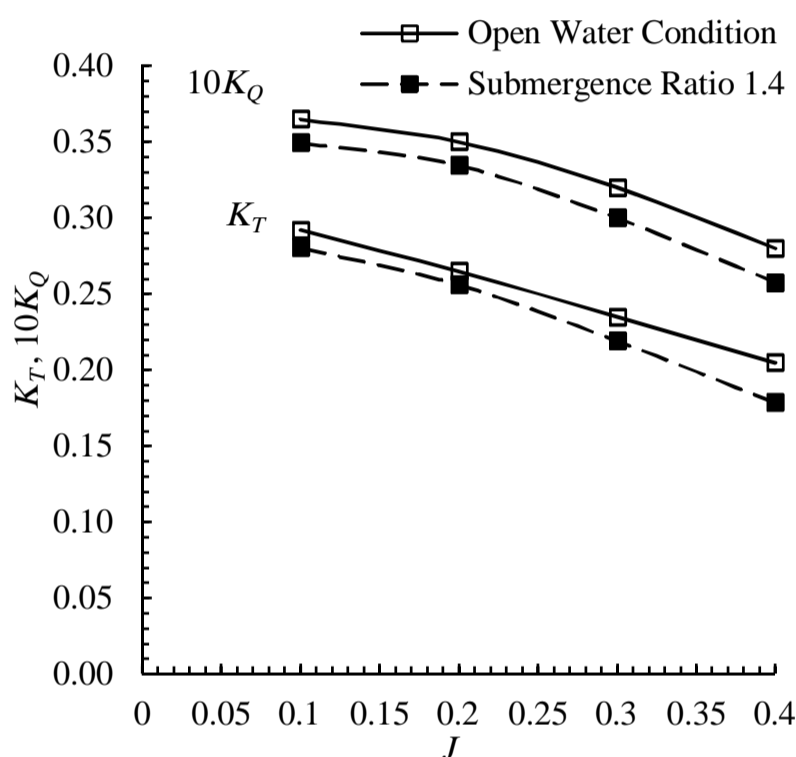


Fig. 8 Comparison of Performance coefficients in submergence ratio 1.4 and open water condition
شکل 8 مقایسه ضریب‌های عملکرد در نسبت غوطه‌وری 1.4 و شرایط آب آزاد

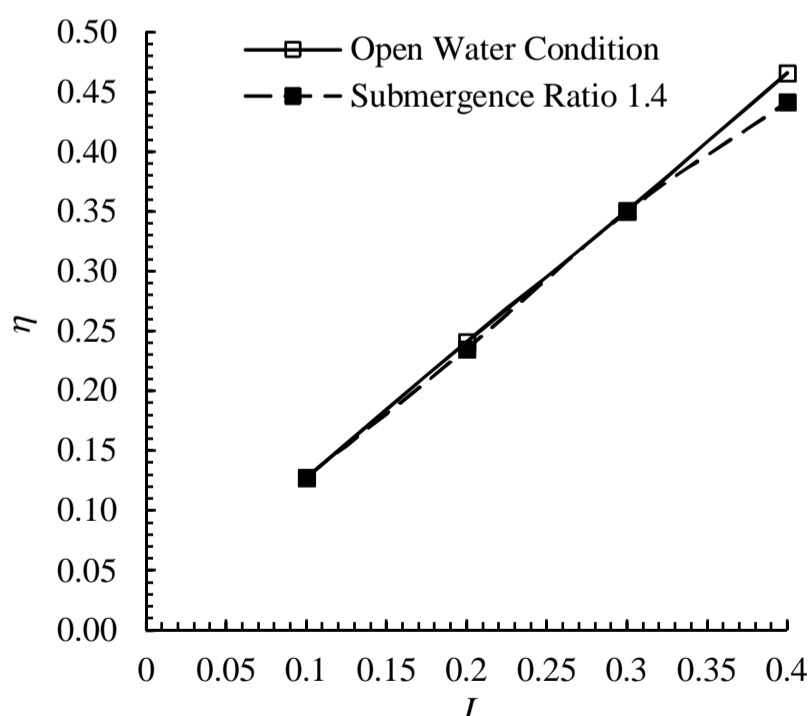


Fig. 9 Comparison of Computational efficiency in submergence ratio 1.4 and open water condition
شکل 9 مقایسه راندمان محاسباتی در نسبت غوطه‌وری 1.4 و شرایط آب آزاد

