



## شبیه‌سازی عددی غیردائم جریان دنباله یک پروانه دریائی با استفاده از مدل URANS

محمدرضا نظری<sup>1\*</sup>، امین طالع زاده شیرازی<sup>2</sup>، مجتبی دهقان منشادی<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- دانشجوی دکتری، 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: 17 خرداد 1396  
پذیرش: 16 مرداد 1396  
ارائه در سایت: 17 شهریور 1396

کلید واژگان:

پروانه دریایی

شبیه‌سازی دنباله جریان

آشکارسازی گردابه

شبیه‌سازی غیردائم

الگوی جریان

### چکیده

بررسی میدان جریان پشت پروانه‌های دریایی به دلیل کاربرد فراوان در شناسائی شناورها و تخمین نویز هیدرودینامیکی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در تحقیق حاضر، جریان دائم و غیردائم دنباله یک پروانه دریایی توسط معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز با نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم و حلگرهای سیمپل‌فوم و پیمپل‌دایم‌فوم شبیه‌سازی شده است. نتایج به‌دست آمده از منحنی عملکرد و دنباله جریان نزدیک پروانه با داده‌های آزمایشگاهی موجود اعتبارسنجی شده است که تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهد. نتایج مطالعه شبکه در ناحیه دنباله نشان می‌دهد که برخلاف کمیت‌های کلی جریان، شبکه استفاده شده در این ناحیه به شدت بر روی نتایج میدان دنباله تأثیرگذار است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل‌سازی دائم به روش معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی مناسب بوده و با هزینه محاسباتی کمتر و دقت مناسب نسبت به روش غیردائم نتایج را پیش‌بینی می‌کند. از طرف دیگر، بررسی صحیح نوسانات جریان و ناپایداری‌های جریان گردابه‌ای، تنها با انجام شبیه‌سازی‌های غیردائم و شبکه مناسب امکان‌پذیر است. در این مقاله همچنین اثر ضریب پیشروی بر ساختار جریان گردابه‌ای در ناحیه دنباله بررسی شده است. مقایسه کیفی نتایج این تحقیق و نتایج مشابه موجود از مدل دقیق‌تر شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده نشان می‌دهد که روش معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز غیردائم به شرط استفاده از شبکه مناسب، توانایی بسیار بالایی در مدل‌سازی میدان دنباله دارد. این روش حجم شبکه موردنیاز و زمان اجرا را ضمن حفظ دقت نتایج، به میزان بسیار چشمگیری کاهش می‌دهد.

## Numerical Simulation of the Unsteady Wake Flow around a Marine Propeller Using URANS Model

Mohammad Reza Nazari<sup>1\*</sup>, Amin Talezade Shirazi<sup>1</sup>, Mojtaba Dehghanmanshadi<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2- Department of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

\* P.O.B. 8195818411, Yazd, Iran, mnazari@yazd.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

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

#### Keywords:

Marine propeller  
Wake simulation  
Vortex visualization  
unsteady simulation  
Flow pattern

### ABSTRACT

The flow field investigation around marine propellers is of great importance, due to its applications in vessels identification and hydrodynamic noise prediction. In the present research, the steady and unsteady wake flow field was simulated using the RANS equations with the open-source OpenFOAM software and the simple-Foam and Pimple-DyMFoam solvers. The obtained characteristic chart and near propeller wake flow results were validated against available experimental data, and were shown to be in a very good agreement. The grid study results in the wake region prove that unlike global quantities, the employed wake grid strongly affects the wake parameters. The results obtained from the present research show that employing the RANS models is suitable for the hydrodynamic coefficients calculation and these models predict the results with a low computational cost against the Unsteady RANS approach. On the other hand, an accurate investigation of the flow fluctuations and the vortex flow instabilities can only be accrued performing unsteady simulations with an appropriate refined grid. In this research, the effect of advance coefficient is also investigated on the vortex flow pattern in the wake region. Qualitative comparison of the obtained results and similar available data of the more accurate DES turbulence model shows that the URANS method has great capabilities in wake flow simulation provided that a suitable grid is applied. This method significantly decreases the required cells number and run time while maintaining the results accuracy.

### 1- مقدمه

بررسی جریان و استخراج منحنی عملکرد آن‌ها، از دیرباز مورد توجه محققین این حوزه بوده است. یکی از موارد مهم در بررسی رفتار جریان اطراف این نوع پروانه‌ها، پس از استخراج مشخصات عملکردی آن‌ها، بررسی دنباله جریان در ناحیه دنباله جریان پروانه است که در طراحی، شناسایی شناور و تخمین نویز

به‌منظور 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 به‌دلیل کاربردهای فراوان،

Please cite this article using:

M. R. Nazari, A. Talezade Shirazi, M. Dehghanmanshadi, Numerical Simulation of the Unsteady Wake Flow around a Marine Propeller Using URANS Model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 175-184, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

هیدرودینامیکی 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 دنباله پروانه از مسائل پیچیده حوزه دریایی به شمار می‌رود.

در خصوص اصول حاکم بر طراحی و تحلیل هیدرودینامیکی پروانه‌ها مطالعات زیادی انجام شده است [2,1]. همچنین مطالعات زیادی در خصوص جریان دنباله شناورهای زیرسطحی بدون در نظر گرفتن سیستم رانش انجام شده است [4,3]. در مورد مدل‌سازی دنباله جریان پشت پروانه در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن بدنه نیز بررسی‌های فراوانی انجام شده است. در مرجع [5] با اعمال فرضیات ساده‌کننده به حل تحلیلی میدان دنباله یک کشتی با استفاده از مدل سطوح بر<sup>1</sup> روی شبکه گردابه‌ای پرداخته شده است. برای مدل‌سازی دنباله پروانه از روش‌های نسبتاً سریع مانند المان مرزی نیز می‌توان استفاده کرد [7,6]. اخیراً، روش‌های ترکیبی المان مرزی و معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز نیز ارائه شده است [8]. به دلیل پیچیدگی‌های هندسی و فیزیکی مرتبط با پروانه و همچنین تجهیزات پیشرفته موردنیاز، مطالعات تجربی محدودی روی جریان دنباله پروانه‌ها انجام شده است. این مطالعات عمدتاً در تونل آب و با استفاده از ابزار سرعت‌سنجی داپلر به وسیله لیزر<sup>2</sup> و تجهیزات آشکارسازی جریان انجام شده است [9-11]. فلی و همکاران [12] در یک تحقیق جامع تجربی ساختار حاکم بر دنباله جریان پشت پروانه را در یک تونل آب مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، مکانیزم‌های تکامل گردابه‌های نوک پره<sup>3</sup> و هاب<sup>4</sup> در ناحیه گذار مورد بررسی قرار گرفته است. اثر تعداد پره‌های پروانه با ثابت نگه داشتن هندسه پره نیز در این تحقیق بررسی شده است. به علاوه، مکانیزم چند مرحله‌ای، جمع شدن و یکی شدن گردابه‌های نوک پره در ناحیه دور دست نیز در این تحقیق مورد بحث و بررسی قرار گرفته و فیزیک پیچیده حاکم بر جریان دنباله به خوبی تشریح شده است. به دلیل محدودیت‌های اشاره شده در حوزه بررسی دنباله جریان، در برخی مراجع، نتایج نیرویی به روش تجربی به دست آمده و نتایج مربوط به میدان دنباله به 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 [13] پس از ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی منحنی عملکرد پروانه با نتایج آزمایشگاهی، نتایج مربوط به توزیع سرعت محوری، انرژی جنبشی توربولانسی و پارامترهای مربوط به ویک جریان در مقاطع مختلف به روش عددی بررسی شده است. با توجه به محدودیت‌های تجربی اشاره شده و نیاز به دقت بالا در شبیه‌سازی دنباله جریان و پیشرفت تجهیزات سخت‌افزاری موردنیاز در دهه‌های اخیر، روش‌های عددی به عنوان یکی از مناسب‌ترین روش‌ها در این زمینه مطرح شده‌اند. چیس و کریا [14] به بررسی دنباله جریان پشت پروانه زیردریایی با استفاده از نرم‌افزار سی‌اف‌دی شیب‌آیو<sup>5</sup> 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<sup>6</sup>، شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده<sup>7</sup> و مدل

شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده تاخیری<sup>8</sup> استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اولاً، تراکم بیشتر شبکه بر روی نتایج نیرویی و گشتاوری تاثیر چندانی ندارد ولی بر روی نتایج شبیه‌سازی دنباله جریان به شدت تاثیرگذار است. ثانیاً، شبیه‌سازی با استفاده از مدل ادی‌های جدا شده تاخیری به دلیل عدم پیش‌بینی بیش از حد جدایش نسبت به مدل شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده، نتایج بهتری ارائه می‌کند. موسکاری و همکاران [15] به مدل‌سازی دینامیکی گردابه در ناحیه دنباله پروانه به کمک دو مدل متوسط‌گیری شده رینولدز و مدل شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده پرداختند. در این تحقیق برخی از نتایج تجربی به دست آمده در مرجع [12] به روش عددی باز تولید و صحت‌سنجی شده است. نتایج این تحقیق 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 جدا شده 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 جدا شده در این خصوص بسیار دقیق‌تر عمل می‌کند. در این مقاله شبیه‌سازی دائم با استفاده از روش معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز و مدل اسپالارت-آلماراس<sup>9</sup> و شبیه‌سازی غیردائم با مدل شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده انجام شده است که از این منظر مقایسه نتایج دنباله در این دو حالت صحیح به نظر نمی‌رسد و دقت بیشتر مدل شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده 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 شده است. بررسی جریان چرخشی داخل لوله با استفاده از دو مدل کا-اِپسیلون آر-ان-جی<sup>10</sup> و مدل تنش رینولدز<sup>11</sup> در مرجع [16] انجام شده است. بنایا و همکاران [17] مشخصات عملکردی یک پروانه را با استفاده از شش مدل اغتشاشی مختلف بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تقریباً همه مدل‌ها نتایج قابل قبولی را در حوالی نقطه‌کاری پروانه ارائه می‌کنند. در تمامی ضرایب مدل کا-اِپسیلون آر-ان-جی کمترین و مدل استاندارد کا-امگا<sup>12</sup> بیشترین خطا را نسبت به سایر مدل‌ها دارند.

بررسی تاریخیچه مطالعات انجام شده در حوزه پروانه‌های دریایی نشان می‌دهد که در مورد استخراج دنباله جریان پشت پروانه، مطالعات تجربی بسیار محدودی در این زمینه انجام شده و مطالعات عددی انجام شده عموماً توسط مدل‌های خانواده شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ<sup>13</sup> بوده که هزینه محاسباتی بسیار بالایی دارند. هدف از تحقیق حاضر، بررسی کارایی روش غیردائم معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز<sup>14</sup> در مقایسه با مدل‌های خانواده شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ و به‌طور خاص مدل شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده در پیش‌بینی میدان دنباله است. بدین منظور نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی غیردائم نرم‌افزار اوپن‌فوم به‌طور کیفی با نتایج مدل‌سازی ادی‌های جدا شده یک پروانه مشابه، مقایسه شده است. در این تحقیق همچنین اثر ضریب پیشروی بر ساختار دنباله جریان مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین به منظور مقایسه دقت نتایج ضرایب هیدرودینامیکی پروانه، شبیه‌سازی‌های

<sup>8</sup> Delayed Detached-Eddy Simulation (DDES)

<sup>9</sup> Spalart Allmaras (SA)

<sup>10</sup>  $RNG - k - \epsilon$

<sup>11</sup> Reynolds Stress Model (RSM)

<sup>12</sup>  $k - \omega$

<sup>13</sup> Large Eddy Simulation (LES)

<sup>14</sup> Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes (URANS)

<sup>1</sup> Lifting surface

<sup>2</sup> Laser Doppler Velocimetry (LDV)

<sup>3</sup> Tip Vortex

<sup>4</sup> Hub Vortex

<sup>5</sup> CFD Ship-Iowa

<sup>6</sup> Reynolds Average Navier-Stokes (RANS)

<sup>7</sup> Detached-Eddy Simulation (DES)

مربوطه در هر دو حالت دائم و غیردائم انجام شده است.

## 2- معادلات حاکم و روش حل

همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، برای مدل‌سازی میدان جریان در ناحیه دنباله معمولاً از مدل‌های اغتشاشی خانواده ادی‌های بزرگ استفاده می‌شود. این مدل برای شبیه‌سازی جریان‌های با ساختار گردابه‌های اغتشاشی بزرگ مناسب بوده و حتی با شبکه نسبتاً درشت نیز جواب‌های خوبی ارائه می‌دهد. در حالتی که بررسی جریان در نزدیکی دیواره با جدایش جریان مورد نظر باشد، این مدل تنها با استفاده از شبکه بسیار ریز پاسخ‌های قابل قبولی خواهد داد که در این حالت حجم شبکه مورد نیاز و زمان انجام محاسبات، فوق‌العاده زیاد خواهد بود. به همین دلیل مدل‌های اغتشاشی زیادی در این زمینه توسعه داده شده‌اند که در این میان می‌توان به دو مدل ادی‌های جدا شده و شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده تاخیری اشاره کرد. گزینه دیگر در مدل‌سازی این نوع مسائل، استفاده از مدل‌های معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز در حالت غیردائم است. این مدل، همان روش متداول معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز است که ترم زمانی آن در متوسط‌گیری همچنان حفظ شده است [18]. در این معادلات متغیرهای وابسته علاوه بر ترم مکانی، همچنان به زمان نیز وابسته هستند. انتخاب مدل مناسب در روش معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز به نوع جریان نیز بستگی دارد. مدل کا-اِپسیلون استاندارد به دلیل نرخ تلفات اغتشاشی بالا توصیه نمی‌شود. لازم به ذکر است که معادله مومنتوم استفاده شده در هر دو روش معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز غیردائم و مدل ادی‌های بزرگ دقیقاً یکی بوده و تنها تفاوت در تعریف ویسکوزیته اغتشاشی استفاده شده در این دو مدل است. جزئیات بیشتر در مورد این روش در مرجع [18] ارائه شده است.

معادلات حاکم بر جریان سیال، در حالت سه بعدی، غیردائم و تراکم‌ناپذیر به فرم معادلات (1) و (2) ارائه می‌شوند. زیرنویس  $i, j$  در معادلات بیانگر جهت در راستای دستگاه مختصات می‌باشد.

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \quad (2)$$

در معادلات (1) و (2)،  $\bar{u}_i, x_i$  به ترتیب متوسط سرعت و مکان در جهت  $i$  بوده و  $\bar{p}, \rho, \mu$  به ترتیب مقادیر فشار متوسط، چگالی و لزجت را نشان می‌دهند. در این تحقیق، برای مدل‌سازی جمله مربوط به تنش رینولدز از مدل دو معادله-ای کا-اِپسیلون تحقیق‌پذیر<sup>1</sup> استفاده شده است. لازم به ذکر است که در مرجع [19] انتخاب مدل اغتشاشی مناسب جهت شبیه‌سازی جریان‌های چرخشی به عدد چرخش وابسته شده که طبق رابطه (3) بیان می‌شود.

