ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(4):209-224

Experimental Investigation of the Effect of Displacement of Stern Planes on Reducing Non-Uniformity and Fluctuations of a Submarine's Wake Flow

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Beigi S. M.[1] *MSc,*
Shateri A.[1]* *PhD,*
Manshadi M. D.[2] *PhD*

How to cite this article
Beigi S. M, Shateri A, Manshadi M D. Experimental Investigation of the Effect of Displacement of Stern Planes on Reducing Non-Uniformity and Fluctuations of a Submarine's Wake Flow. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(4):209-224.

[1]Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty of Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
[2]Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University, Esfahan, Iran.

Correspondence
Address: Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty of Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
Phone: -
Fax: -
shateri@eng.sku.ac.ir

Article History
Received: March 08, 2020
Accepted: November 29,2020
ePublished: March 20, 2021

ABSTRACT

In the present study, the wake flow field of a submarine model was investigated experimentally in a wind tunnel. The experiments were conducted to determine the effect of the location of control surfaces on the wake inflow to the impeller of the submarine. In order to investigate the effect of the location of control surfaces as the most important innovation of the present study, the aforementioned surfaces were installed in three longitudinal positions $X/L = 0.89, 0.92, 0.95$ on the heel of the submarine model, and the wake flow was measured at the position $X/L = 0.978$ and the Reynolds number 6×10^5 by a five-hole probe and a hotwire anemometer. Finally, the longitudinal position $X/L = 0.95$ was selected as the optimal location for the stern planes to improve the wake inflow to the impeller in terms of reducing its total area and the least amount of turbulence and non-uniformity. The results obtained during this study showed that arriving of the holder base's wake to the stern area increases the area and average velocity and subsequently reducing the non-uniformity of the wake flow.

Keywords Submarine Model, Control Surfaces, Wind Tunnel, Five-Hole Probe, Hotwire, Wake Flow

CITATION LINKS

[1] Wake of a DST Submarine Model captured by Stereoscopic... [2] Wake of a cruciform appendage on a generic submarine... [3] Large Eddy Simulation of DARPA SUBOFF.... [4] Experimental and numerical study of a generic conventional submarine... [5] Norrison, RANS, DES and LES of the Flow Past... [6] A numerical investigation about the effects of Reynolds number on the flow... [7] Numerical prediction of effective wake field... [8] Boundary layer measurements over a body... [9] Large-Eddy Simulation of an Axisymmetric Boundary Layer... [10] Experimental investigation of the wake of a submarine model... [11] Towing PIV and its application on the juncture forms... [12] Results of Experiments with a Segmented Model... [13] Experimental investigation of the effect of bow profiles... [14] Experimental study on hydrodynamic coefficients... [15] Validation of incompressible flow computational forces and moments on axisymmetric bodies at incidence... [16] Measurements of flows over an axisymmetric body... [17] Six-DOF simulations of an underwater vehicle undergoing straight line... [18] The intermediate wake of a body of revolution... [19] The effects of fins on the intermediate wake... [20] The turbulent wake of a submarine model... [21] Numerical simulation and experimental study of the new method of horseshoe... [22] A novel calibration algorithm for five-hole pressure probe. [23] The calibration and application of five-hole probes. [24] Effect of chamfer angle on the calibration curves... [25] Calibration of Five-Hole Probe with Redundant Coefficients. [26] Novel usage of five-hole probes... [27] A Time Efficient Adaptive Gridding Approach and Improved Calibrations... [28] Development of an omnidirectional five-hole pressure probe. [29] Fast settling millimetre-scale five-hole probes. [30] Experimental Investigation of Geometry Effects and Performance... [31] The Oxford Probe: an open access five-hole probe... [32] The Application of a Five-Hole Probe Wake-Survey... [33] Geometric characteristics of DARPA... [34] Experimental investigation of hydrodynamic characteristics of a submersible... [35] Numerical Study On The Hydrodynamic Performance...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی تجربی اثر تغییر مکان بالک‌های انتهایی بر کاهش میزان غیریکنواختی و نوسانات جریان دنباله زیرسطحی

شکراله محمدبیگی MSc
دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
علیرضا شاطری PhD*
دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد
مجتبی دهقان منشادی PhD
استاد، مهندسی هوافضا، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

