مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1396، دوره 17، شماره 9، ص‌ص 290-300

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی عددی منحنی عملکرد و دنباله دائم جریان یک پروانه دریایی با استفاده از اوپن‌فوم

امین طالع زاده شیرازی[1]، محمدرضا نظری[2*]، مجتبی دهقان منشادی[3]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد
3- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان
* یزد، صندوق پستی 8915818411 ، mnazari@yazd.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 02 اردیبهشت 1396
پذیرش: 16 مرداد 1396
ارائه در سایت: 17 شهریور 1396

کلید واژگان:
پروانه
ضریب تراست
منحنی عملکرد
شبیه‌سازی دنباله جریان
اوپن فوم

چکیده

در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی عددی منحنی عملکرد و مدل‌سازی میدان دائم دنباله جریان یک پروانه دریایی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. حل با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم و حلگر دائم و تراکم ناپذیر سیمپل‌فوم انجام شده‌است. گرادیان‌ها از الگوریتم خطی گاوس محاسبه شده و معادله فشار با استفاده از روش چندشبکه‌ای حل شده‌اند. در این پژوهش، شبیه‌سازی منحنی عملکرد پروانه در کل بازه عملکردی انجام شده و اثر استفاده از دو مدل اغتشاشی کا-اپسیلون تحقق پذیر و کا-اپسیلون-وی-دو-اف بر نتایج بررسی شده‌است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مدل دو معادله‌ای در تمامی حالت‌ها، بجز ناحیه نزدیک به حالت بولارد، تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در این حالت، زاویه‌حمله جریان ورودی به پروانه به شدت افزایش یافته و مدل دو معادله‌ای ضریب تراست را با 24% خطا پیش‌بینی می‌کند، درحالی‌که استفاده از مدل چهار معادله‌ای بهبود چشمگیری در نتایج ایجاد کرده و خطا را به 5% کاهش می‌دهد. در حل عددی، دنباله جریان در مقاطع مختلف طولی و شعاعی بررسی شده‌است که همخوانی خوبی با نتایج تجربی موجود نشان می‌دهد. بررسی جریان در ناحیه ویک نشان می‌دهد که رفتار مقطع طولی پائین‌دست مشابه مقطع بالادست بوده اما بازه تغییرات آن کمتر است. همچنین، بخاطر چرخشی بودن جریان پشت پروانه، مکان زاویه‌ای نقاط اکسترمم مولفه‌های ویک، دوران می‌کند. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در نزدیکی ناحیه گردابه نوک پره، تغییرات مولفه سرعت محوری ویک بسیار شدید بوده و سهم مولفه‌های محوری و مماسی سرعت در خارج از این ناحیه، ناچیز است.

Numerical simulation of the characteristic chart and the steady state wake flow past a marine propeller using OpenFOAM

Amin Talezade Shirazi[1], Mohammad Reza Nazari[1*], Mojtaba Dehghanmanshadi[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
2- Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Malek ashtar University, Shahinshahr, Iran
* P.O.B. 8915818411, Yazd, Iran, mnazari@yazd.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 22 April 2017
Accepted 07 August 2017
Available Online 08 September 2017

Keywords:
Propeller
Thrust coefficient
Characteristic chart
Wake flow simulation
OpenFOAM

ABSTRACT

In the present research, numerical simulation of the characteristic chart and steady-state Wakefield flow around a marine propeller is conducted. Solutions were performed using the open-source OpenFOAM software and the steady incompressible simple-Foam solver. The gradients were calculated using the linear Gauss algorithm, and the pressure equation was solved with the multi-grid method. In this research, characteristic chart simulation of the propeller was carried out for the entire operational conditions and the effect of using $Realizable-k-\varepsilon$ and $k-\varepsilon-v^2-f$ turbulence models on the results was investigated. The results were found to be in good agreement in all conditions except for near the bollard region. In this region, the propeller inlet angle of attack severely increased, and the two equation model predicted the thrust coefficient with 24% error, while implementing the four equation model significantly developed the results and decreased the error to 5%. The wake region parameters were also investigated in the numerical simulations at different longitudinal and radial cross sections behind the propeller which showed good agreement compared with the available experimental data. Wake region investigation showed that the flow behavior in downstream cross sections is similar to the corresponding upstream section with smaller variation ranges and for the swirling flow behind the propeller, the maximum and minimum angular position of the wake components rotates. The obtained results also show that the wake axial velocity component deviation is extremely large at the blade tip, and the contribution of axial and tangential velocity components is negligible out of the tip vortex region.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Talezade Shirazi, M. R. Nazari, M. Dehghanmanshadi, Numerical simulation of the characteristic chart and the steady state wake flow past a marine propeller using OpenFOAM, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 290-300, 2017 (in Persian)

1- مقدمه

به منظور ایجاد نیروی پیشران برای حرکت یک شناور در آب، از انواع سیستم‌های رانش دریایی استفاده می‌شود. در این میان، پروانه‌های دریایی یکی از پرکاربردترین سیستم‌های رانش هستند که به دلیل کاربردهای فراوان، بررسی جریان و استخراج منحنی عملکرد آن‌ها، از دیرباز مورد توجه محققین این حوزه بوده‌است. با بررسی رفتار جریان اطراف این نوع پروانه‌ها، علاوه بر مشخصات هیدرودینامیکی، دنباله جریان پشت پروانه نیز مدل‌سازی می‌شود که در طراحی، شناسایی شناور و تخمین نویز هیدرودینامیکی وسیله کاربرد دارد. به دلیل فرم پیچیده هندسه پروانه‌های دریایی، تشکیل گردابه‌های نوک پره و هاب پروانه و همچنین وجود جریان چرخشی نسبتاً شدید در ناحیه پشت پروانه، شبیه‌سازی میدان جریان اطراف این سیستم رانش، یکی از مسائل پیچیده در حوزه مکانیک سیالات است.

در میان شرایط مختلف کارکردی و عملیاتی پروانه، بررسی عملکرد سیستم رانش در حالت بولارد[1] -سرعت خطی تقریباً صفر در عین چرخش پروانه- از حساسیت خاصی برخوردار است. در حالت بولارد، پروانه بیشترین میزان نیروی تراست را تولید می‌کند اما بیشترین میزان گشتاور نیز در همین حالت به پروانه وارد می‌شود. در صورتی که موتور الکتریکی نتواند این گشتاور را تحمل کند، امکان رسیدن به حالت طراحی و سایر شرایط عملکردی نیز در سرعت دورانی تعیین شده، برای سیستم رانش وجود نداشته و عملاً عملکرد موتور با مشکل مواجه می‌شود. به همین دلیل، تخمین صحیح میزان گشتاور وارده در این حالت، از اهمیت فراوانی برخوردار است.

در خصوص اصول حاکم بر طراحی و تحلیل هیدرودینامیکی پروانه‌ها، مطالعات زیادی انجام شده است[1-3] . همچنین بررسی‌های فراوانی در مورد مدل‌سازی دنباله جریان پشت پروانه انجام شده‌است. در مرجع [4] با اعمال فرضیات ساده کننده، به حل تحلیلی دنباله جریان کشتی و اثر آن بر روی پروانه، با استفاده از مدل سطوح برآ[2] روی شبکه گردابه‌ای پرداخته شده‌است. برای تحلیل و مدل‌سازی دنباله جریان پروانه، از روش‌های نسبتاً سریع مانند روش المان مرزی می‌توان استفاده‌کرد [6,5]. این روش، بر پایه حل میدان جریان پتانسیل بنا نهاده شده و با اعمال اصلاحاتی اثر لزجت را در معادلات در نظر می‌گیرد. همچنین اخیراً روش‌های ترکیبی المان مرزی و معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز نیز ارائه شده‌است [7]. به دلیل پیچیدگی‌های هندسی و فیزیکی مرتبط با پروانه و همچنین تجهیزات پیشرفته مورد نیاز، مطالعات تجربی محدودی روی مشخصات عملکردی و خصوصاً جریان دنباله پروانه‌ها انجام شده‌است. این مطالعات عمدتاً در تونل آب و با استفاده از ابزار سرعت‌سنجی داپلر به وسیله لیزر[3] و تجهیزات آشکارسازی جریان انجام شده‌است [8-10]. به دلیل همین محدودیت‌های اشاره شده در حوزه بررسی دنباله جریان، در برخی مراجع، نتایج نیرویی به روش تجربی بدست آمده و نتایج مربوط به دنباله‌جریان از روش شبیه‌سازی عددی و با استفاده از تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی، پس از صحت‌سنجی نتایج نیرویی با نتایج تجربی، محاسبه می‌گردند. برای نمونه در مرجع [11]، پس از ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی منحنی عملکرد پروانه با نتایج آزمایشگاهی، نتایج مربوط به توزیع سرعت محوری، انرژی جنبشی اغتشاشی و پارامترهای مربوط به دنباله جریان در مقاطع مختلف به صورت عددی بررسی شده‌است. با توجه به محدودیت‌های تجربی اشاره شده و نیاز به دقت بالا در شبیه‌سازی دنباله جریان و پیشرفت تجهیزات سخت‌افزاری مورد نیاز در دهه‌های اخیر، روش‌های عددی به عنوان یکی از مناسب‌ترین روش ها در این زمینه مطرح شده‌اند.