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

در رابطه (3)،  $r$  فاصله هر نقطه از محور دوران،  $\omega$  سرعت دورانی،  $\vec{V}$  بردار سرعت روی المان  $\vec{dA}$  و  $R$  شعاع هیدرولیکی است. این عدد نسبت شار مومنتوم زاویه‌ای به شار محوری مومنتوم محوری را بیان می‌کند. برای جریان‌هایی با قدرت چرخش پائین ( $S < 0.5$ ) هر دو مدل کا-اِپسیلون تحقیق‌پذیر و کا-اِپسیلون آر-ان-جی جواب‌های بهتری نسبت به مدل کا-اِپسیلون استاندارد ارائه می‌کنند. برای جریان‌های با قدرت چرخش بالا ( $S > 0.5$ ) استفاده از مدل مدل تنش رینولدز به شدت توصیه شده است. در

تحقیق حاضر عدد چرخش در حدود 0.15 بوده، فلذا از مدل کا-اِپسیلون تحقیق‌پذیر استفاده شده است. این روش جریان اغتشاشی را براساس دو معادله انرژی جنبشی اغتشاشی ( $k$ ) و نرخ اتلاف انرژی اغتشاشی ( $\varepsilon$ ) مدل‌سازی می‌کند که روابط آن طبق معادلات (4) و (5) ارائه می‌شوند. ویسکوزیته اغتشاشی از رابطه (6) محاسبه می‌شود.

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

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

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

همان‌طور که اشاره شد، برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار این‌فوم استفاده شده است. این نرم‌افزار یک ابزار 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 شده است. همچنین به دلیل متن باز بودن برنامه، امکان اضافه کردن و اعمال تغییرات در این حلگرها وجود دارد. برای مدل‌سازی چرخش پروانه در حالت دائم و غیردائم به ترتیب از حلگرهای سیمپل فوم<sup>2</sup> و پیمپل دایم فوم<sup>3</sup> استفاده شده است. این حلگرها برای شبیه‌سازی جریان‌های اغتشاشی تراکم‌ناپذیر استفاده می‌شود. گسسته‌سازی زمانی در حالت غیردائم به روش اوپلر<sup>4</sup> بوده و برای محاسبه گرادیان‌ها در هر دو حالت از الگوریتم خطی گاوس<sup>5</sup> استفاده شده است. همچنین الگوریتم استفاده شده برای معادلات فشار در هر دو حالت، حلگر چند شبکه‌ای<sup>6</sup> بوده است. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی جریان اطراف پروانه، میدان حل به دو ناحیه تقسیم می‌شود که در حل دائم تنها معادلات حاکم در ناحیه نزدیک پروانه اصلاح شده و جملات مربوط به شتاب کریولیس در روابط اضافه می‌شود، اما در شبیه‌سازی غیردائم موقعیت مکانی این دو ناحیه برحسب زمان متغیر بوده و ناحیه نزدیک پروانه در حال چرخش است. جزئیات بیشتر در مورد نحوه شبیه‌سازی اجسام دوار در نرم‌افزار این‌فوم در مرجع [20] ارائه شده است. همچنین معیار همگرایی باقیمانده‌ها در همه حالات شبیه‌سازی برابر  $10^{-5}$  در نظر گرفته شده است. مشخصات هیدرودینامیکی پروانه‌ها معمولاً به صورت ضرایب بی‌بعد تراست و گشتاور ( $K_T, K_Q$ ) و راندمان ( $\eta$ ) برحسب ضریب بدون بعد پیشروی ( $J$ ) بصورت رابطه (7) بیان می‌شود. همچنین عدد رینولدز<sup>7</sup> ( $Re$ )، براساس مجموع برداری سرعت خطی و دورانی در  $r/R = 0.7$  تعریف شده است.

$$J = \frac{U}{nD} \\ K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \\ \eta = \frac{J}{2\pi} \times \frac{K_T}{K_Q} \\ Re = \frac{c_{0.7}}{\nu} \sqrt{V^2 + (0.7 \times \pi D n)^2} \quad (7)$$

## 3- معرفی هندسه و شرایط مرزی

هندسه پروانه استفاده شده در این تحقیق یک پروانه گام کنترل<sup>8</sup> است که مشخصات کلی آن در جدول 1 ارائه شده است. مطالعات انجام شده در این تحقیق در گام ثابت انجام شده است. پروانه استفاده شده، یک پروانه راستگرد

<sup>2</sup> Simple-Foam

<sup>3</sup> Pimple-DyMFoam

<sup>4</sup> Euler

<sup>5</sup> Gauss Linear Algorithm

<sup>6</sup> Multi-grid

<sup>7</sup> Reynolds number

<sup>8</sup> Controllable Pitch Propeller (CPP)

<sup>1</sup> Realizable  $k - \varepsilon$

از دیرباز مطالعات فراوانی در این زمینه انجام شده است. تاکنون سه روش کلی برای شناسایی و تشخیص میدان گردابه ارائه شده است [22].

1- روش فشار کمینه<sup>2</sup>

2- روش خطوط بسته جریان و مسیر<sup>3</sup>

3- روش سطوح هم‌ورتیسیته<sup>4</sup>

با استفاده از روش‌های فوق معیارهای مختلفی برای شناسایی و تشخیص میدان گردابه‌ای همانند معیار  $Q^5$ ، معیار  $\Delta$  و معیار لامبدا<sup>6</sup> استخراج می‌شود [23، 24]. در مرجع [25] به بررسی انواع روش‌های موجود جهت شناسایی گردابه‌ها پرداخته شده و نقاط قوت و ضعف هر یک مورد مطالعه قرار گرفته است.

در تحقیق حاضر از معیار  $Q$  برای آشکارسازی میدان گردابه استفاده شده است. این تانسور، میدان جریان گردابه‌ای را به‌صورت یک ناحیه پیوسته با مقادیر مثبت نامتغیر دوم میدان گرادیان سرعت تعریف می‌کند. طبق این تعریف، تانسور گرادیان سرعت که به‌صورت رابطه (8) بیان می‌شود، به دو بخش متقارن و پاد-متقارن طبق معادله (9) تفکیک می‌گردد.

$$D_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$D_{ij} = S_{ij} + \Omega_{ij} \quad (8)$$

که در آن  $S_{ij}$  تانسور متقارن نرخ کرنش بوده و از رابطه (10) محاسبه می‌شود. همچنین  $\Omega_{ij}$  طبق معادله (11)، بیانگر بخش پاد-متقارن تانسور گرادیان سرعت بوده که به عنوان تانسور ورتیسیته شناخته می‌شود.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

با تفکیک نامتغیرهای تانسور گرادیان سرعت، پارامتر  $Q$  طبق رابطه (12) تعریف می‌شود که بیانگر ناحیه‌ای از میدان جریان سیال است که مقدار ورتیسیته از مقدار نرخ کرنش بزرگتر می‌شود. معمولاً این کمیت در ناحیه میدان حل، به‌صورت صفحات با مقدار ثابت  $Q$  نشان داده می‌شود.

$$Q = \frac{1}{2} (\|\bar{\Omega}\|^2 - \|\bar{S}\|^2) > 0 \quad (11)$$

#### 5- بررسی دامنه حل و مطالعه شبکه

به منظور تولید شبکه و شبیه‌سازی میدان جریان سیال اطراف پروانه، از یک دامنه حل استوانه‌ای به صورت "شکل 2" استفاده شده است. مقادیر انتخاب شده در شبیه‌سازی برای طول بالادست، طول پائین‌دست و قطر میدان، به‌ترتیب برابر  $2.5D$ ،  $10D$ ،  $4.5D$  بوده است. مطابق "شکل 2"، از یک ناحیه سیلندری شکل در نزدیکی امتداد نوک پره و هاب برای ریزتر کردن شبکه در این نواحی استفاده شده است. اصولاً در طراحی پروانه، رفتار میدان ویک تا فاصله دو برابری گام پروانه در پائین‌دست مهم بوده و نتایج آن بر روی طراحی اثرگذار است [26، 1]. لذا شبیه‌سازی میدان دنباله معمولاً تا این فاصله انجام می‌شود [15]. در تحقیق حاضر نیز شبکه تا همین فاصله محوری پشت پروانه ریز شده است.