چکیده
در پژوهش حاضر میدان دنباله جریان عبوری از روی یک مدل زیردریایی در تونل باد به صورت تجربی بررسی شده است. آزمایش‌ها به منظور بررسی اثر محل قرارگیری بالک های انتهایی بر روی جریان دنباله ورودی به پروانه مدل زیرسطحی انجام شده است. به منظور بررسی اثر محل قرارگیری بالک های انتهایی به عنوان مهم‌ترین نوآوری پژوهش حاضر، بالک های مذکور در سه موقعیت طولی $X/L =$ ۰/۸۹, ۰/۹۲, ۰/۹۵ بر روی پاشنه مدل زیرسطحی نصب‌شده و جریان دنباله در موقعیت $X/L =$ ۰/۹۷۸ و عدد رینولدز 6×10^5 توسط پراب پنج حفره و جریان سنج سیم داغ اندازه‌گیری شده است. در پایان این بررسی‌ها موقعیت طولی $X/L =$ ۰/۹۵ به عنوان مکان بهینه برای قرارگیری بالک های انتهایی به منظور بهبود جریان دنباله ورودی به پروانه از نظر کاهش مساحت کلی و نیز کمترین میزان اغتشاشات و غیریکنواختی انتخاب شده است. نتایج به‌دست آمده در طول این پژوهش نشان دادند که ورود جریان دنباله پایه نگه‌دارنده به قسمت پاشنه موجب رشد مساحت ناحیه دنباله شده و باعث افزایش متوسط سرعت و کاهش میزان غیریکنواختی جریان دنباله می‌شود.

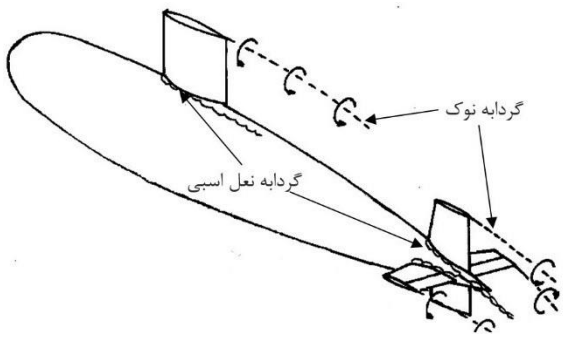
کلیدواژه‌ها: مدل زیرسطحی، بالک های انتهایی، تونل باد، پراب پنج حفره، جریان سنج سیم داغ، دنباله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۲
*نویسنده مسئول: shateri@eng.sku.ac.ir

۱- مقدمه
یکی از پیشرفته‌ترین تجهیزات مدرن امروزی زیردریایی است که توانایی دارد از سطح تا اعماق دریا حرکت کند. زیردریایی‌های مرسوم معمولاً دارای بدنه‌ای تقارن محوری و به همراه متعلقات مختلف مانند بالک های انتهایی پاشنه، بالکهای سینه، برجک و غیره هستند. با قرار گرفتن قسمت‌های جانبی بر روی بدنهٔ اصلی شکل خطوط جریان بسیار تحت تأثیر شکل بدنه قرارگرفته و میدان جریان پیچیده‌ای در اطراف آن ایجاد می‌شود. بررسی جریان اطراف زیردریایی به صورت بدنه لخت و نیز بدنه اصلی همراه با قسمت‌های جانبی مختلف تاکنون توجه پژوهشگران زیادی را به صورت تجربی و عددی به خود جلب کرده است[1-10]. ساختارهای گردابه‌ای جریان اطراف یک زیردریایی شامل گردابه نعل اسبی در محل اتصال برجک به بدنه، یک جفت گردابه نوک برجک، جریان دنباله برجک و یک ساختار پیچیده از جریان که از تداخل جریان‌های گردابی و دنباله برجک با ساختارهای گردابه‌ای ناشی از بالک های انتهایی پاشنه است. در شکل ۱ می‌توان به طور شماتیک ساختارهای گردابه ای به وجود آمده در اثر اتصال برجک در قسمت میانی و بالک های انتهایی پاشنه در قسمت انتهای بدنهٔ زیردریایی را مشاهده نمود.