چیس و کریا [12] به بررسی دنباله جریان پشت پروانه زیردریائی، با استفاده از نرم‌افزار سی‌اف‌دی شیپ‌آیوا[4] پرداختند. در این تحقیق، علاوه بر استخراج منحنی عملکرد به مدل‌سازی دنباله غیردائم جریان پشت پروانه نیز پرداخته شده و در این خصوص از سه مدل شبیه‌سازی اغتشاشی معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس[5]، مدل شبیه‌سازی ادی‌های جداشده[6] و مدل شبیه‌سازی ادی‌های جداشده تاخیری[7]، استفاده شده‌است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تراکم شبکه بر روی نتایج نیرو و گشتاور تاثیر چندانی ندارد ولی به شدت بر روی نتایج شبیه‌سازی دنباله‌جریان تاثیرگذار است. همچنین، شبیه‌سازی با استفاده از مدل شبیه‌سازی ادی‌های جداشده تاخیری به دلیل عدم پیش‌بینی بیش از حد جدایش نسبت به مدل شبیه‌سازی ادی‌های جداشده، نتایج بهتری را ارائه می‌کند. موسکاری و همکاران [13] به مدل‌سازی دینامیکی دنباله‌جریان پروانه به کمک دو مدل متوسط‌گیری شده رینولدز و مدل شبیه‌سازی ادی‌های جداشده پرداختند. نتایج این تحقیق نیز نشان می‌دهد که مدل‌های متوسط‌گیری شده رینولدز، برای پیش‌بینی کمیت‌های کلی جریان مانند نیرو و گشتاور مناسب هستند و نتایج تقریباً یکسانی در مقایسه با مدل شبیه‌سازی ادی‌های جداشده ارائه می‌کنند اما این مدل‌ها به دلیل نرخ اضمحلال بالا در مقایسه با مدل‌های دقیق‌تر، توانایی پیش‌بینی میدان دنباله در نواحی نسبتاً دور از پروانه را ندارند و مدل شبیه‌سازی ادی‌های جداشده در این خصوص، بسیار دقیق‌تر عمل می‌کند. در این مقاله، حل به روش معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز به صورت دائم و شبیه‌سازی با مدل شبیه‌سازی ادی‌های جداشده به صورت غیردائم انجام شده‌است که از این منظر، مقایسه نتایج دنباله جریان در این دو حالت، صحیح به نظر نمی‌رسد و دقت بیشتر مدل شبیه‌سازی ادی‌های جداشده نسبت به مدل معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز را نشان نمی‌دهد.

در میان مراجع موجود، مطالعات زیادی بر روی انتخاب مدل اغتشاشی مناسب جهت شبیه‌سازی جریان‌های چرخشی و به خصوص، جریان اطراف پروانه انجام شده‌است. بررسی جریان چرخشی داخل لوله با استفاده از دو مدل کا-اپسیلون آر-ان-جی و مدل تنش رینولدز[8] در مرجع [14] انجام شده‌است. گالوان و همکاران [15] اثر مدل‌های مختلف خانواده کا-اپسیلون و انواع روش‌های مدل‌سازی جریان نزدیک دیوار را در جریان چرخشی دائم، مورد مطالعه قرار دادند. همچنین بنایا و همکاران [16]، مشخصات عملکردی یک پروانه دریائی را با استفاده از 6 مدل اغتشاشی مختلف، توسط نرم‌افزار فلوئنت بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تقریباً همه مدل‌ها نتایج قابل قبولی را در حوالی نقطه طراحی پروانه ارائه می‌کنند. با افزایش ضریب پیشروی ($J = Va/nD$)، خطای همه مدل‌ها افزایش می‌یابد و همگی در ضرایب پیشروی بالا، حدوداً 40٪ خطا دارند. در تمامی ضرایب پیشروی، مدل کا-اپسیلون آر-ان-جی کمترین و مدل استاندارد کا-امگا، بیشترین خطا را نسبت به سایر مدل‌ها دارند. ولی و همکاران [17] با استفاده از مدل اغتشاشی کا-امگا اس-اس-تی به بررسی اثر سطح آزاد بر عملکرد یک پروانه مغروق پرداختند. در این تحقیق اثر عمق محور پروانه، سرعت پیشروی و همچنین پدیده هوادهی نزدیک سطح، مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در مرجع [18] به بررسی کارایی مدل اغتشاشی چهار معادله‌ای کا-اپسیلون-

[1] Bollard Condition
[2] Lifting surface
[3] Laser Doppler Velocimetry (LDV)
[4] CFD Ship-Iowa
[5] Reynolds Average Navier-Stockes (RANS)
[6] Detached-Eddy Simulation (DES)
[7] Delayed Detached-Eddy Simulation (DDES)
[8] Reynolds Stress Model(RSM)

وی-دو-اف در پیش‌بینی چندین نمونه از جریان‌های برگشتی که ناحیه جدایش نسبتاً گسترده‌ای دارند -مانند جریان پله و جریان روی کانال موج دار- پرداخته شده‌است. نتایج این تحقیق نسبت به مدل‌های دو معادله ای موجود بهبود قابل توجهی یافته و به نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی مستقیم[1] بسیار نزدیک شده‌است. در مرجع [19] شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی سیال روی پره استاتور با استفاده از یک کد خانگی و همچنین نرم افزار فلوئنت توسط مدل چهار معادله‌ای کا-اپسیلون-وی-دو-اف انجام شده‌است. هدف اصلی این تحقیق، پیش‌بینی جریان‌های ثانویه و بررسی اثر آن بر روی انتقال‌حرارت دیواره‌های انتهایی بین دو پره استاتور بوده‌است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط مدل چهار معادله‌ای با نتایج تجربی همخوانی بهتری نسبت به مدل‌های رایج ویسکوزیته-ادی داشته‌است. همچنین نتایج تقریباً یکسانی با استفاده از نرم افزار فلوئنت و کد استفاده شده، بدست آمده است.

بررسی مقالات موجود در حوزه پروانه‌های دریایی نشان می‌دهد که عمده مطالعات انجام شده در زمینه استخراج منحنی عملکرد پروانه، در نزدیکی حالت طراحی بوده و نتایج برای سایر حالت‌ها گزارش نشده‌است. اما در شرایط کارکرد واقعی شناور، یک سیستم رانش، معمولاً همه حالت‌های عملکردی را تجربه می‌کند. در این میان، بررسی حالت بولارد به خاطر شرایط خاص موجود از نظر گشتاور وارده، از اهمیت خاصی برخوردار است. لذا بررسی کامل منحنی عملکرد و رفتار جریان اطراف پروانه در همه حالت‌ها، ضروری به نظر می‌رسد. در خصوص شبیه سازی دنباله جریان، در مراجع [13,12] تنها به ارائه کانتورهای کیفی از دنباله جریان بسنده شده‌است و در این زمینه مطالعه کمی، کمتر صورت گرفته است.

بنابراین هدف از تحقیق حاضر، استخراج منحنی عملکرد در کل بازه عملکردی یک پروانه دریایی نمونه است. در این مورد، علت ایجاد خطا در تخمین ضرایب تراست و گشتاور، در ضرایب پیشروی پائین و در محدوده شرایط بولارد بررسی شده و راهکار عملی برای افزایش دقت، ارائه شده‌است. در این خصوص، مدل اغتشاشی چهار معادله‌ای کا-اپسیلون-وی-دو-اف بجای مدل دو معادله‌ای کا-اپسیلون تحقق پذیر بکار گرفته شده‌است. در مرحله بعد، دنباله جریان در مقاطع مختلف طولی و شعاعی پشت پروانه با استفاده از مدل دو معادله‌ای به صورت کمی با نتایج تجربی موجود مقایسه و تحلیل شده‌است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار متن باز اوپن‌فوم انجام شده‌است.

2- معادلات حاکم و روش حل

معادلات حاکم بر جریان سیال، معادلات بقای جرم و ناویر-استوکس بوده که در حالت سه بعدی، دائم و تراکم ناپذیر به فرم معادلات (1) و (2) ارائه می‌شوند. زیرنویس i,j در معادلات بیانگر جهت در راستای دستگاه مختصات می باشد.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, i = 1,2,3 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{\acute{u}_i \acute{u}_j}\right), i,j = 1,2,3 \quad (2)$$

در معادلات فوق $\bar{u}_i, x_i$ به ترتیب متوسط سرعت و مکان در جهت i بوده و $\bar{p}, \rho, \mu$ بترتیب مقادیر متوسط زمانی فشار، چگالی و لزجت را نشان می‌دهند. همچنین برای مدل‌سازی جمله مربوط به تنش رینولدز، از مدل دو معادله‌ای کا-اپسیلون تحقق پذیر و مدل چهار معادله‌ای کا-اپسیلون-وی-دو-اف استفاده شده‌است. لازم به ذکر است که در مرجع [20] انتخاب مدل اغتشاشی مناسب جهت شبیه سازی میدان‌های چرخشی، به عدد چرخش وابسته شده که طبق رابطه (3) بیان می‌شود.

$$S = \frac{\int r\omega \overrightarrow{V} \cdot \overrightarrow{dA}}{\overrightarrow{R} \int u \overrightarrow{V} \cdot \overrightarrow{dA}} \quad (3)$$

در رابطه (3)، r فاصله هر نقطه از محور دوران، ω سرعت دورانی، $\vec{V}$ بردار سرعت روی المان $\overrightarrow{dA}$ و R شعاع هیدرولیکی است. این عدد در حقیقت، نسبت شار مومنتوم زاویه‌ای به شار مومنتوم محوری را بیان می‌کند. برای جریان‌هایی با قدرت چرخش پائین ($S < 0.5$)، هر دو مدل کا-اپسیلون تحقق پذیر و کا-اپسیلون آر-ان-جی جواب‌های بهتری نسبت به مدل استاندارد کا-اپسیلون ارائه می‌کنند. برای جریان‌های با قدرت چرخش بالا ($S > 0.5$)، استفاده از مدل تنش رینولدز به شدت توصیه شده‌است. در تحقیق حاضر، عدد چرخش در حدود 0.15 بوده، فلذا از مدل کا-اپسیلون تحقق پذیر استفاده شده‌است. این روش جریان اغتشاشی را بر اساس دو معادله انرژی جنبشی اغتشاشی(k) و نرخ اتلاف انرژی اغتشاشی(ε) مدل‌سازی می‌کند که روابط آن طبق معادلات (4) و (5) بیان می‌شوند. در نهایت مقدار ویسکوزیته اغتشاشی در حالت دائم، از رابطه (6) محاسبه می‌گردد.

$$\frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k - \rho\varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \varepsilon/k(C_{\varepsilon 1}P_{\mathrm{K}} - C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon) \quad (5)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

در این معادلات، ترم P_{K} بیانگر ترم تولید و $C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ به همراه $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ ثوابت معادلات را تشکیل می‌دهند.