برای تولید شبکه از ابزار اسنپی‌هگزمش<sup>7</sup> موجود در نرم‌افزار اوپن‌فوم استفاده شده است. این ابزار، امکان تولید شبکه با سازمان روی هندسه‌های پیچیده را فراهم کرده است. به‌علت بزرگ شدن تدریجی شبکه، ضمن حفظ

پنج پره‌ای بوده و نمای کلی آن در "شکل 1" نشان داده شده است. جزئیات بیشتر در مورد پروانه انتخاب شده در مرجع [21] ارائه شده است. در این مرجع، نتایج تجربی تست حوضچه کشش برای استخراج منحنی عملکرد و همچنین نتایج آزمون تونل آب به منظور بررسی جریان در ناحیه دنباله پروانه وجود دارد که در این تحقیق برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی عددی از آن استفاده شده است. جزئیات کامل در مورد مشخصات حوضچه کشش و تونل آب استفاده شده و همچنین روند انجام آزمون‌ها در این مرجع بیان شده است.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، برای ورودی از شرط سرعت ثابت و مشتق صفر برای فشار استفاده شده است. همچنین در خروجی، شرط مرزی فشار ثابت و مشتق صفر برای سرعت به‌کار گرفته شده است. شافت و پروانه دارای شرط دیوار با فرض عدم لغزش هستند. در شبیه‌سازی غیردائم از شرط مرزی پرئودیک با شبکه دلخواه<sup>1</sup> برای ناحیه لغزان بین ناحیه دوار و ساکن استفاده شده است.

#### 4- روش‌های شناسایی میدان گردابه

از آن‌جا که هدف اصلی این تحقیق، بررسی جریان و رفتار گردابه‌های تشکیل شده در ناحیه پشت پروانه می‌باشد، در این بخش به‌طور مختصر به معرفی روش‌های مختلف شناسایی گردابه‌ها پرداخته شده است. به‌طور کلی، آشکارسازی میدان گردابه از مباحث پیچیده در حوزه مکانیک سیالات بوده و

جدول 1 مشخصات هندسی پروانه مورد بررسی [21]

Table 1 General characteristics of the propeller [21]

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



Fig. 1 General view of the propeller geometry [21]

شکل 1 نمای کلی از هندسه پروانه [21]

<sup>1</sup> Cyclic-AMI (Arbitrary Mesh Interface)

<sup>2</sup> Minimum Pressure Method

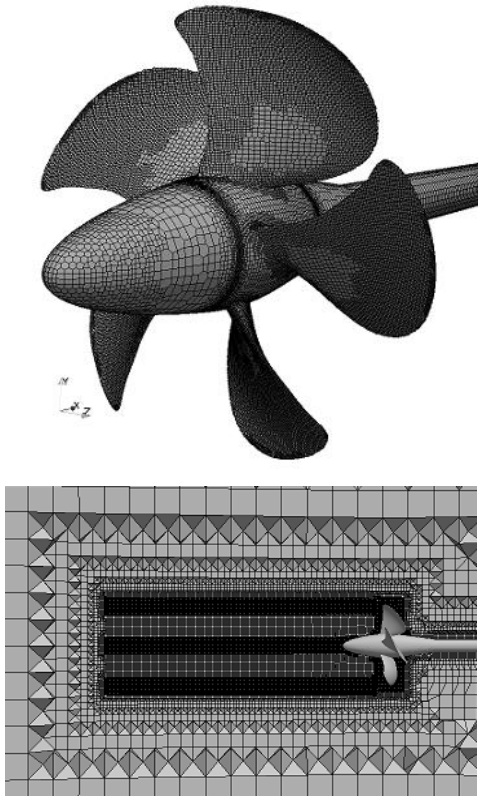
<sup>3</sup> Closed or Spiraling Streamlines and Pathlines

<sup>4</sup> Isovorticity Surfaces Method

<sup>5</sup> Q Criteria

<sup>6</sup> Lambda Criteria

<sup>7</sup> Snappy-Hex-Mesh (SHM)



**Fig. 3** Propeller surface grid (top) and wake grid at  $z = 0$  surface (bottom)

شکل 2 شبکه روی سطح پروانه (بالا) و شبکه در صفحه  $z = 0$  (پائین)

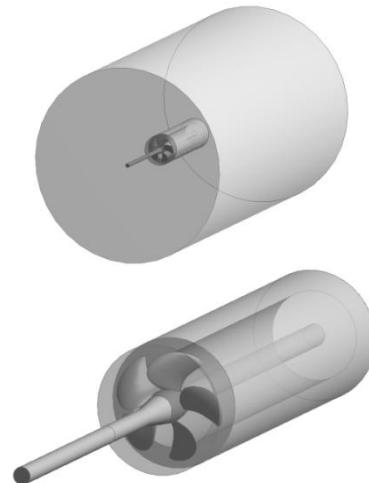
مربوط به ضریب تراست و گشتاور در مقایسه با نتایج تجربی، در این شبکه به ترتیب برابر 3.5% و 7.5% می‌باشد. مدت زمان تقریبی اجرا در حالت دائم و غیردائم با شبکه ریز بترتیب حدود 5 و 28 ساعت و بوده است. در "شکل 6" کانتور  $y^+$  روی پروانه با شبکه ریز در  $J = 1.06$  نشان داده شده است. مقدار متوسط این پارامتر برابر 60 بوده که با توجه به تابع دیواره استفاده شده، در محدوده مجاز قرار دارد.

**6- نتایج**

در این بخش نتایج به‌دست آمده از این تحقیق در سه بخش جداگانه ارائه شده است. ابتدا مقایسه‌ای بین نتایج منحنی عملکرد در حالت دائم و غیردائم انجام شده و در بخش بعد صحت نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی ناحیه دنباله با نتایج آزمایشگاهی بررسی شده است. در بخش سوم، ساختار جریان در ناحیه دنباله و اثر ضریب پیشروی بر رفتار جریان در این ناحیه مورد مطالعه قرار گرفته است.

**6-1- استخراج منحنی عملکرد**

اولین مرحله در بررسی و صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی جریان اطراف پروانه، مقایسه نتایج حالت آب آزاد با نتایج تجربی است که در این تحقیق، در بازه  $J = 0.26 - 1.25$  انجام شده است. سرعت دورانی پروانه ثابت و برابر  $n = 15$  rps در نظر گرفته شده و مقادیر مختلف ضریب پیشروی با تغییر سرعت خطی در بازه  $V = 1 - 4$  m/s به‌دست می‌آیند. بر این اساس، محدوده عدد رینولدز در بازه  $Re = 8.58 \times 10^5 - 1.41 \times 10^6$  خواهد بود.



**Fig. 2** General overview of the solution domain (top) and near & wake region of the propeller (bottom)

شکل 2 نمای کلی از دامنه حل (بالا) و ناحیه نزدیک و پشت پروانه (پائین)

تعامد شبکه، حجم شبکه تولید شده در این روش، در مقایسه با سایر روش‌های متداول، کاهش چشمگیری خواهد یافت. همچنین به علت باسازمان بودن و کیفیت بالای شبکه، روند همگرایی سریع‌تر از شبکه بی‌سازمان خواهد بود. در "شکل 3"، شبکه روی صفحات پروانه و در صفحه  $z = 0$  نشان داده شده است.

یکی از موارد مهم در شبیه‌سازی‌های عددی، بررسی عدم وابستگی نتایج به شبکه است. با افزایش تعداد نقاط شبکه، نتایج دقیق‌تری به‌دست می‌آید اما از طرف دیگر، هزینه محاسباتی و زمان حل مساله افزایش خواهد یافت. در تحقیق حاضر، مطالعه شبکه در حالت غیردائم با مقایسه نتایج مربوط به ضرایب تراست و گشتاور در  $J = 1.25$  روی چهار شبکه مختلف، انجام شده است. ضریب تراست تجربی در این حالت برابر 0.250 و ضریب گشتاور 0.0725 گزارش شده است. در جدول 2 درصد اختلاف ضرایب تراست و گشتاور در مقایسه با نتایج ریزترین شبکه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج شبکه ریز و بسیار ریز نسبت به یکدیگر تغییرات زیادی نداشته است. از آن‌جا که هدف این تحقیق، بررسی دنباله جریان پشت جسم است، در "شکل 4" کانتور فشار روی صفحه  $Q = 5000$  برای این چهار شبکه به‌صورت لحظه‌ای رسم شده است.