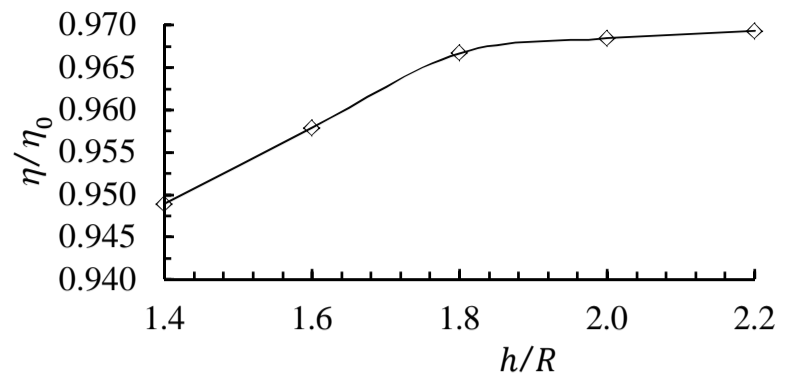


Fig. 6 Ratio of Propeller efficiency to open water efficiency in terms of submergence ratio

شکل 6 نسبت بازده پروانه به بازده در شرایط آب آزاد برحسب نسبت غوطه‌وری

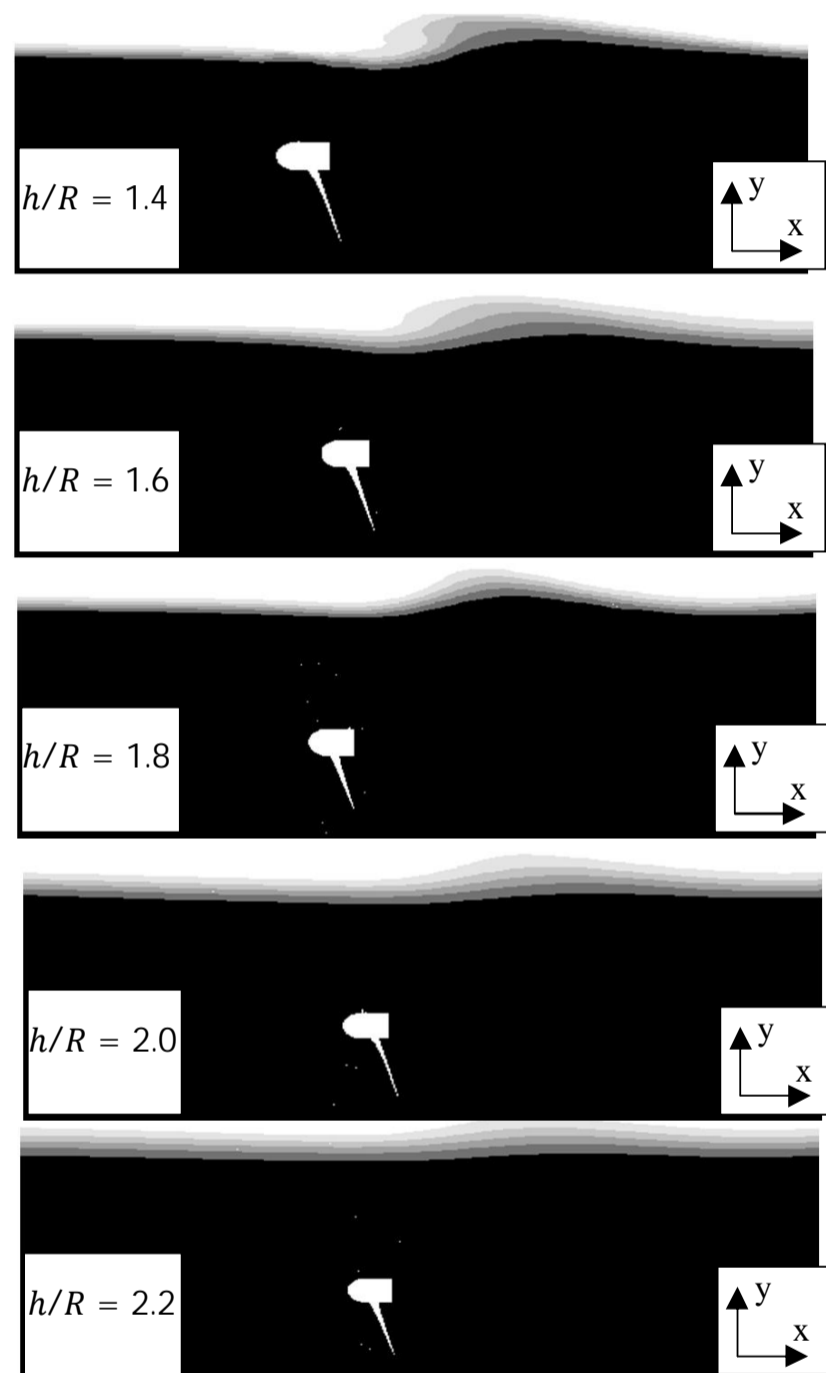


Fig. 7 View of water level changes in terms of propeller submergence ratio

شکل 7 نمای تغییرات سطح آب به ازای نسبت غوطه‌وری پروانه

شده، همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش عمق غوطه‌وری پروانه از میزان ارتفاع امواج کاسته شده است.

3-5- بررسی ضریب‌های عملکرد پروانه در نسبت غوطه‌وری 1.4

در این بخش نتایج حاصل از بررسی ضریب‌های عملکرد پروانه در نسبت غوطه‌وری 1.4 ارائه شده است. جهت تحلیل عددی، جریان گذرا حول پروانه در نسبت‌های پیش‌روی 0.1، 0.2، 0.3 و 0.4 در نظر گرفته شده و جهت مدل چرخشی از سرعت چرخشی ثابت ($n=60 \text{ rad/s}$) استفاده شده است.

عملکرد یک نمونه پروانه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه بندی انجام گرفته است و نتایج بدست آمده از دو روش دستگاه مرجع چرخان و شبکه لغزان برای پروانه در شرایط آب آزاد با داده های تجربی مقایسه و اعتبارسنجی گردیده است.

با توجه به تحلیل عددی انجام شده، مشخص گردید که در صورت کارکرد پروانه در نزدیک سطح، با کاهش نسبت غوطه وری از 2.2 تا 1.4 به علت ایجاد موج سطحی توسط پروانه، ضریب های گشتاور پیچشی و نیروی پیش رانش به ترتیب به میزان 6 درصد و 7.7 درصد نسبت به ضرایب عملکرد در شرایط