مدل وی-دو-اف اولین بار توسط دوربین [21] ارائه شده‌است. این مدل، نسبت به مدل‌های ویسکوزیته-ادی مزایای بسیاری دارد و از برخی ناپایداری‌های عددی در حین حل، جلوگیری می‌کند. این مدل برای هر نوع هندسه‌ای مناسب بوده و معادلات آن تا نزدیکی مرز جامد بدون استفاده از هیچ نوع تابع دیواره‌ای معتبر می‌باشد. در این روش بجای استفاده از تابع دیواره، معمولاً از یک تابع میرایی[2] استفاده می‌شود که اثرات مربوط به لزجت و دیواره را بر روی رفتار اغتشاشات اصلاح می‌کند [22]. در مدل‌های وی-دو-اف دو معادلهٔ جدید علاوه برمعادلات اولیهٔ مدل دو معادله‌ای حل می‌شوند که شامل معادلهٔ $\overline{v^2}$ (مؤلفهٔ عمودی نوسانات سرعت) و تابع f است. کارکرد اصلی این مدل، توسعه مدل‌سازی اثر دیوار بر اغتشاشات بوده است. دیواره‌ها بر نوسانات در جهت عمود بر جریان از دو طریق میراکنندگی دیواره[3] و میراکنندگی لزجی[4] اثر می‌گذارند. میرایی دیواره از طریق حل اغتشاشی، در یک ناحیه نسبتاً دور در میدان فشار اتفاق می‌افتد ($y^+ \lesssim 200$) در حالی‌که میرایی لزجی درون زیر لایه لزج و لایه بافر[5] ($y^+ \lesssim 10$) رخ می‌دهد. در مدل‌های متداول ویسکوزیته-ادی هر دو اثر از طریق توابع دمپینگ محاسبه می‌شوند و در فاصله ($y^+ \gtrsim 10$)، این اثر به صفر می‌رسد. در مدل‌های وی-دو-اف مشکل محاسبه دمپینگ دیواره به راحتی با حل معادله انتقال مربوطه حل می‌شود [23]. در این مدل $\sqrt{\overline{v^2}}$ بعنوان مقیاس سرعت آشفته بجای $\sqrt{k}$ که در مدل دو معادله‌ای استفاده می‌شد، انتخاب می‌شود. جزئیات بیشتر در مورد این مدل در مراجع [24,22,21,18] ارائه شده‌است. معادلات (7) تا

[1] Direct Numerical Simulation (DNS)

[2] Damping function
[3] Wall damping
[4] Viscous damping
[5] Buffer layer

(10) روابط حاکم بر این مدل را در حالت دائم نشان می‌دهند. در این روش، ویسکوزیته اغتشاشی از معادله (11) محاسبه می شود.

$$U_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\upsilon+\frac{\upsilon_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+P_K-\varepsilon \quad (7)$$

$$U_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\upsilon+\frac{\upsilon_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)+\frac{C_{\varepsilon1}P_k}{T}-\frac{C_{\varepsilon2}\varepsilon}{T} \quad (8)$$

$$U_j\frac{\partial \overline{v^2}}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\upsilon+\frac{\upsilon_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial \overline{v^2}}{\partial x_j}\right)+kf-6\frac{\overline{v^2}}{k}\varepsilon \quad (9)$$

$$f-L^2\frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2}=\frac{(C_1-1)}{T}\left(2/3-\frac{\overline{v^2}}{k}\right)+C_2\frac{P_k}{k}+\frac{5\overline{v^2}/k}{T} \quad (10)$$

$$\nu_t=C_\mu\overline{v^2}T \quad (11)$$

در روابط فوق، T و L به ترتیب بیانگر مقیاس زمانی و طولی اغتشاشی هستند. ترم P_k بیانگر ترم تولید و $C_1, C_2, C_\mu, C_{\varepsilon1}, C_{\varepsilon2}$ به همراه $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ همانند مدل دو معادله‌ای، ثوابت معادلات را تشکیل می‌دهند. در شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از هر دو مدل اغتشاشی، از مقادیر پیش فرض ثوابت در نرم افزار اوپن‌فوم استفاده شده‌است.

لازم به ذکر است که در نرم‌افزار اوپن‌فوم، امکان شبیه‌سازی با و بدون استفاده از تابع دیواره، برای این مدل وجود دارد. برای تخمین بهتر تنش برشی روی سطح و پیش بینی بهتر نیروهای لزجی، معمولاً از حالت بدون تابع دیواره استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر، بدلیل آنکه عمده نیروهای وارد بر پروانه از نوع فشاری می‌باشد، به منظور کاهش حجم محاسبات، از تابع دیواره استفاده شده‌است.

همانطور که اشاره شد، برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار اوپن‌فوم استفاده شده‌است. نرم افزار اوپن‌فوم یک نرم افزار فوق‌العاده قوی برای شبیه‌سازی طیف وسیعی از مسائل کاربردی در حوزه مکانیک سیالات است و بیش از 80 حلگر برای مسائل مختلف مهندسی در آن پیش‌بینی شده‌است. به دلیل متن باز بودن برنامه، امکان اضافه کردن و اعمال تغییرات در این حلگرها وجود دارد. برای مدل‌سازی چرخش پروانه و به منظور استخراج منحنی عملکرد پروانه در حالت دائم، از حلگر سیمپل‌فوم[1] استفاده شده‌است. این حلگر، برای شبیه‌سازی جریان‌های دائم اغتشاشی تراکم‌ناپذیر استفاده می‌شود. گسسته‌سازی زمانی بصورت حالت دائم بوده و برای محاسبه گرادیان‌ها از الگوریتم خطی گاوس[2] استفاده شده‌است. همچنین، الگوریتم استفاده شده برای معادلات فشار، حلگر چند شبکه‌ای بوده‌است. جزئیات بیشتر در مورد نحوه شبیه‌سازی اجسام دوار در نرم‌افزار اوپن‌فوم در مرجع [25] ارائه شده‌است. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی جریان اطراف پروانه، میدان حل به دو ناحیه نزدیک پروانه و ناحیه دوردست تقسیم می شود. در حل دائم، تنها معادلات حاکم در ناحیه نزدیک پروانه اصلاح شده و جملات مربوط به شتاب کریولیس در روابط اضافه می‌شود و این ناحیه نسبت به ناحیه دوردست ساکن است. در حل غیردائم، موقعیت مکانی این دو ناحیه بر حسب زمان متغیر بوده و ناحیه نزدیک پروانه در حال چرخش است. معیار همگرائی باقیمانده‌ها در همه حالت‌های شبیه‌سازی برابر 10^{-5} در نظر گرفته شده‌است.

3- معرفی هندسه و شرایط مرزی

هندسه پروانه استفاده شده در این تحقیق، یک پروانه گام کنترلی[3] است که مشخصات کلی آن در جدول 1 ارائه شده‌است. پروانه استفاده شده، یک پروانه راستگرد پنج پره‌ای بوده و نمای کلی آن به همراه باس[4] و شافت متصل به آن، در شکل 1 نشان داده شده‌است. جزئیات بیشتر در مورد پروانه انتخاب شده در مرجع [26] ارائه شده‌است. در این تحقیق گام پروانه، ثابت در نظر گرفته شده‌است.

در مرجع [26]، نتایج تجربی حوضچه‌کشش برای استخراج منحنی عملکرد و همچنین، نتایج تست تونل کاویتاسیون از دنباله‌جریان در ناحیه $-0.2 \le x/D \le 0.2$ وجود دارد. به منظور انجام آزمون‌های تجربی حوضچه، پروانه به یک شافت و بازوی نگهدارنده[5] مطابق شکل 2 متصل شده و در نهایت پس از انجام تست‌ها اثر آن بر روی نتایج حذف شده‌است. همچنین فاصله محور شافت پروانه تا سطح آزاد آب برابر $1.5D$ بوده که مطابق با استاندارد کنفرانس بین المللی حوضچه‌کشش[6] در نظر گرفته شده است.

جدول 1 مشخصات هندسی پروانه مورد بررسی [26]

Table 1 General characteristics of the propeller [26]

پارامتر		
قطر پروانه	$D(\text{mm})$	250
گام در $\frac{r}{R}=0.7$	$P_{0.7}(\text{mm})$	408.75
گام در $\frac{r}{R}=0.75$	$P_{0.75}(\text{mm})$	407.38
گام متوسط	$P_{\text{mean}}(\text{mm})$	391.88
طول کورد در $\frac{r}{R}=0.7$	$C_{0.7}(\text{mm})$	104.16
طول کورد در $\frac{r}{R}=0.75$	$C_{0.75}(\text{mm})$	106.34
ضخامت در $\frac{r}{R}=0.75$	$t_{0.75}(\text{mm})$	3.79
نسبت گام	$P_{0.7}/D$	1.63
نسبت گام متوسط	P_{mean}/D	1.56
نسبت سطح گسترش یافته	A_E/A_0	0.78
زاویه پیچش	$\theta_{\text{eff}}(^\circ)$	18.8
نسبت قطر هاب	d_h/D	0.15
تعداد پره ها	z	5
جهت چرخش		راستگرد

Fig. 1 General view of the propeller geometry [26]

شکل 1 نمای کلی از هندسه پروانه [26]

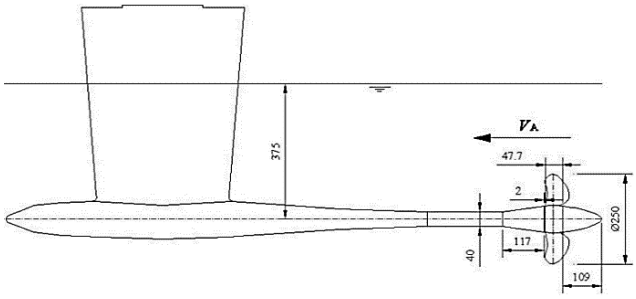


Fig. 2 Propeller connection to the shaft and towing tank carriage [26]

شکل 2 اتصال پروانه به شافت و ارابه حمل حوضچه کشش [26]

[1] simpleFoam
[2] Gauss Linear Algorithm
[3] Controllable pitch propeller (CPP)
[4] boss
[5] Strut
[6] International Towing Tank Conference (ITTC)

در شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده در تحقیق حاضر، برای ورودی از شرط مرزی مقدار ثابت برای سرعت و مشتق صفر[1] برای فشار استفاده شده است. همچنین در خروجی، شرط مرزی فشار ثابت و مشتق صفر برای سرعت بکار گرفته شده‌است. شافت و پروانه دارای شرط مرزی دیوار با فرض عدم لغزش هستند. همچنین دیواره اطراف، با شرط مرزی دیواره لغزان مدل‌سازی شده‌است. به ناحیه استوانه‌ای نزدیک پروانه نیز، سرعت دورانی ثابت اعمال می‌شود.