همچنین در "شکل 5" کانتور مقدار ورتیسیته لحظه‌ای در صفحه  $z = 0$  ارائه شده است. در مورد نتایج کیفی ارائه شده در پشت جسم با افزایش تعداد سلول‌ها از شبکه ریز به بسیار ریز، تغییر محسوسی در نتایج مشاهده نمی‌شود. بنابراین به منظور حفظ دقت و همچنین جلوگیری از افزایش هزینه محاسباتی، برای سایر شبیه‌سازی‌ها از شبکه ریز استفاده شده است. خطای

**جدول 1** تغییرات ضریب تراست و گشتاور در شبکه‌های مختلف

**Table 2** Thrust and torque variation at various grids

شبکه	تعداد المان	ضریب تراست	ضریب گشتاور	خطای ضریب تراست (%)	خطای ضریب گشتاور (%)
درشت	329196	0.246	0.069	1.72	2.292
متوسط	1031452	0.243	0.068	0.432	1.493
ریز	1761871	0.242	0.067	0.207	1.045
بسیار ریز	3431520	0.242	0.067	---	---

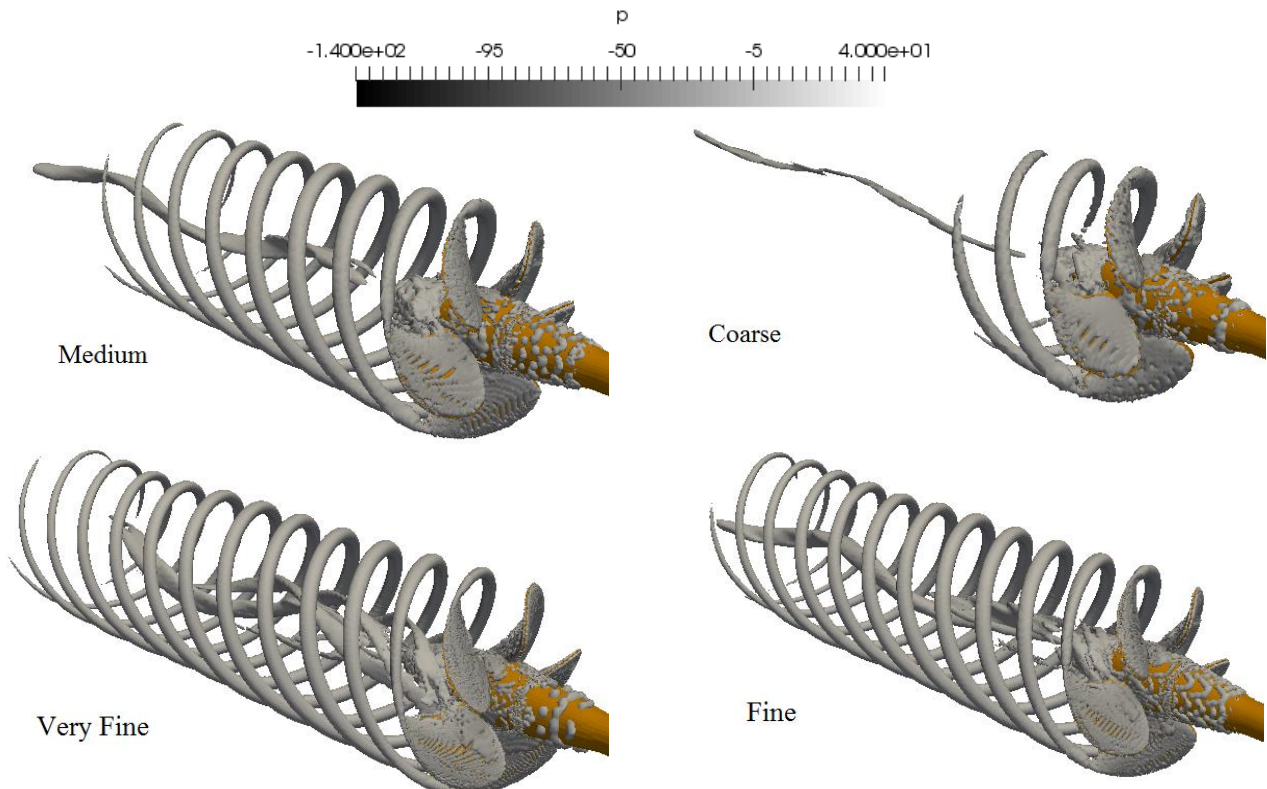


Fig. 4  $Q=5000$  isosurfaces at  $J=1.25$  in different grids colored by pressure field

شکل 4 صفحه  $Q=5000$  در  $J=1.25$  در شبکه‌های مختلف رنگ شده با میدان فشار

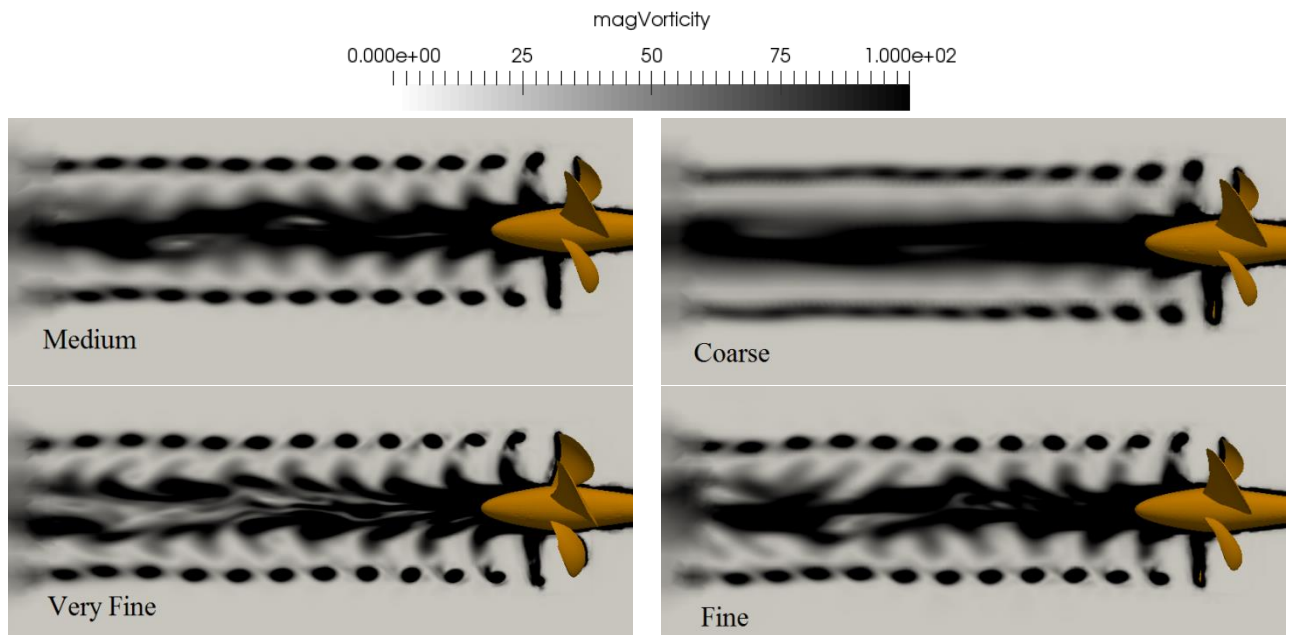


Fig. 5 Instantaneous vorticity contour at  $J=1.25$  and  $z=0$  surface in different grids

شکل 3 کانتور مقدار ورتیسیتة لحظه ای در صفحه  $z=0$  و  $J=1.25$  در شبکه‌های مختلف

در حالت دائم برابر 2.7% و 7.5% و در حالت غیردائم برابر 1.8% و 5.2% می‌باشد. زیرنویس SS و USS به ترتیب بیانگر حالت دائم و غیردائم می‌باشد. از آن‌جا که زمان حل غیردائم بسیار بیشتر از حل دائم است، با توجه به نزدیکی نتایج به‌دست آمده در هر دو حالت، انجام شبیه‌سازی غیردائم به منظور استخراج منحنی عملکرد با توجه به هزینه محاسباتی بالاتر، غیرضروری به نظر می‌رسد.