آزاد کاهش یافته است. همچنین راندمان نیز نسبت به شرایط آب آزاد 5.1 درصد کاهش می یابد. نرخ این کاهش برای ضرایب عملکرد و راندمان به ترتیب در نسبت های غوطه وری 1.6 و 1.8 بیشتر می گردد. علت این پدیده می تواند ناشی از ایجاد تهویه در پروانه و عملکرد آن در حالت دو فازی در فواصل نزدیک سطح باشد. بدین منظور برای تعیین ضریب های عملکرد پروانه به صورت تجربی در شرایط آب آزاد پیشنهاد می شود که حداقل عمق غوطه وری پروانه 3 برابر شعاع پروانه انتخاب شود [17].

از دیگر نتایج این تحقیق می توان به بررسی تاثیر افزایش سرعت پیش روی بر نسبت ضریب های عملکرد و بازده پروانه در نزدیک سطح نسبت به شرایط آب آزاد اشاره نمود. با توجه به نتایج مشخص گردید که نرخ کاهش ضریب های عملکرد پروانه در نزدیک سطح نسبت به شرایط آب آزاد افزایش می یابد. به طوری که با افزایش نسبت پیش روی از 0.1 تا 0.4 میزان کاهش ضریب گشتاور پیچشی و نیروی پیش رانش نسبت به شرایط آزاد به ترتیب از 4.4 تا 7.5 و 2.3 تا 8.4 درصد می باشد. علاوه بر آن بیشترین کاهش راندمان نسبت به شرایط آب آزاد در نسبت پیش روی 0.4 به میزان 5.3 درصد می باشد.

با توجه به نتایج تحلیل عددی مشخص گردید که افزایش 42 درصدی سرعت چرخش پروانه باعث افزایش میزان تهویه در پروانه می گردد، به نحوی که 4.6 درصد از ضریب نیروی پیش رانش، 4.3 درصد از گشتاور پیچشی و همچنین 0.4 درصد از راندمان پروانه کاسته می شود. کاهش جزئی راندمان ناشی از کاهش تقریباً متناسب هر دو ضریب نیروی پیش رانش و گشتاور پیچشی می باشد.