4- دامنه محاسباتی و شبکه تولید شده

مدل هندسی پروانه در نرم‌افزارهای تولید هندسه مدل‌سازی شده و به نرم‌افزار اوپن فوم وارد می‌شود. به منظور تولید شبکه و شبیه‌سازی میدان جریان سیال اطراف پروانه، از یک دامنه حل استوانه‌ای به صورت شکل 3 استفاده شده‌است. مقادیر انتخاب شده در شبیه‌سازی برای طول بالادست، طول پائین دست و قطر میدان حل بترتیب برابر $4.5D$,$12D$، $2.5D$ بوده است. همچنین مطابق شکل 3، در ناحیه پائین دست از یک ناحیه سیلندر شکل در نزدیکی امتداد نوک پره و باس برای ریزتر کردن شبکه در این نواحی استفاده شده‌است.

برای تولید شبکه از ابزار اسنپی‌هگزمش[2] موجود در نرم‌افزار اوپن‌فوم استفاده شده‌است. این ابزار، امکان تولید شبکه باسازمان روی هندسه‌های پیچیده را فراهم کرده‌است. برای تولید شبکه، از یک شبکه پایه باسازمان یکنواخت توسط ابزار بلاک‌مش[3] استفاده می‌شود. با توجه به تنظیمات انجام شده در فایل مربوطه، امکان ریز و درشت کردن موضعی شبکه، تولید شبکه لایه مرزی، انطباق شبکه بر سطوح منحنی و برخی موارد دیگر وجود دارد. به علت درشت شدن تدریجی شبکه، ضمن حفظ تعامد شبکه[4]، حجم شبکه تولید شده به این روش، در مقایسه با سایر روش‌های متداول تولید شبکه، کاهش چشمگیری خواهدیافت. همچنین به علت باسازمان بودن و کیفیت بالای شبکه تولید شده، روند همگرائی سریع‌تر از شبکه بی‌سازمان خواهد بود.

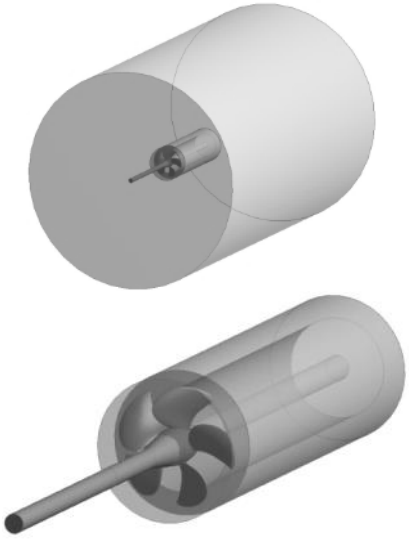


Fig. 3 General overview of the solution domain (top) and near & wake region of the propeller (bottom)

شکل 3 نمای کلی از دامنه حل (بالا) و ناحیه نزدیک و پشت پروانه (پائین)

در شکل 4، نمائی از شبکه تولیدشده روی پروانه و صفحه $z = 0$، نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، علاوه بر ناحیه سیلندر اطراف پروانه، شبکه در امتداد ناحیه نوک پره و پشت هاب ریزتر شده تا گردابه‌های نوک پره[5] و هاب[6] را به خوبی مدل‌سازی کند. یکی از موارد بسیار مهم در تمامی شبیه‌سازی‌های عددی، بررسی عدم وابستگی نتایج بدست‌آمده به تعداد المان‌های استفاده شده در حل مساله است. بطور کلی، با افزایش تعداد نقاط شبکه، نتایج دقیق‌تری بدست می‌آید اما از طرف دیگر، هزینه محاسباتی و زمان حل مساله افزایش خواهدیافت.

در این تحقیق مطالعه شبکه، با مقایسه نتایج مربوط به ضریب نیروی تراست و گشتاور در ضریب پیشروی $J = 1.068$ روی 7 شبکه مختلف مطابق جدول2 با استفاده از مدل دو معادله‌ای، انجام شده‌است. ضریب تراست تجربی در این حالت برابر 0.354 و ضریب گشتاور 0.0914 گزارش شده‌است. در جدول2 نسبت ضرایب تراست و گشتاور به نتایج ریزترین شبکه نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج شبکه 6 و 7 نسبت به یکدیگر تغییرات زیادی نداشته‌است. بنابراین به منظور حفظ دقت و همچنین جلوگیری از افزایش هزینه محاسباتی، برای سایر شبیه‌سازی‌ها از شبکه 6 با تعداد 855432 سلول محاسباتی استفاده شده‌است. خطای مربوط به ضریب تراست و گشتاور در مقایسه با نتایج تجربی، در این شبکه به ترتیب

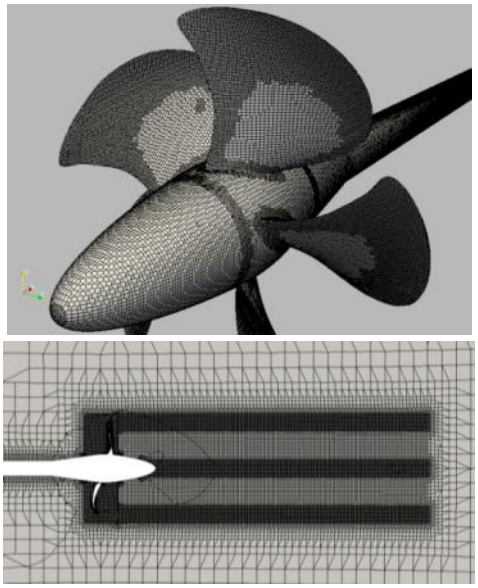


Fig. 4 Propeller surface grid (top) and wake grid at $z = 0$ surface (bottom)

شکل 4 شبکه روی سطح پروانه (بالا) و شبکه در صفحه $z = 0$ (پائین)

جدول 2 نسبت ضرایب تراست و گشتاور به ضرایب ریزترین شبکه

Table 2 Thrust and torque coefficient ratios to the finest grid coefficient

شبکه	اندازه پایه (متر)	تعداد المان	$\frac{K_T}{K_{T_6}}$	$\frac{K_Q}{K_{Q_6}}$
1	0.2	45518	1.124	1.191
2	0.15	81308	1.042	1.099
3	0.1034	135577	1.023	1.064
4	0.075	243176	1.014	1.032
5	0.0536	443708	1.008	1.011
6	0.0385	855432	1.003	1.002
7	0.0275	1691594	1.000	1.000

[1] Zero-Gradient
[2] Snappy Hex Mesh (SHM)
[3] Block Mesh
[4] Mesh Orthogonality
[5] Tip Vortex
[6] Hub Vortex

برابر 0.3% و 3.2% می‌باشد. مقادیر متوسط و بیشینه پارامتر y^+ روی سطح پروانه بترتیب برابر 46 و 140 بوده است که با توجه به تابع دیواره استفاده شده در محدوده مجاز قرار دارند.

همچنین، شبیه‌سازی‌های انجام شده به روش مدل چهار معادله‌ای، بنا بر توضیحات ارائه‌شده در بخش2، روی همین شبکه انجام شده‌است. در نتایج ارائه شده، مقادیر ضرایب تراست و گشتاور با استفاده از روابط $K_T = T/(\rho n^2 D^4)$ و $K_Q = Q/(\rho n^2 D^5)$ بی‌بعد شده‌اند و راندمان هیدرودینامیکی پروانه از رابطه $\eta = \mathrm{J}/2\pi \times (K_T/K_Q)$ بدست آمده‌است. همچنین عدد بدون بعد رینولدز[1]، بر اساس مجموع برداری سرعت خطی و دورانی محاسبه شده از معادله (12) در $r/R = 0.7$ ، به صورت رابطه (13) تعریف می‌شود.

$$V_{0.7} = \sqrt{V_a^2 + (0.7R\omega)^2} \quad (12)$$

$$\mathrm{Re}_{0.7} = \frac{\rho V_{0.7} c}{\mu} \quad (13)$$

5- نتایج

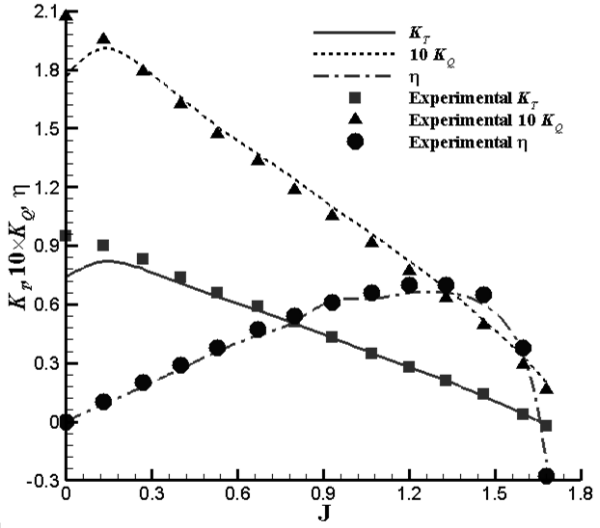
نتایج بدست‌آمده از این تحقیق، در دو بخش ارائه شده‌است. ابتدا نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی حالت آب‌آزاد، به منظور استخراج منحنی عملکرد و همچنین بررسی اثر مدل اغتشاشی بر نتایج ارائه شده‌است. در بخش بعد، به بررسی و تحلیل میدان ویک پرداخته شده و پارامترهای دنباله جریان در مقاطع شعاعی و طولی مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