نتایج شبیه‌سازی جریان به صورت منحنی عملکرد هیدرودینامیکی در ضرایب پیشروی مختلف در "شکل 7" با ارائه ضرایب تراست، گشتاور و راندمان نشان داده شده‌است. نتایج در هر دو حالت دائم و غیردائم با استفاده از مدل اغتشاشی کا-پسیلون تحقق پذیر بدست آمده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج در کل بازه عملکردی در مقایسه با نتایج تجربی از دقت خوبی برخوردار است. متوسط اختلاف ضرایب تراست و گشتاور با نتایج آزمایشگاهی

تجربی مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مولفه محوری و مماسی در حوالی  $\theta = -27^\circ$  دارای نقاط ماکزیمم و مولفه شعاعی دارای نقطه ماکزیمم و مینیمم در این محدوده می‌باشد که این امر به دلیل وقوع جدایش و تشکیل گردابه در نوک پره می‌باشد. نتایج به دست آمده در مقایسه با نتایج تجربی از دقت قابل قبولی برخوردار است و حداکثر خطای نتایج برابر 7.5% محاسبه شده است.

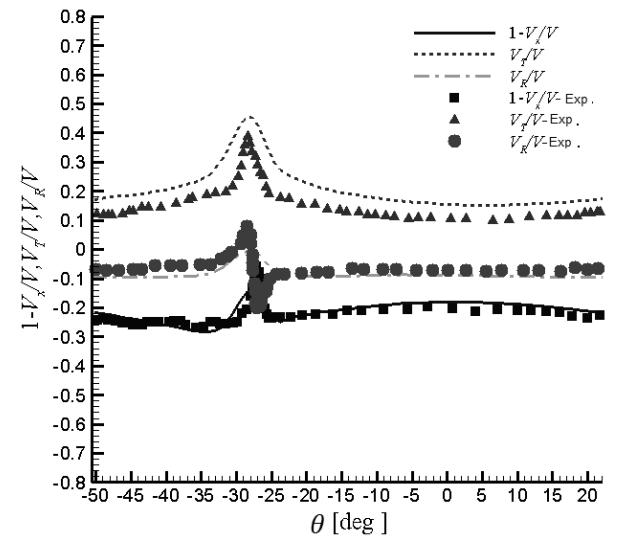
**3-6- بررسی ساختار جریان ناحیه دنباله**

همان‌طور که در بخش مقدمه نیز بیان شد، هدف از انجام این تحقیق بررسی کارایی مدل غیردائم متوسط‌گیری شده رینولدز در مقایسه با مدل شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده در تخمین میدان جریان دنباله پشت پروانه است. در مرجع [15] بیان شده که مدل‌های خانواده متوسط‌گیری شده رینولدز به علت نرخ اضمحلال بالا، تنها برای پیش‌بینی ضرایب نیرویی مناسب بوده و قادر به پیش‌بینی جریان در ناحیه دنباله نیستند. بنابراین برای مدل‌سازی دنباله در این مرجع، از مدل ادی‌های جدا شده استفاده شده است. به علت ماهیت جریان چرخشی و غیردائم پشت پروانه، استفاده از مدل دائم و مقایسه نتایج آن با نتایج غیردائم مدل ادی‌های جدا شده صحیح به نظر نمی‌رسد. از این رو، در تحقیق حاضر با استفاده از مدل غیردائم متوسط‌گیری شده رینولدز به شبیه‌سازی میدان جریان دنباله پرداخته شده است.

در ادامه نتایج به دست آمده در چهار ضریب پیشروی  $J = 0.26, 0.53, 1.06, 1.25$  استخراج شده و ساختار رفتار جریان پشت جسم مورد مطالعه قرار گرفته است. ضریب پیشروی بیشینه، مربوط به حالتی است که دنباله دائم در حالت تجربی در آن مطالعه شده است.

**1-3-6- بررسی میدان دنباله در  $J=1.25$**

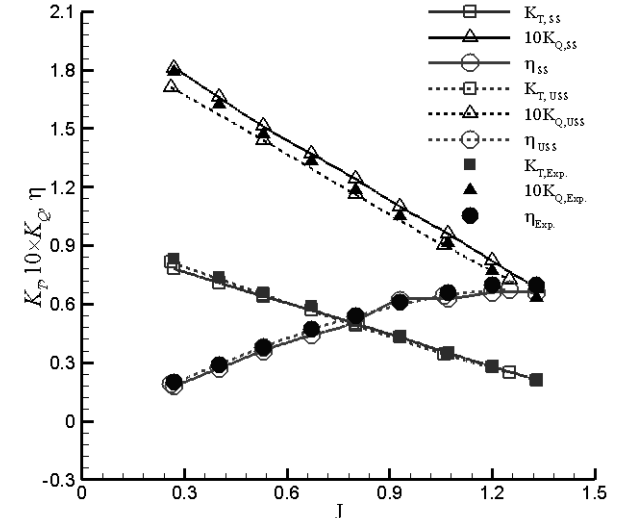
در "شکل 9" نمای روبرو از میدان ورتیسیته لحظه‌ای به دست آمده در  $J=1.25$  با رسم صفحه  $Q = 5000$  و ارائه کانتور فشار روی آن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شبکه و مدل اغتشاشی استفاده شده به خوبی توانسته است میدان دنباله مارپیچی پشت پروانه و همچنین دنباله پشت هاب را تا فاصله دو برابری گام شبیه‌سازی کند.



**Fig. 8** Flow wake components in  $r/R = 0.7, x/D = 0.1$  and  $J = 1.25$   
 شکل 8 مولفه های دنباله جریان در  $r/R = 0.7, x/D = 0.1$  و  $J = 1.25$



**Fig. 6** The  $y^+$  contour on the propeller at the fine grid at  $J = 1.06$   
 شکل 4 کانتور  $y^+$  روی پروانه با شبکه ریز در حالت  $J = 1.06$



**Fig. 7** Comparison of the steady and unsteady results with the experimental data

شکل 5 مقایسه نتایج حل دائم و غیردائم با نتایج آزمایشگاهی

**2-6- اعتبارسنجی دنباله دائم جریان**

در این بخش نتایج به دست آمده در  $J = 1.25$  در مقطع  $r/R = 0.1, x/D = 0.7$  با نتایج آزمایشگاهی مرجع [21] مقایسه شده است. در این مرجع، نتایج برای دنباله دائم جریان برحسب سه مولفه سرعت محوری ( $W_a$ ), سرعت مماسی ( $W_t$ ) و سرعت شعاعی ( $W_r$ ) طبق معادلات (13) تا (15) ارائه شده است.