نتایج حاصل از این پژوهش برای طراحی و انتخاب پروانه هایی با عمق عملکردی کم راه گشا است.

7- فهرست علائم

A_0	سطح دایره پروانه (m^2)
A_E	سطح گسترش یافته (m^2)
D	قطر پروانه (m)
D_{hub}	قطر توپی پروانه (m)
h	فاصله محور پروانه از سطح آب (m)
n	سرعت دورانی (rps)
p	گام پروانه (m)
Q	گشتاور پیچشی (N.m)
R	شعاع پروانه (m)
t	زمان (s)
T	نیروی پیش رانش (N)
u	سرعت پیش روی پروانه (m/s)

راندمان پروانه در اثر عملکرد در کنار سطح ناچیز می باشد اما در نسبت پیش روی 0.4 میزان اختلاف نسبت به شرایط آب آزاد فزونی یافته و با توجه به تحلیل عددی انجام شده به مقدار 5.3 درصد رسیده است.

4-5- تاثیر پدیده تهویه بر عملکرد پروانه در نزدیک سطح

یکی از موثرترین عوامل بر عملکرد پروانه در کنار سطح پدیده تهویه می باشد. با نزدیک نمودن هر چه بیشتر محور پروانه به سطح آب و یا افزایش سرعت چرخش پروانه در نزدیک سطح این پدیده می تواند بوجود آمده یا شدت یابد. برای این منظور با افزایش سرعت چرخش پروانه از 60 رادیان بر ثانیه به 85 رادیان بر ثانیه تاثیر پدیده تهویه بر ضریب های عملکرد پروانه بررسی شده است.

تغییرات نسبت حجمی آب حول پروانه در مقطع عرضی قرار گرفته در وسط محور توپی پروانه و مقادیر ضریب های عملکرد پروانه در سرعت های زاویه ای 60 رادیان بر ثانیه و 85 رادیان بر ثانیه حاصل از تحلیل عددی انجام شده به ترتیب در شکل 10 و جدول 9 ارائه شده است.

با توجه به شکل 10 ملاحظه می شود که با افزایش سرعت چرخش پروانه میزان نفوذ هوا به درون آب افزایش یافته است لذا انتظار می رود علاوه بر افزایش بار نوسانی بر روی تیغه های پروانه ضریب های عملکرد پروانه نیز کاهش یابد. ضریب های عملکرد مندرج در جدول 9 این امر را تصدیق می کند.

6- نتیجه گیری

دینامیک سیالاتی محاسباتی بعنوان یک ابزار قدرتمند می تواند برای تحلیل بسیاری از پدیده های پیچیده از جمله عملکرد یک پروانه مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله با استفاده از نرم افزار تجاری انسیس-فلوئنت و شبیه سازی دو فازی سیال، تاثیر نسبت های غوطه وری و تهویه بر روی

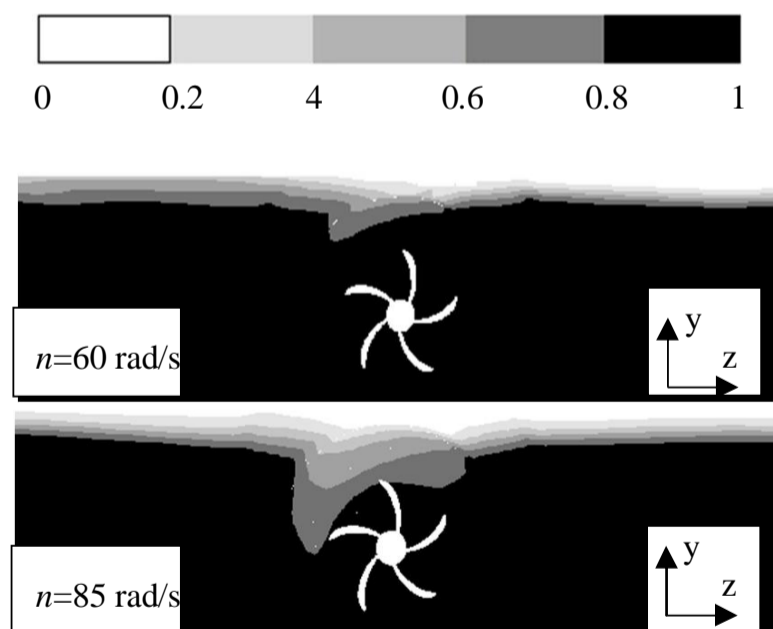


Fig. 10 volume fraction contours (water) around the propeller in lateral cross section in terms of propeller rotational speed ($J=0.1$)