5-1- استخراج منحنی عملکرد در حالت آب آزاد

اولین مرحله در بررسی و صحت‌سنجی نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی عددی جریان روی پروانه، مقایسه نتایج بدست‌آمده در حالت آب آزاد با نتایج تجربی است. در این تحقیق، این نتایج با مرجع [26] مقایسه شده‌است. سرعت دورانی پروانه در آزمون تجربی، ثابت و برابر $n = 15$ rps در نظر گرفته‌شده و مقادیر مختلف ضریب پیشروی با تغییر سرعت محوری در بازه $V_a = 0 - 6.3$ m/s بدست آمده‌اند. بر این اساس، محدوده عدد رینولدز طبق تعریف، در بازه $\mathrm{Re} = 8.58 \times 10^5 - 1.08 \times 10^6$ خواهد بود. لازم به ذکر است که در آزمون‌های انجام شده در حوضچه کشش، با انجام یک سری پیش‌آزمون، اثر هاب پروانه و همچنین اثر فاصله بین قسمت دوار با شافت و یاتاقان‌های اتصالی بر نتایج اندازه‌گیری شده و پس از انجام آزمون‌های نهایی اثر این موارد بر روی نتایج، اصلاح شده‌است. جزئیات کامل در مورد مشخصات حوضچه‌کشش و تونل کاویتاسیون استفاده‌شده در آزمون‌های تجربی و همچنین روند انجام آزمون‌ها، در مرجع [26] بیان شده است.

در تحقیق حاضر، منحنی عملکرد هیدرودینامیکی با استفاده از مدل کا-اپسیلون تحقق پذیر بدست آمده‌است. در شکل 5، این نتایج بصورت ضرایب بی‌بعد تراست، گشتاور و راندمان با نتایج تجربی مقایسه شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج در کل بازه عملکردی به غیر از نواحی نزدیک به حالت بولارد، از دقت خوبی برخوردار است. متوسط اختلاف ضرایب تراست و گشتاور، با نتایج آزمایشگاهی بترتیب برابر 2.7% و 7.5% می باشد.

با کاهش ضریب پیشروی، خطای نتایج عددی افزایش می‌یابد و در حالت بولارد برای ضریب تراست و گشتاور بترتیب به 24% و 14% می‌رسد. دلیل این موضوع به تفاوت فیزیک حاکم بر رفتار جریان اطراف پروانه در این حالت



a

Fig. 5 Comparison of the operational characteristics against experimental results in open-water condition

شکل 5 مقایسه مشخصات عملکردی در حالت آب آزاد با نتایج آزمایشگاهی

با حالت طراحی بر می‌گردد. با بررسی زاویه‌حمله ظاهری (α) جریان ورودی به پروانه، این موضوع واضح‌تر می‌شود. این زاویه، بصورت اختلاف زاویه‌گام هیدرودینامیکی (β_I) و زاویه‌گام پره (φ) بصورت رابطه (16) تعریف می‌شود [27,1].

$$\beta_I = \tan^{-1}\left(\frac{V_a}{2\pi n r}\right) \quad (14)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{P}{2\pi r}\right) \quad (15)$$

$$\alpha = \varphi - \beta_I \quad (16)$$

به علت تغییر زاویه‌گام پروانه در مقاطع مختلف شعاعی، زاویه‌حمله دقیق ورودی در هر مقطع تغییر می‌کند اما این تغییرات در راستای شعاع، چندان زیاد نیست. در جدول3 زاویه‌گام، زاویه‌گام هیدرودینامیکی و زاویه‌حمله ظاهری در مقطع $r/R = 0.7$ برای کلیه حالت‌ها ارائه شده‌است.

همانطور که مشاهده می‌شود زاویه‌حمله ظاهری پروانه در ضرایب پیشروی نزدیک به حالت طراحی پائین بوده، بنابراین جدایش شدیدی در این حالت‌ها رخ نمی‌دهد. معمولاً طراحی پروانه طوری صورت می‌گیرد که در شرایط عملکردی آن $\alpha \cong 6° - 8°$ باشد. در زوایای خیلی بالاتر از این مقدار، میزان جدایش اطراف پروانه زیاد بوده و در زوایای کمتر، به علت نزدیک شدن میدان فشار جلو و پشت پره، عملاً نیروی تراستی تولید نمی‌شود. با دور شدن

جدول 3 زوایای حمله، گام و گام هیدرودینامیکی در ضرایب پیشروی مختلف

Table 1 Attack, pitch and hydrodynamic pitch angles at different advance coefficient

α	φ	β_I	J
36.55	36.55	0.00	0.00
33.09	36.55	3.46	0.13
29.62	36.55	6.92	0.27
26.24	36.55	10.31	0.40
22.90	36.55	13.65	0.53
19.65	36.55	16.90	0.67
16.60	36.55	19.95	0.80
13.60	36.55	22.95	0.93
10.81	36.55	25.74	1.06
7.93	36.55	28.62	1.20
5.38	36.55	31.17	1.33
3.15	36.55	33.40	1.45
0.54	36.55	36.01	1.60
0.78	36.55	37.33	1.68

[1] Reynolds number

از حالت طراحی، این زاویه شدیداً افزایش می‌یابد. بنابراین نواحی با جدایش جریان نسبتاً شدیدی در پشت پره تشکیل می‌شود. در شکل 6، کانتور فشار در چهار ضریب پیشروی مختلف روی صفحات پره و مقطع شعاعی $r/R = 0.7$ نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، در ضرایب پیشروی پایین، در اطراف لبه حمله پره، یک ناحیه پرفشار و کم فشار وجود دارد اما این ناحیه در ضرایب پیشروی بالاتر مشاهده نمی‌شود.

در حالت بولارد، استفاده از مدل‌های دو معادله‌ای که عمدتاً در پیش‌بینی صحیح نقطه جدایش دچار مشکل هستند، چندان صحیح به نظر نمی‌رسد. در مرجع [23] استفاده از مدل چهار معادله‌ای به منظور پیش‌بینی بهتر جدایش جریان در جریان‌های با نواحی جدایش نسبتاً زیاد توصیه شده است. به همین دلیل، شبیه‌سازی در نقاط $J = 0,0.13,0.27$ با استفاده از مدل اغتشاشی کا-اپسیلون وی-دو-اف تکرار شده‌است. همانطور که در شکل 7 مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده در این حالت نسبت به حالت قبل به صورت قابل توجهی بهبود یافته و خطای ضریب تراست و گشتاور در حالت بولارد به 5.2% و 4.6% کاهش یافته‌است. همچنین، همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب پیشروی و کاهش زاویه‌حمله ظاهری، نتایج حاصل از دو مدل اغتشاشی به یکدیگر نزدیک می‌شوند.

2-5- بررسی دنباله حالت دائم جریان در مقاطع مختلف

به منظور بررسی دنباله جریان، در مرجع [26] از یک تونل کاویتاسیون مدار بسته با سطح مقطع 600×600 mm استفاده شده است. نتایج مولفه‌های دنباله جریان از روی میدان سرعت، در مقاطع طولی $x/D = 0.094,0.1,0.2$ و مقاطع شعاعی $0.4 \le r/R \le 1.1$ در ناحیه قطاعی یک پره در بازه $-50° \le \theta \le 22°$ با استفاده از تجهیز سرعت‌سنجی داپلر به وسیله لیزر استخراج شده‌اند.

در تحقیق حاضر، نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی در دو مقطع طولی $x/D = 0.1,0.2$ و سه مقطع شعاعی $r/R = 0.7,0.97,1$ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌است. در شکل 8 نمایی از مقاطع طولی و شعاعی

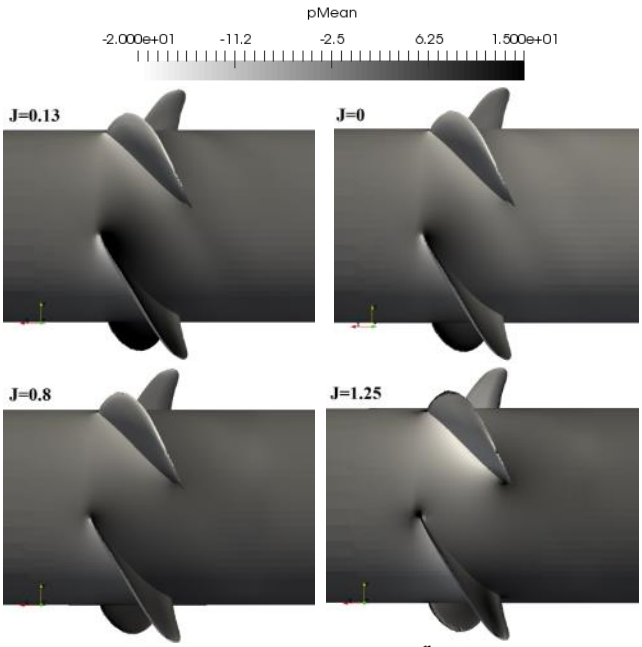


Fig. 6 Pressure contour (Pa) on the blades and $\frac{r}{R} = 0.7$ radial section