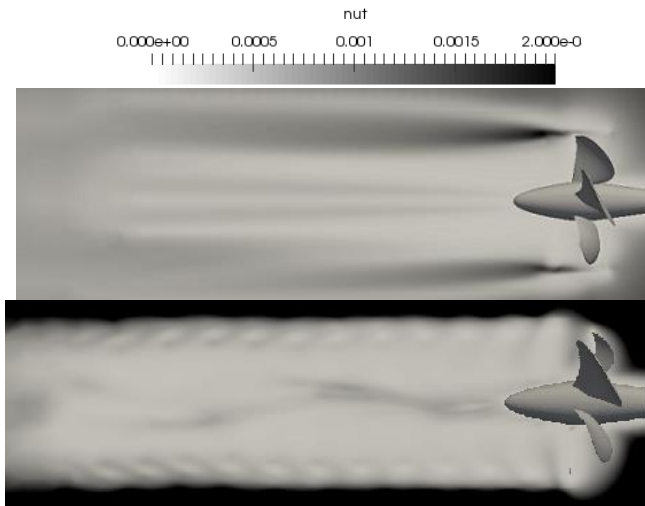
$$W_a = 1 - \frac{V_a}{V} \tag{12}$$

$$W_t = \frac{V_t}{V} \tag{13}$$

$$W_r = \frac{V_r}{V} \tag{14}$$

در روابط (13) تا (15)،  $V$  سرعت جریان آزاد و  $V_a, V_t, V_r$  به ترتیب مولفه‌های سرعت در جهت‌های محوری، مماسی و شعاعی هستند. در "شکل 8"، پارامترهای معرفی شده برای میدان دنباله، با مقادیر

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.9.27.3] [Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]



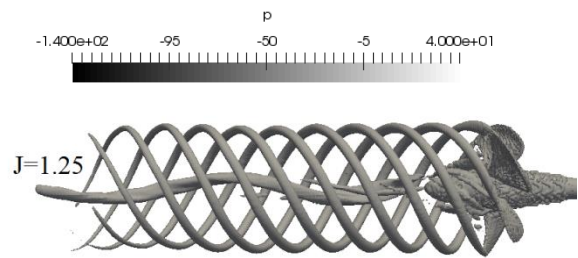
**Fig. 11** Turbulent viscosity contour at  $z=0$ ,  $J=1.25$ . Top: steady state simulation, bottom: instantaneous unsteady simulation

شکل 11 کانتور میدان ویسکوزیته اغتشاشی در صفحه  $z=0$  و  $J=1.25$  شبیه‌سازی حالت دائم (بالا)، شبیه‌سازی غیردائم لحظه‌ای (پائین)

داده شده است. الگوی میدان ویسکوزیته اغتشاشی در هر دو حالت نزدیک به هم بوده اما در نواحی مربوط به گردابه مارپیچی، شبیه‌سازی دائم مقدار ویسکوزیته اغتشاشی را بیشتر از حالت غیردائم پیش‌بینی کرده است. همچنین "شکل 11" نشان می‌دهد که شبیه‌سازی دائم قادر به پیش‌بینی نوسانات جریان در ناحیه دنباله نبوده و تنها الگویی متوسط از این میدان را نشان می‌دهد.

**2-3-6- بررسی اثر ضریب پیشروی**

به منظور بررسی اثر تغییر ضریب پیشروی بر ساختار جریان در ناحیه دنباله پشت جسم، در این بخش نتایج در  $J = 0.26, 0.53, 1.06$  در "شکل 12" ارائه شده است. نتایج در  $J = 1.06$  مشابه حالت  $J = 1.25$  در "شکل 9" بوده و ساختار جریان یکسانی بر این دو حالت حاکم است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش ضریب پیشروی ساختار حلزونی پشت جسم به هم خورده و پدیده یکی‌شدن گردابه‌ها به وجود می‌آید. لازم به ذکر است که طبق نتایج مرجع [12]، این پدیده در تمامی ضرایب پیشروی اتفاق می‌افتد و موقعیت مکانی وقوع آن به تعداد پره و ضریب پیشروی پروانه ارتباط دارد. هر چه تعداد پره کمتر و ضریب پیشروی بالاتر باشد، ساختار حلزونی گردابه‌ها در فاصله دورتری دچار ناپایداری می‌شود. برای مثال در مرجع [12] برای یک پروانه چهار پره‌ای در  $J = 0.75$  پدیده یکی‌شدن گردابه در راستای محوری در  $x = 12.65R$  گزارش شده است. همان‌طور که در بخش 5 بیان شد، ابعاد شبکه بر نتایج ناحیه دنباله به شدت تأثیرگذار است. از آن‌جا که در تحقیق حاضر، شبکه تنها در فاصله دو برابری گام پشت پروانه ریز شده است، بنابراین وقوع این پدیده تنها در این محدوده قابل مشاهده خواهد بود. همان‌طور که در "شکل 12" مشاهده می‌شود در وضعیت یکی‌شدن گردابه‌ها، شکل گردابه نوک پره از حالت حلزونی تغییر کرده و تمایل به تشکیل گروه گردابه‌ها در آن به وجود می‌آید. همچنین در مورد گردابه‌ها در این حالت، رفتار ناحیه دنباله از حالت مستقیم الخط به مارپیچی تغییر پیدا می‌کند.

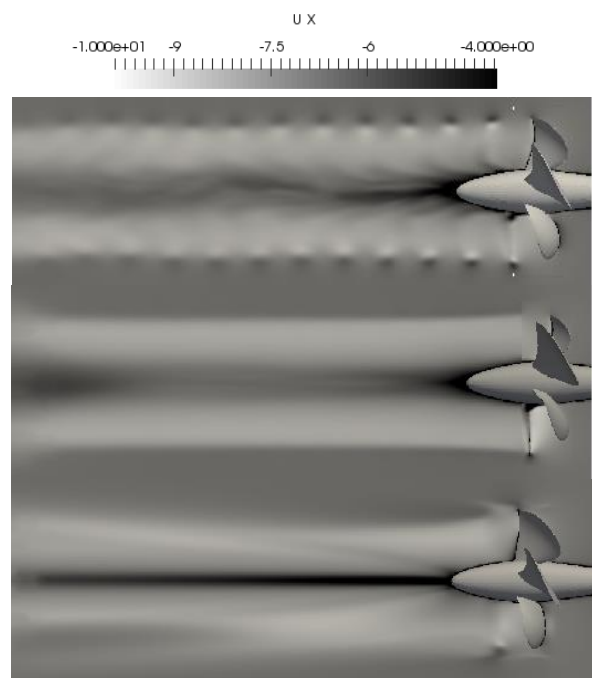


**Fig. 9** Instantaneous vortex field visualization at  $Q=5000$  with pressure contour

شکل 9 آشکارسازی میدان گردابه لحظه‌ای در  $Q=5000$  با کانتور فشار

در "شکل 10" کانتور میدان سرعت محوری در ناحیه دنباله در سه حالت لحظه‌ای، متوسط‌گیری شده و دائم در صفحه  $Z = 0$  نشان داده شده است. در نقاط مربوط به لبه‌های دنباله مارپیچی، میدان سرعت نقاط مینیمم دارد. همچنین بیشترین مقدار سرعت به‌دست آمده در این صفحه، مربوط به ناحیه نزدیک پشت هاب پروانه است. میدان سرعت به‌دست آمده در حالت دائم، به نتایج میدان متوسط‌گیری شده زمانی نزدیک بوده اما مقدار سرعت در هسته دنباله هاب را بیشتر از حالت غیردائم محاسبه کرده است. لازم به ذکر است که کانتور به‌دست آمده برای میدان متوسط‌گیری شده زمانی در ناحیه نزدیک پروانه، به دلیل چرخش پروانه و تغییر موقعیت مکانی پروانه برحسب زمان، چندان معتبر نبوده و به همین خاطر بین نتایج ناحیه نزدیک پروانه و ناحیه دور دست مقداری پرش مشاهده می‌شود. نتایج ناحیه دور دست در سه دور چرخش پروانه متوسط‌گیری شده‌اند و نوسانات موجود در این ناحیه را حذف کرده‌اند.