میزان یکنواختی میدان جریان ورودی به پروانه (جریان دنباله شناور) تأثیر فراوانی در بهینه‌سازی نویز زیردریایی دارد. در نتیجه بررسی گردابه‌های ایجادشده در اطراف بدنه و دنباله متأثر از آن‌ها به منظور طراحی هیدرودینامیکی موثر بدنه، بسیار حائز اهمیت است. برای شبیه‌سازی میدان جریان دنباله یک زیردریایی می‌توان از روش‌های عددی یا روش‌های آزمایشگاهی استفاده نمود. استفاده از روش‌های آزمایشگاهی بهترین روش جهت بررسی اثر شکل بدنه بر روی ویژگی‌های هیدرودینامیکی، قبل از ساخت یک شناور زیرسطحی می‌باشد. در نتیجه برای انجام آزمایش‌های مختلف ابتدا باید مدل کوچک‌شده شناور مورد نظر را ساخته و سپس با عبور جریان کنترل شده سیال بر روی آن کمیت‌های مختلف را اندازه‌گیری نمود.

به طور کلی به منظور بررسی یک مدل آزمایشگاهی از یک وسیله سطحی یا زیرسطحی می‌توان از دو روش مرسوم قرار دادن مدل مورد نظر درون تونل باد یا حوضچه کشش استفاده کرد. هر کدام از این روش‌ها دارای کاربرد مختص به خود می‌باشد، به عنوان مثال در یک حوضچه کشش متوسط می‌توان تمام شرایط شناوری وسیله مورد نظر را بررسی نمود. در این زمینه آزمایش‌هایی از مدل شناور یا نیمه شناور توسط ژانگ و همکاران[11] ، ون راندویک و فلومن[12] و جوادی و همکاران[13]، انجام شده است. آزمایش‌های تونل باد برخلاف حوضچه کشش قادر به شبیه‌سازی اثرات سطحی نخواهد بود و تنها می‌توان مدل زیرسطحی را به صورت کاملاً شناور و البته با پیچیدگی‌های کمتر نسبت به حوضچه کشش بررسی کرد. در این زمینه می‌توان به برخی از مطالعات انجام‌شده از قبیل پارک و همکاران[14] و هووانگ و لیو[15] اشاره نمود. پدیده‌شناسی گردابه‌های مختلف تشکیل‌شده در اطراف بدنه و قسمت‌های



شکل ۱) شماتیکی از نحوهٔ تشکیل ساختارهای گردابه ای بر روی بدنهٔ زیردریایی

جانبی یک وسیلهٔ زیرسطحی، مورد توجه محققان زیادی بوده است. هووانگ و همکاران[16] با قرار دادن یک مدل زیردریایی سابوف (SUBOFF) به همراه برجك و کلیهٔ متعلقات بدنه در تونل باد، دنبالهٔ مدل را در محل پروانه در عدد رینولدز ۱۰٦ × ۱۲ =Re اندازه‌گیری کردند. بر اساس مشاهدات آن‌ها گردابهٔ نعل اسبی در محل دنبالهٔ برجک میدان دنباله با آشفتگی بیشتری را در کانتور سرعت محوری دنباله تولیدشده در محل پروانه ایجاد می‌کرد. کیم و همکاران[17] به بررسی عددی جریان اطراف مدل زیرسطحی BB2 با ٦ درجه آزادی در جریان مستقیم و مانورهای پایا پرداختند. فوربی و همکاران[5] به بررسی تجربی و عددی فیزیک جریان اطراف یک مدل زیرسطحی عمومی DSTO در جریان مستقیم با $\beta = 0°$ و شرایط مانور یاو با $\beta = 10°$ پرداختند. مانوسکی و همکاران به اندازه‌گیری تجربی لایه مزی تشکیل‌شده بر روی یک جسم زیرسطحی متقارن محوری با استفاده از فناوری سرعت‌سنجی به کمک تصویربرداری ذرات پرداختند. آن‌ها شناخت جریان لایه مرزی تشکیل یافته بر روی مدل زیرسطحی را به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار بر جریان ورودی به سیستم تولید پیشرانش ضروری دانستند[8]. لی و همکاران به بررسی ساختارهای گردابه ای در جریان ویک تشکیل یافته در انتهای برجک یک مدل زیرسطحی همراه با زاویه جانبی پرداختند. آن‌ها با قرار دادن مدل زیرسطحی درون تونل باد و با استفاده از فناوری سرعت‌سنجی به کمک تصویربرداری ذرات به بررسی جریان‌های گردابه ای به وجود آمده در پشت برجک و تعامل آن‌ها با یکدیگر در چندین مقطع در راستای طول مدل پرداختند[2].