شکل 6 کانتور فشار بر حسب پاسکال روی پره‌ها و مقطع شعاعی $r/R = 0.7$

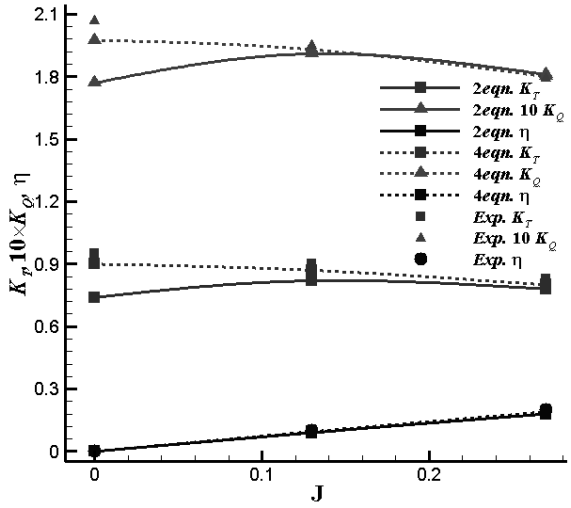


Fig. 7 Comparison of 2 and 4 equations models with experimental data

شکل 7 مقایسه نتایج مدل‌های 2 و 4 معادله‌ای با نتایج آزمایشگاهی

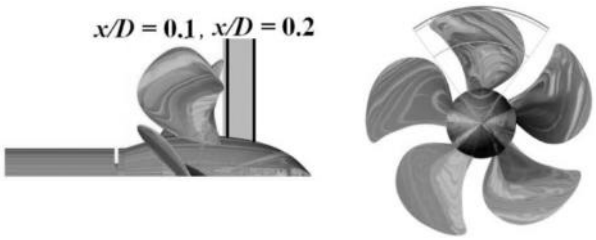


Fig. 8 View of the radial sections (Right) and longitudinal sections (Left) behind the propeller

شکل 8 نمایی از مقاطع شعاعی(راست) و طولی (چپ) در ناحیه پشت پروانه

ایجاد شده در ناحیه پشت پروانه از دو نمای مختلف، نشان داده شده‌است.

آزمایش‌های تجربی به منظور بررسی میدان دنباله، تنها در $V = 7.204$ m/s , $n = 23$ rps انجام شده‌است. بنابراین زاویه حمله تقریبی جریان طبق رابطه (14)، در مقطع $r/R = 0.7$ برابر $\alpha = 6.92°$ و عدد رینولدز طبق معادله (13)، برابر $\mathrm{Re} = 1.52 \times 10^6$ خواهد بود. به همین دلیل شبیه‌سازی‌های عددی فقط با استفاده از مدل دو معادله‌ای انجام شده‌است. نتایج ارائه شده برای دنباله دائم جریان بر حسب سه مولفه سرعت محوری (W_a)، سرعت مماسی (W_t) و سرعت شعاعی (W_r) که طبق معادلات (15) تا (17) تعریف می‌شوند، گزارش شده‌است.

$$W_a = 1 - \frac{V_a}{V} \quad (17)$$

$$W_t = \frac{V_t}{V} \quad (18)$$

$$W_r = \frac{V_r}{V} \quad (19)$$

در روابط فوق، V سرعت جریان آزاد و V_a, V_t, V_r بترتیب مولفه های سرعت در جهت محوری، مماسی و شعاعی هستند.

1-2-5- بررسی نتایج در مقطع شعاعی $\mathbf{r/R = 0.7}$

برای بررسی دنباله جریان، ابتدا به بررسی مقطع $r/R = 0.7$ پرداخته شده است. این مقطع از پره، معرف مناسبی برای جریان متوسط حول پره است و پارامترهای موضعی پره همچون ضریب فشار معمولاً در این مقطع استخراج می‌گردند. در شکل 9 و شکل 10، هر سه پارامتر دنباله جریان در مقایسه با مقادیر تجربی در مقاطع طولی $x/D = 0.1,0.2$ نشان داده شده‌است.

همانطور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، مولفه محوری و مماسی در حوالی $\theta = -27°$ دارای نقاط ماکزیمم و مولفه شعاعی دارای نقطه ماکزیمم و مینیمم در این محدوده می‌باشد. این جهش بدلیل وقوع جدایش و تشکیل گردابه در نوک پره می‌باشد. در شکل 10 این سه مولفه در فاصله دورتری نسبت به حالت قبل استخراج شده‌است. در این حالت و با دور شدن از پروانه، میزان تغییرات نسبت به حالت قبل کمتر شده و اثری از نقاط ماکزیمم و مینیمم، مشاهده نمی‌شود. مقادیر متوسط کمیت‌ها در این دو حالت تقریباً برابر است. همچنین نتایج بدست‌آمده در هر دو مقطع در مقایسه با نتایج تجربی از دقت قابل قبولی برخوردار است.

5-2-2- بررسی نتایج در مقطع شعاعی $r/R = 0.97$

مشابه حالت قبل، در این بخش نتایج در فاصله شعاعی نزدیک‌تری نسبت به نوک پره بررسی می‌شوند. این نتایج در شکل 11 و شکل 12 برای دو مقطع $x/D = 0.1,0.2$ ارائه شده‌است. اثر گردابه‌های تشکیل شده در نوک پره در این مقطع شعاعی بسیار شدیدتر از حالت قبل بوده و در نتیجه میزان تغییرات در حوالی $\theta = -27°$ زیادتر از حالت قبل است. در میان کمیت‌های

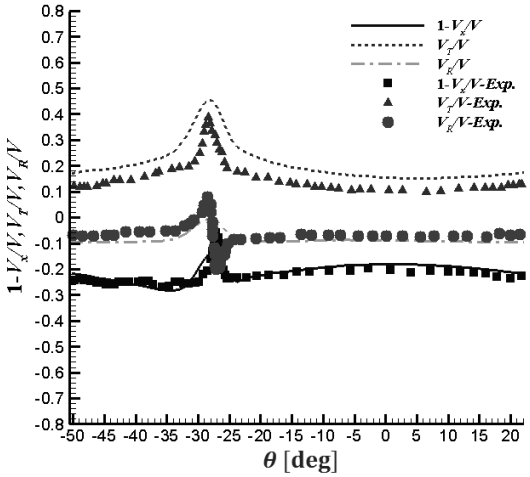


Fig. 9 Axial, tangential and radial components of the wake field in $r/R = 0.7, x/D = 0.1$

شکل 9 مولفه محوری، مماسی و شعاعی دنباله جریان در $r/R = 0.7, x/D = 0.1$

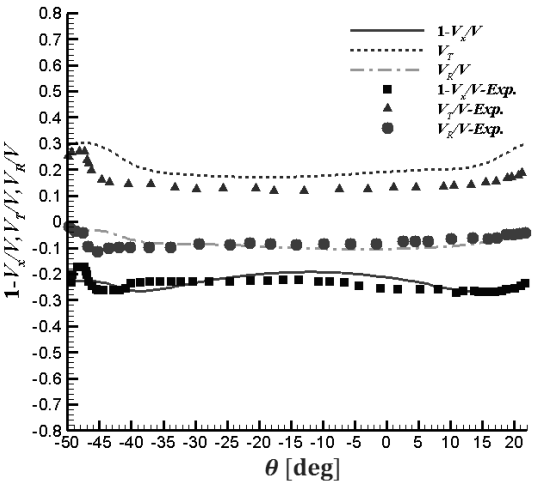


Fig. 10 Axial, tangential and radial components of the wake field in $r/R = 0.7, x/D = 0.2$

شکل 10 مولفه محوری، مماسی و شعاعی دنباله جریان در $r/R = 0.7, x/D = 0.2$

دنباله جریان، میزان تغییرات مولفه شعاعی در مقایسه با مقطع $r/R = 0.7$ بیشتر بوده که نشان از افزایش اثر ترم چرخش، نسبت به مقطع شعاعی پائین‌تر است. بر طبق نتایج بدست‌آمده، در ناحیه نوک پره، سرعت خطی تا 1.6 برابر سرعت ورودی افزایش می‌یابد. در خارج از این ناحیه، مقدار هر دو مولفه مماسی و محوری ناچیز است و عمده تغییرات تنها در مولفه شعاعی اتفاق می‌افتد. مشابه حالت قبل، میزان تغییرات در مقطع طولی دورتر، کمتر شده‌است. به علت چرخش جریان در این ناحیه، مقادیر اکسترمم مربوط به مولفه محوری و شعاعی در این مقطع در حوالی $\theta = 12°$تشکیل شده‌است. نتایج بدست آمده در کل ناحیه دنباله جریان در هر دو مقطع طولی، از تطابق نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است و نتایج تنها در تخمین مقادیر ماکزیمم و مینیمم برای مولفه محوری و مماسی، مقداری با نتایج تجربی اختلاف دارد.

5-2-3- بررسی نتایج در مقطع شعاعی $r/R = 1.0$

با افزایش فاصله شعاعی از $r/R = 0.97$ به $r/R = 1.0$ روند تغییرات

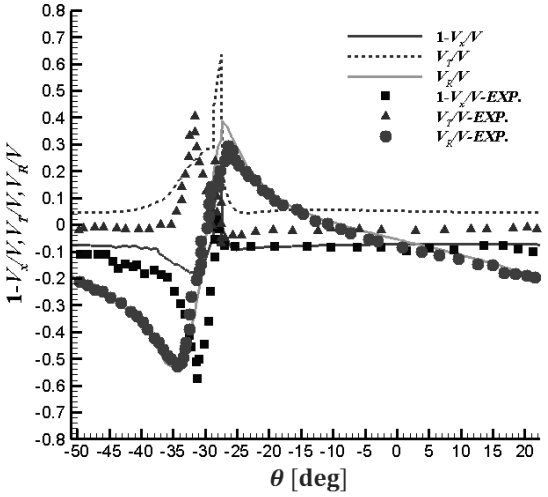


Fig. 11 Axial, tangential and radial components of the wake field in $r/R = 0.97, x/D = 0.1$