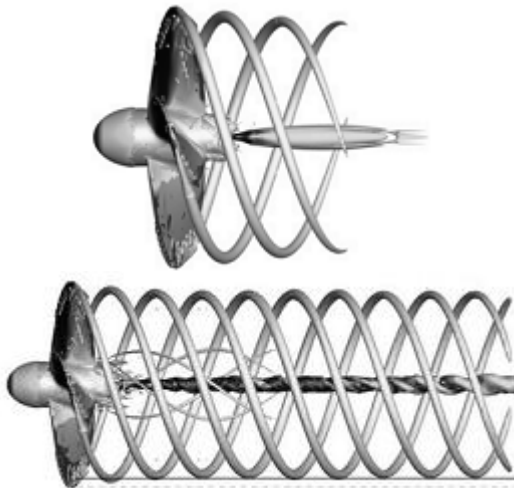
به منظور درک بهتر تفاوت الگوی رفتار جریان در دو حالت دائم و غیردائم، کانتور ویسکوزیته اغتشاشی در صفحه  $Z = 0$  در "شکل 11" نشان



**Fig. 10** Instantaneous (top), time averaged (middle) and steady-state (bottom) axial velocity contour at  $z = 0$ ,  $J = 1.25$

شکل 10 کانتور میدان سرعت محوری لحظه‌ای (بالا)، متوسط‌گیری شده زمانی (وسط)، حالت دائم (پائین) در صفحه  $z = 0$  و  $J = 1.25$





**Fig. 13** Wake flow at  $J=0.71$ . RANS model (top), DES model (bottom) [15]

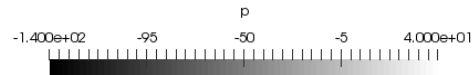
شکل 7 دنباله جریان در  $J = 0.71$ . مدل مدل متوسط‌گیری شده رینولدز (بالا)، مدل مدل شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده (پائین) [15]

قرار گرفته است. در ادامه خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده در این تحقیق ارائه شده است.

- 1- برخلاف نتایج کلی و عملکردی پروانه مانند ضرایب تراست و گشتاور، نتایج میدان جریان در ناحیه دنباله شدیداً به ابعاد شبکه در این ناحیه وابسته است.
- 2- دقت شبیه‌سازی دائم انجام شده به منظور استخراج منحنی عملکرد پروانه کافی بوده و انجام شبیه‌سازی غیردائم و صرف هزینه محاسباتی بالاتر در این خصوص، منجر به افزایش دقت نخواهد شد.
- 3- استفاده از مدل غیردائم معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز بجای مدل دائم به‌منظور شبیه‌سازی میدان جریان دنباله بسیار کارآمد بوده و جایگزین بسیار مناسبی برای مدل‌های خانواده شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ مانند مدل شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده می‌تواند باشد. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که در صورت استفاده از شبکه مناسب در ناحیه دنباله، نتایج شبیه‌سازی به روش غیردائم معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز بسیار به نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده نزدیک خواهد بود.
- 4- با کاهش ضریب پیشروی پروانه، ساختار گردابه‌های حلزونی تشکیل شده در ناحیه دنباله در فاصله کمتری دچار ناپایداری شده و این گردابه‌ها به سمت یکی شدن تمایل پیدا خواهند کرد. همچنین طبق نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، رفتار گردابه‌ها تشکیل شده در این حالت از ساختار مستقیم‌الخط به مارپیچی و حلزونی تغییر پیدا می‌کند.

**8- فهرست علائم**

$J$	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)



**Fig. 12** Pressure contour on the instantaneous vortex field at  $Q=5000$  and different advance coefficients

شکل 6 کانطور فشار روی میدان گردابه لحظه ای در  $Q=5000$  و ضرایب پیشروی مختلف

**3-3-6- مقایسه کیفی نتایج با مدل شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده**

همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، در مرجع [15] بررسی دنباله جریان روی پروانه E779A با استفاده از دو روش دائم به‌وسیله مدل اغتشاشی اسپالارت-آلماراس و روش غیردائم با استفاده از مدل شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده انجام شده است. لازم به ذکر است که حجم شبکه استفاده شده برای شبیه‌سازی عددی دنباله جریان در این مرجع، 11.3 میلیون سلول بوده و برای حل آن حدوداً 350 ساعت زمان صرف شده است. در حالی‌که در تحقیق حاضر، با استفاده از مدل اغتشاشی دو معادله‌ای در حالت غیردائم و با استفاده از شبکه‌ای با حجم تقریبی 1.7 میلیون سلول و زمان شبیه‌سازی تقریبی 28 ساعت، دنباله جریان در ناحیه پشت پروانه به خوبی مدل‌سازی شده است. برای نمونه نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی دنباله جریان در  $J = 0.71$ ، در دو حالت دائم و غیردائم در "شکل 13" نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ساختار میدان دنباله در حالت شبیه‌سازی دائم چندان کامل نبوده ولی نتایج مدل‌سازی به روش شبیه‌سازی ادی‌های جدا شده جزئیات بیشتری از میدان جریان را نشان می‌دهد. همچنین مقایسه نتایج میدان دنباله به‌دست آمده در "شکل 9" و "شکل 12" با میدان نشان داده شده در "شکل 13" نشان می‌دهد که حل جریان غیردائم به روش معادلات متوسط-گیری شده رینولدز تا حد بسیار زیادی قادر به پیش‌بینی ساختار جریان در این ناحیه بوده و با هزینه محاسباتی بسیار کمتر جواب‌های قابل قبولی را ارائه می‌دهد.

**7- جمع بندی و نتیجه‌گیری**

در این مقاله شبیه‌سازی دائم و غیردائم میدان جریان سیال در ناحیه دنباله یک پروانه دریایی با استفاده از نرم‌افزار اوپن‌فوم مورد مطالعه و بررسی عددی

- [11] 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.
- [12] M. Felli, R. Camussi, F. Di Felice, Mechanisms of evolution of the propeller wake in the transition and far fields, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 682, No. 1, pp. 5-53, 2011.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] R. Muscari, A. Di Mascio, R. Verzicco, Modeling of vortex dynamics in the wake of a marine propeller, *Computers & Fluids*, Vol. 73, No. 12, pp. 65-79, 2013.
- [16] A. Escue, J. Cui, Comparison of turbulence models in simulating swirling pipe flows, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, No. 10, pp. 2840-2849, 2010.
- [17] 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.
- [18] L. Davidson, *Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling*, Accessed on 15 June 2015 <http://www.tfd.chalmers.se/~lada/MoF/lecture notes.html>.
- [19] *Ansys Fluent User Guide, Technical Report Release 16.1, ANSYS Inc.*, pp. 9-21, 2015.
- [20] T. Maric, J. Hopken, K. Mooney, *The OpenFOAM technology primer*, first edition, pp. 379-427, haftungschrant: sourceflux UG, 2014.
- [21] U. Barkmann, H.-J. Heinke, L. Lübke, Potsdam Propeller Test Case (PPTC), in *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.
- [22] J. Jeong, F. Hussain, On the identification of a vortex, *Journal of fluid mechanics*, Vol. 285, No. 1, pp. 69-94, 1995.
- [23] P. Chakraborty, S. Balachandar, R. J. Adrian, On the relationships between local vortex identification schemes, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 535, pp. 189-214, 2005.
- [24] V. Kolář, Vortex identification: New requirements and limitations, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, No. 4, pp. 638-652, 2007.
- [25] V. Holmén, *Methods for Vortex Identification*, Master's Thesis, Mathematical Sciences, Lund university, Sweden, 2012.
- [26] J. Ghose, R. Gokarn, *Basic ship propulsion*, pp. 217-221, New Delhi: Allied publishers, 2004.

عدد رینولدز	Re
سرعت خطی ( $\text{ms}^{-1}$ )	$V_a$
مولفه سرعت محوری	$W_a$
مولفه سرعت شعاعی	$W_r$
مولفه سرعت مماسی	$W_t$
فاصله طولی از محور پروانه (m)	$x$

## 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. Saeidinezhad, A. Dehghan, M. Dehghan Manshadi, M. Kazemi Eseh, Experimental investigation of the vortex structure on a submersible model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 15, pp. 98-109, 2014. (in Persian فارسی)
- [4] S. Esfandeh, S. A. Khorasani, A. Dehghan, G. A. Sheikhzadeh, M. Jamali, Experimental study on the drag coefficient and flow structure of an axially symmetric model and factors affecting it, in wind tunnel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 71-82, 2016. (in Persian فارسی)
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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, in *ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, San Francisco, California, USA, pp. V002T08A048, June 8-13, 2014.
- [8] 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)
- [9] 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.
- [10] 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.