میدان جریان پایین‌دست یک مدل زیردریایی، در اعداد رینولدز مختلف توسط جیمنز و همکاران[18] و به کمک جریان سنج سیم داغ در تونل باد بررسی شده است. اندازه گیری های دنباله در مکان چند برابر قطر، پایین‌دست مدل در صفحه میانی با استفاده از جریان سنج سیم داغ دو بعدی انجام شده است. نتایج توزیع سرعت متوسط در پایین‌دست پایه نگه‌دارنده مدل، نشان‌دهنده تأثیرات مهم اثرات دنباله نگه‌دارنده روی جریان اطراف بدنه زیردریایی بود. جیمنز و همکاران در یک تحقیق دیگر[19] میدان دنباله همان مدل همراه با بالک های انتهایی را بررسی کردند. نتایج جدید آن‌ها نشان داد که حضور بالک های انتهایی بر روی سطح مدل باعث ایجاد تغییرات شدید در منحنی‌های سرعت خارج از ناحیه دنباله می‌شود و ناحیه پایین‌دست بالک های مذکور همراه با اغتشاش‌های شدید جریان بوده است. آشوك و اسمیتس[20] در تحقیق خود با استفاده از جریان سنج سیم داغ دو بعدی در تونل باد، به بررسی ناحیه دنباله یک مدل سابوف پرداختند. در این تحقیق ناحیه دنباله مدل زیردریایی در زوایای حمله و انحراف مختلف با استفاده از بردارها و توزیع سرعت در ناحیه دنباله مدل بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که حضور پایه نگه‌دارنده و گردابه های جدایش جریان عرضی باعث عدم تقارن دنباله مدل می‌شود. ژانگ و همکاران[11] به صورت تجربی یک مدل زیرسطحی را به همراه ۵ گونه‌ی مختلف از بالک های انتهایی واقع در قسمت پاشنه را درون حوضچه کشش تست کردند. آن‌ها برای اندازه‌گیری جریان از فناوری سرعت‌سنجی به کمک تصویربرداری ذرات استفاده کرده و با ارائه میزان غیریکنواختی در جریان دنباله برای سرعت محوری، سرعت شعاعی و سرعت مماسی در نهایت با مقایسه نتایج برای گونه‌های مختلف سطوح کنترل پاشنه یکی از آن‌ها را بر اساس کمترین میزان غیریکنواختی جریان دنباله انتخاب کردند. جریان اطراف یك مدل زیردریایی با بدنه متقارن همراه با برجك توسط لیو و همکاران[21] مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق پیشنهاد شد که به منظور از بین بردن گردابهٔ نعل اسبی از یك وسیلهٔ منشوری استفاده شود که در پایین‌دست راستای گردابه‌های نعل اسبی برجك زیردریایی نصب می‌گردد. پس از انجام مطالعات عددی با نصب مدل زیردریایی در تونل باد مادون صوت، با استفاده از سرعت‌سنج سیم داغ سرعت محوری جریان در منطقهٔ پاشنه را اندازه‌گیری و نتایج عددی را با نتایج تجربی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که اثر این وسیلهٔ کوچك نسبت به مکان قرارگیری آن بر روی بدنهٔ زیردریایی و در پشت برجك، بسیار حساس است و باید به‌صورت دقیق تعیین شود.

پراب پنج حفره یکی از وسایل آزمایشگاهی پرکاربرد در اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان از قبیل فشار کل و استاتیک و مؤلفه‌های سرعت است که تاکنون توسط محققین مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. برای استفاده از پراب پنج حفره ابتدا با استفاده از تعدادی فرضیه اقدام به کالیبراسیون آن می‌شود. تاکنون محققین زیادی در زمینه کالیبراسیون پراب پنج حفره و تأثیرات متقابل جریان و پراب پنج حفره مطالعاتی را انجام داده‌اند و در پایان روش‌ها و ضرایب مختلف را برای کالیبراسیون پراب پنج حفره معرفی نموده‌اند که از آن جمله می‌توان به مراجع[22-31] اشاره نمود. لوم و همکاران[32] به بررسی کاربرد روش مطالعه دنباله بال ذوزنقه‌ای همراه با یخ به کمک پراب پنج حفره پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود با نصب یک ردیف سه‌تایی از پراب‌های پنج حفره بر روی یک بازوی منتقل شونده تحت کنترل دقیق، یک سیستم جمع‌آوری سریع از داده‌های تجربی را فراهم کردند تا به وسیله آن بتوانند میدان جریان در اطراف یک بال یخ زده را به صورت کلی مورد ارزیابی قرار دهند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که روش مورد استفاده از پراب پنج حفره در مطالعه دنباله بال می‌تواند مقادیر کمی از نیروی لیفت و درگ اعمال‌شده بر روی بال را محاسبه کند و نتایجشان با نتایج به دست آمده از آزمون‌های نیرویی تونل باد قابل مقایسه بود.