شکل 10 کانتورهای نسبت حجمی (آب) حول پروانه در مقطع عرضی به ازای سرعت چرخشی پروانه ($J=0.1$)

جدول 9 ضریب های عملکرد پروانه به ازای سرعت چرخشی پروانه ($J=0.1$)

Table 9 Propeller performance coefficients in terms of the propeller rotational speed ($J=0.1$)

K_Q	K_T	n (rad/s)
0.0349	0.28	60
0.0334	0.267	87.5

8- مراجع

- Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 9, No. 5, pp. 811-815, 2015.
- [10] F. R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
- [11] C. W. Hirt, B. D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, No. 1, pp. 201-221, 1981.
- [12] M. Rishehri, M. S. Seif, A. H. Banisi, Study on performance of the propeller in the wake field of marine vehicle with using computational fluid dynamics, *Proceedings of The Ninth Marine Industries Conference*, Noor, Iran, 2007. (in Persian فارسی)
- [13] N. Bulten, I. Oprea, Explanation of deviations in torque prediction for waterjets and propellers with RANS codes, *Marine CFD-4th International Conference on Marine Hydrodynamics*, London, England, March 30-31, 2005.
- [14] S. H. Rhee, S. Joshi, Computational validation for flow around a marine propeller using unstructured mesh based Navier-Stokes solver, *JSME International Journal, Series B Fluids and Thermal Engineering*, Vol. 48, No. 3, pp. 562-570, 2006.
- [15] N. Berchiche, C. E. Janson, Grid influence on the propeller open-water performance and flow field, *Ship Technology Research*, Vol. 55, No. 2, pp. 87-96, 2008.
- [16] M. M. Bernitsas, D. Ray, P. Kinley, K_T , K_Q and efficiency curves for the wageningen b-series propellers, Report No. 237, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Michigan University, 1981.
- [17] International towing tank conference, testing and extrapolation methods propulsion & propulsor open water test, *Proceedings of The 23th International Towing Tank Conference*, Procedure 7.5-02-03-02.1, Revision 01, Venice, Italy, 2002.
- [1] T. Watanabe, T. Kawamura, Y. Takekoshi, M. Maeda, S. H. Rhee, Simulation of steady and unsteady cavitation on a marine propeller using a RANS CFD code, *Proceedings of The Fifth International Symposium on Cavitation (Cav 2003)*, Osaka, Japan, 2003.
- [2] M. Nakisa, M. J. Abbasi, A. M. Amini, Assessment of marine propeller hydrodynamic performance in open water via CFD, *Proceedings of The 7th International Conference on Marine Technology (MARTEC 2010)*, Dhaka, Bangladesh, 2010.
- [3] O. M. Faltinsen, K. J. Minsaas, N. Liapis, S. O. Skjoldal, Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway, *Proceedings of The 13th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Tokyo, Japan, 1980.
- [4] Y. L. Young, S. A. Kinnas, Performance prediction of surface-piercing propellers, *Journal of Ship Research*, Vol. 48, No. 4, pp. 288-304, 2004.
- [5] M. Caponnetto, RANSE simulations of surface piercing propellers, *Proceedings of The 6th Numerical Towing Tank Symposium*, Rome, Italy, 2003.
- [6] N. Olofsson, *Forces and flow characteristics of a partially submerged propeller*, PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1996.
- [7] K. Koushan, Dynamics of ventilated propeller blade loading on thruster, *Proceedings of The World Maritime Technology Conference*, London, England, March 6-10, 2006.
- [8] A. Califano, S. Steen, Analysis of different propeller ventilation mechanisms by means of RANS simulations, *Proceedings of The First International Symposium on Marine Propulsors*, Trondheim, Norway, 2009.
- [9] S. Adjali, O. Imine, M. Belkadi, Numerical simulation of free surface water wave for the flow around NACA 0012 hydrofoil and wigley hull using VOF method, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial,*