شکل 11 مولفه محوری، مماسی و شعاعی دنباله جریان در $r/R = 0.97, x/D = 0.1$

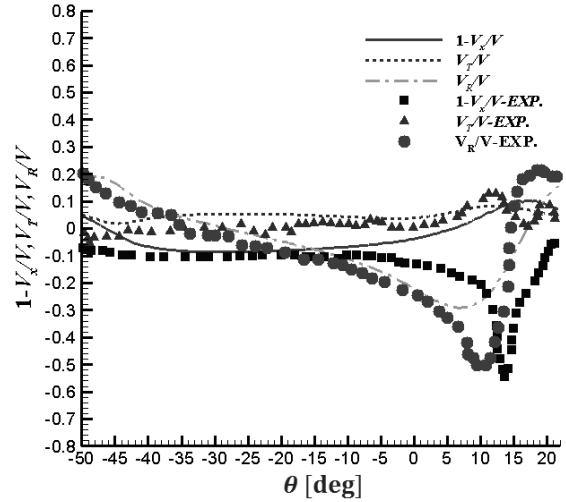


Fig. 12 Axial, tangential and radial components of the wake field in $r/R = 0.97, x/D = 0.2$

شکل 12 مولفه محوری، مماسی و شعاعی دنباله جریان در $r/R = 0.97, x/D = 0.2$

کمیت‌های دنباله‌جریان به کلی تغییر می‌کند و بر خلاف مقطع $r/R=0.97$ که نسبت به مقطع $r/R=0.7$ با افزایش دامنه تغییرات مواجه بود، در این حالت در مقطع $x/D=0.1$ مطابق شکل 13، میزان دامنه تغییرات مولفه مماسی و شعاعی کمتر شده و سرعت محوری در ناحیه نوک پره از 1.6 به 0.4 برابر سرعت ورودی کاهش می‌یابد. مشابه حالت قبل، مقادیر مولفه محوری و مماسی در خارج از ناحیه نوک پره تقریباً ناچیز است. در این حالت نیز همانند مقطع $r/R=0.97$ ، با افزایش فاصله از پروانه مطابق نتایج شکل 14، میزان تغییرات در هر سه مولفه کمتر شده و موقعیت زاویه‌ای مقادیر اکسترمم، جابجا شده‌است. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت که مقطع طولی دورتر، روند تغییراتی مشابه با مقطع بالادست خود اما با دامنه کمتر دارد. همچنین، موقعیت زاویه‌ای مقادیر بیشینه و کمینه مربوط به جدایش نوک پره در این مقاطع دچار جابجائی خواهد شد.

به منظور درک بهتر از نحوه تغییرات کمیت‌های جریان به خصوص سرعت و ورتیسیته در میدان حل، در شکل 15 نحوه تغییرات مقادیر این کمیت‌ها در صفحه $Y=0$ نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده

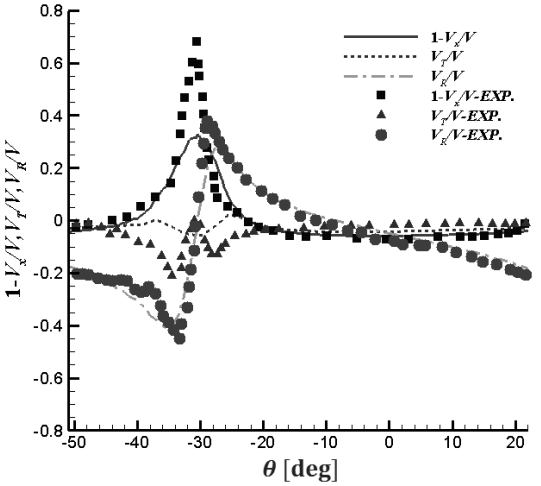


Fig. 13 Axial, tangential and radial components of the wake field in $r/R=1.0, x/D=0.1$

شکل 13 مولفه محوری، مماسی و شعاعی دنباله جریان در $r/R=1.0, x/D=0.1$

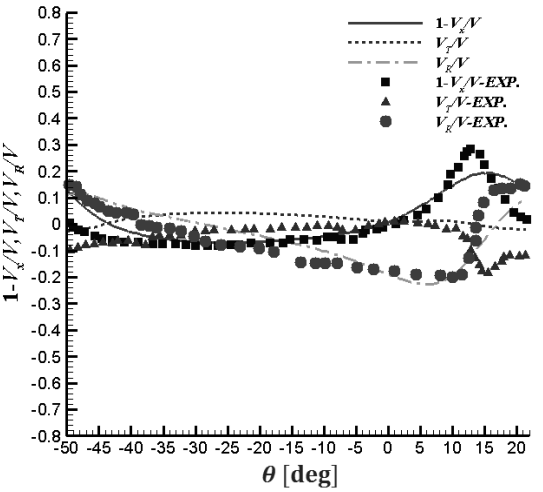


Fig. 14 Axial, tangential and radial components of the wake field in $r/R=1.0, x/D=0.2$

شکل 14 مولفه محوری، مماسی و شعاعی دنباله جریان در $r/R=1.0, x/D=0.2$

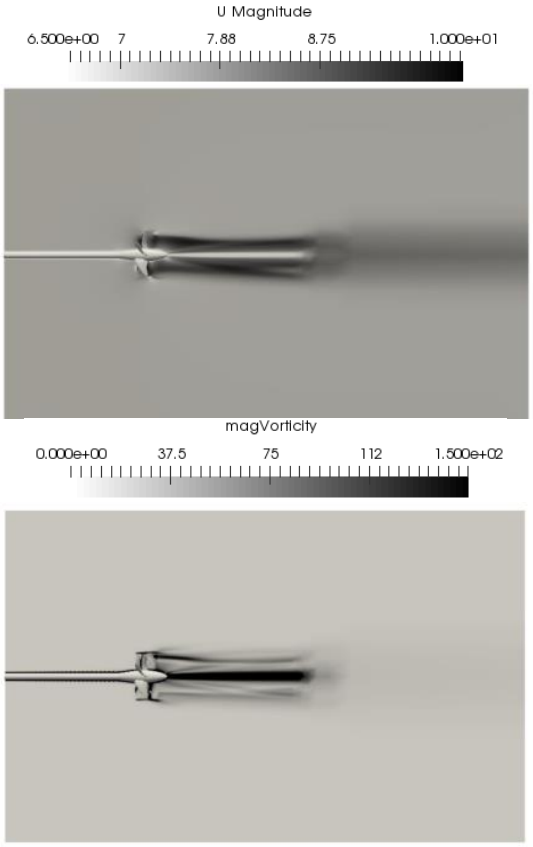


Fig. 15 Distribution of the velocity (m/s) and vorticity magnitude (1/s) at Y=0

شکل 15 توزیع اندازه سرعت بر حسب (m/s)(بالا) و ورتیسیته بر حسب (1/s)(پائین) در صفحه Y=0

می‌شود، در مرکز ناحیه ویک پروانه، مقادیر سرعت و ورتیسیته بترتیب دارای کمترین و بیشترین مقادیر خود هستند. بدلیل ریزبودن شبکه تا فاصله دو برابری گام پروانه، این تغییرات بخوبی در این فاصله مدل‌سازی شده‌است. همچنین به علت اعمال مولفه سرعت دورانی به جریان اطراف پروانه، یک توزیع سرعت شعاعی در ناحیه ویک جریان مشاهده می‌شود. در این ناحیه، مقدار سرعت از هسته مرکزی تا لبه پروانه افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله محوری از پروانه، در ناحیه پایین‌دست مقدار سرعت کل کاهش می‌یابد. سرعت جریان در ناحیه دور از میدان ویک، تقریباً ثابت و برابر سرعت جریان ورودی می‌باشد. نحوه تغییرات کانتور مقدار ورتیسیته که به نحوی بیانگر میزان تغییرات مولفه‌های سرعت در جهات مختلف است نیز نشان می‌دهد که این تغییرات تنها در لبه‌ی پره‌ها، نزدیکی دیواره‌ها و هسته مرکزی ناحیه ویک مقادیر قابل توجهی داشته و در سایر نواحی مقدار آن ناچیز خواهد بود.

6- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق، رفتار جریان سیال اطراف یک پروانه دریایی مورد مطالعه و بررسی عددی قرار گرفته‌است. مدل‌سازی، توسط نرم‌افزار متن باز اوپن فوم و با استفاده از حلگر سیمپل‌فوم انجام شده‌است. برای شبیه‌سازی جملات اغتشاشی در معادله مومنتوم، از مدل دو معادله‌ای کا-اپسیلون تحقق‌پذیر و مدل چهار معادله‌ای کا-اپسیلون وی-دو-اف استفاده شده‌است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در ضرایب پیشروی پائین و در نزدیکی حالت بولارد که جریان با زاویه‌حمله بالا به پروانه برخورد می‌کند، مدل دو معادله‌ای نتایج

نیرو و گشتاور را با خطای نسبتاً بزرگی نسبت به نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کند. اما با استفاده از مدل چهار معادله‌ای، این نتایج بهبود قابل توجهی پیدا خواهندکرد. علت اختلاف بین نتایج دو مدل اغتشاشی، عدم توانایی پیش‌بینی صحیح جدایش جریان در زوایای حمله بالا توسط مدل دو معادله‌ای است. با افزایش ضریب پیشروی و کاهش زاویه‌حمله جریان ورودی به مقطع پروانه، اختلاف بین نتایج دو مدل کاهش می‌یابد. در این تحقیق، دنباله‌جریان در حالت دائم در مقاطع طولی و شعاعی مختلف نیز بررسی شده‌است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش فاصله محوری از پروانه مطابق شکل 16، اثر گردابه‌های نوک پره در پائین‌دست سریعاً کاهش می‌یابد. همچنین رفتار جریان در این مقاطع، همانند مقطع مشابه بالادست بوده اما میزان تغییرات آن کمتر خواهد بود. به علت وجود چرخش در ناحیه دنباله پروانه، مکان زاویه‌ای نقاط اکسترمم در منحنی‌های دنباله جریان جابجا می‌شود.

بررسی دنباله جریان پروانه نشان می‌دهد که با حرکت در جهت شعاعی، دامنه تغییرات افزایش می‌یابد و این افزایش از هاب پروانه تا $r/R = 0.97$ ادامه می‌یابد. همچنین بررسی نتایج بدست آمده در نزدیکی نوک پره نشان می‌دهد که تغییرات سرعت محوری با افزایش شعاع، در این ناحیه بسیار شدید است. سهم مولفه محوری و شعاعی در خارج از ناحیه گردابه نوک پره، در همه مقاطع تقریباً ناچیز است. بطور کلی روند تغییرات در راستای شعاعی بسیار شدیدتر از راستای طولی است. در شکل 17 کانتور مقدار ورتیسیته در مقاطع شعاعی $r/R = 0.7,0.97,1.0$ در $J = 1.25$ نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله شعاعی تا مقطع $r/R = 0.97$ انتشار میدان ورتیسیته در پائین‌دست، افزایش یافته و پس از آن کمی کاهش پیدا می‌کند. همچنین در این فاصله مقدار این کمیت نیز در حوالی پره، با افزایش شعاع بیشتر می‌شود.

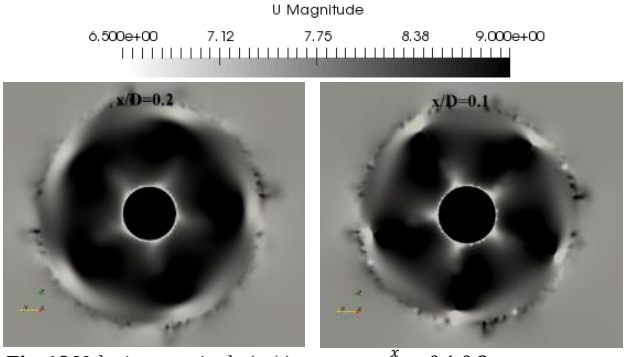


Fig. 16 Velocity magnitude (m/s) contour at $\frac{x}{D} = 0.1,0.2$

شکل 16 کانتور اندازه سرعت بر حسب (m/s) در $x/D = 0.1,0.2$

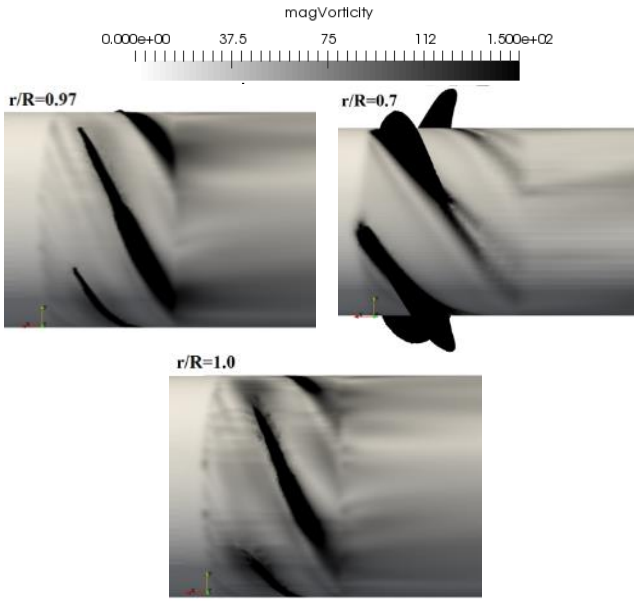


Fig. 17 Vorticity magnitude (1/s) contour at $r/R = 0.7,0.97,1.0$

شکل 17 کانتور مقدار ورتیسیته بر حسب (1/s)در $r/R = 0.7,0.97,1.0$

نویسندگان مقاله همچنین علاقمند به بررسی جریان غیردائم پشت این پروانه و بررسی روش‌های مناسب و بهینه، جهت شبیه‌سازی عددی دنباله غیردائم هستند و نتایج آن در آینده نزدیک منتشر خواهد شد.

7- فهرست علایم

J	ضریب پیشروی
K_T	ضریب تراست پروانه در حالت آب آزاد
K_Q	ضریب گشتاور پروانه در حالت آب آزاد
n	سرعت دورانی پروانه (rps)
R, D	شعاع و قطر پروانه (m)
r	فاصله شعاعی از محور پروانه (m)
Re	عدد رینولدز
V_a	سرعت خطی (ms^{-1})
W_a	مولفه سرعت محوری
W_r	مولفه سرعت شعاعی
W_t	مولفه سرعت مماسی
x	فاصله طولی از محور پروانه (m)

علایم یونانی

α	زاویه حمله ظاهری پروانه (^{o})
β	زاویه گام هیدرودینامیکی (^{o})
φ	زاویه گام پره (^{o})
η	راندمان پروانه

8- تقدیر و تشکر

محاسبات انجام شده در این تحقیق، در مرکز پردازش فوق سریع دانشگاه صنعتی مالک اشتر انجام شده که بدین وسیله از زحمات آن‌ها تشکر و قدردانی می‌شود.

9- مراجع

[1] J. S. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, third edition, pp. 435-464, Amsterdam, Netherland: Elsevier, 2012.
[2] V. Bertram, *Practical Ship Hydrodynamics*, pp. 37-61, Oxford, U.K: Butterworth-Heinemann, 2012.
[3] A. F. Molland, *The Maritime Engineering Reference Book*, first edition edition, pp. 181-343, Oxford, U.K: Butterworth-Heinemann, 2008.
[4] B. M. Idris, H. Maruo, M. Ikehata, Theoretical analysis of unsteady characteristics of marine propeller in ship's wake, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 1984, No. 156, pp. 60-68, 1984 .
[5] G. K. Politis, Simulation of unsteady motion of a propeller in a fluid including free wake modeling, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 28, No. 6, pp. 633-653, 2004.
[6] S. Gaggero, D. Villa, M. Viviani, An Investigation on the discrepancies between RANSE and BEM approaches for the prediction of marine propeller unsteady performances in strongly non-homogeneous wakes, *ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, San Francisco, California, USA, pp. V002T08A048, June 8–13, 2014.
[7] H. G. R. Shamsi, A BEM/RANS coupled method for numerical simulations

of podded drive system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 65-76, 2017. (in Persian فارسی)

[8] M. Hughes, S. Kinnas, J. Kerwin, Experimental validation of a ducted propeller analysis method, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 114, No. 2, pp. 214-219, 1992.

[9] A. Stella, G. Guj, F. Di Felice, M. Elefante, Experimental investigation of propeller wake evolution by means of LDV and flow visualizations, *Journal of Ship Research*, Vol. 44, No. 3, pp. 155-169, 2000 .

[10] S. I. Park, S. J. Lee, G. S. You, J. C. Suh, An experimental study on tip vortex cavitation suppression in a marine propeller, *Journal of Ship Research*, Vol. 58, No. 3, pp. 157-167, 2014.

[11] S. Geerts, *Experimental and Numerical Study of an Axial Flow Pump*, Doctor of Engineering Sciences Thesis, Fluid Mechanics and Thermodynamics Faculty of Applied Sciences, Vrije Universiteit Brussel, Belgium 2006.

[12] N. Chase, P. M. Carrica, Submarine propeller computations and application to self-propulsion of DARPA Suboff, *Ocean Engineering*, Vol. 60, No. 12, pp. 68-80, 2013.

[13] R. Muscari, A. Di Mascio, R. Verzicc, Modeling of vortex dynamics in the wake of a marine propeller, *Computers & Fluids*, Vol. 73, No. 12, pp. 65-79, 2013.

[14] A. Escue, J. Cui, Comparison of turbulence models in simulating swirling pipe flows, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, No. 10, pp. 2840-2849, 2010.

[15] S. Galván, M. Reggio, F. Guibault, Assessment study of K-Epsilon turbulence models and near-wall modeling for steady state swirling flow analysis in draft tube using fluent, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 5, No. 4, pp. 459-478, 2011.

[16] M. Bennaya, J. F. Gong, M. M. Hegaze, W. P. Zhang, Numerical simulation of marine propeller hydrodynamic performance in uniform inflow with different turbulence models, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 389, No .1 ,pp. 1019-1025, 2013.

[17] A. Vali, B. Saranjam, R. Kamali, A. Rabiee, Numerical analysis of the propeller performance close to water surface, *Modares Mechanica lEngineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 291-299, 2016. (in Persian فارسی)

[18] D. Cokljat, S. E .Kim, G. Iaccarino, P. Durbin, A comparative assessment of the V2F model for recirculating flows, *Proceeding of 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 765.

[19] A. Sveningsson, L. Davidson, Computations of flow field and heat transfer in a stator vane passage using the v2− f turbulence model, *Journal of turbomachinery*, Vol. 127, No. 3, pp. 627-634, 2005.

[20] *Ansys Fluent User Guide, Technical Report Release 16.1, ANSYS Inc.*, pp. 9-21, 2015.

[21] P. A. Durbin, Near-wall turbulence closure modeling without damping functions, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-13, 1991.

[22] S. Parneix, P. A. Durbin, M. Behnia, Computation of 3-D turbulent boundary layers using the V2F model, *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 60, No. 1, pp. 19-46, 1998.

[23] L. Davidson. *Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling*, Accessed on 15 June 2015 http://www.tfd.chalmers.se/~lada/MoF/lecture notes.html.

[24] P. Durbin, Application of a near-wall turbulence model to boundary layers and heat transfer, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 14, No. 4, pp. 316-323, 1993.

[25] T. Maric, J. Hopken, K. Mooney, *The OpenFOAM technology primer*, first edition edition, pp. 379-427, haftungschrankt: sourceflux UG, 2014.

[26] U. Barkmann, H.-J. Heinke, L. Lübke, Potsdam Propeller Test Case (PPTC), *Proceeding of the Second International Symposium on Marine Propulsors - smp'11,* Hamburg, Germany: Institute for Fluid Dynamics and Ship Theory (FDS) - Hamburg University of Technology (TUHH), German Society for Maritime Technology (STG) pp. 36-38, 2011.

[27] E. A. Pifer, G. Bramesfeld, Measuring wing profile drag using an integrating wake rake, *Technical Soaring*, Vol. 36, No. 3, pp. 74-82, 2013.