همان طور که با مرور مطالعات پیشین مشخص شد، جریان در منطقه پاشنه زیردریایی بسیار حائز اهمیت است و در نتیجه قرار گرفتن بالک های انتهایی در منطقه مذکور بر پیچیدگی جریان در این منطقه افزوده و باعث کاهش عملکرد و افزایش نویز پروانه

می‌شود. مکان قرارگیری بالک های انتهایی بر روی پاشنه در طرح‌های مختلف زیرسطحی ثابت نبوده و امکان تغییر مکان بر روی بدنه را دارند. با تغییر مکان بالک های انتهایی بر روی بدنهٔ زیردریایی اندازهٔ لایهٔ مرزی برخوردکننده به آن‌ها تغییر می‌کند، در نتیجه جریان دنباله نیز به دنبال آن تغییر خواهد کرد. لذا در این مطالعه با جابجا نمودن بالک های انتهایی بر روی پاشنه زیرسطحی، یافتن مکان بهینه برای قرارگیری بالک های مذکور به جهت کاهش میزان غیریکنواختی جریان دنباله ورودی به پروانه مد نظر است. در این پژوهش سعی شده است تا کیفیت جریان دنباله زیرسطحی با استفاده از پراب پنج حفره و نیز میزان شدت اغتشاشات جریان به کمک جریان سنج سیم داغ بررسی شود. با توجه به مرور کارهای گذشته، تاکنون بررسی تغییر جریان دنباله زیرسطحی در اثر جابجایی بالک های انتهایی بر روی پاشنه زیرسطحی در هیچ تحقیقی انجام نشده است. بنابراین می‌توان بررسی اثر جابجایی بالک های انتهایی در جریان دنباله زیردریایی را مهم‌ترین نوآوری پژوهش حاضر دانست. همچنین بررسی اثر پایه نگه‌دارنده مدل و تلفیق اثر آن با جابجا نمودن بالک های انتهایی از دیگر مواردی است که در پژوهش حاضر به آن پرداخته شده است.

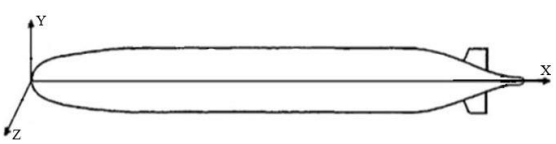
۲- تجهیزات و روش آزمایش

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق از یک مدل زیردریایی سابوف استفاده شده است. این مدل اولین بار توسط موسسه تحقیقاتی دیوید تیلور طراحی و ساخته شد. بدنهٔ این مدل دارای سه قسمت دماغه، بدنهٔ میانی و قسمت انتهایی (پاشنه) می‌باشد[33]. مدل مورد استفاده در پژوهش حاضر دارای طول کلی ۷۰۰ میلی‌متر و حداکثر قطر بدنه ۸۰ میلی‌متر می‌باشد. این مدل دارای بالک های انتهایی با مقطع ناکا ۰۰۲۰ (NACA0020) می‌باشد که برای بررسی اثر بالک های مذکور در جریان دنباله بر روی مدل نصب‌شده‌اند. در جدول ۱ ابعاد و مشخصات مدل تجربی مورد استفاده در پژوهش حاضر را می‌توان مشاهده نمود. همچنین شماتیکی از مدل زیردریایی سابوف در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱) ابعاد و مشخصات مدل تجربی مورد استفاده در پژوهش حاضر

بالک های انتهایی		مدل	
زاویه عقب‌گرد(°)	نوع مقطع	حداکثر قطر(mm)	طول کلی(mm)
۲۰	NACA0020	۸۰	۷۰۰

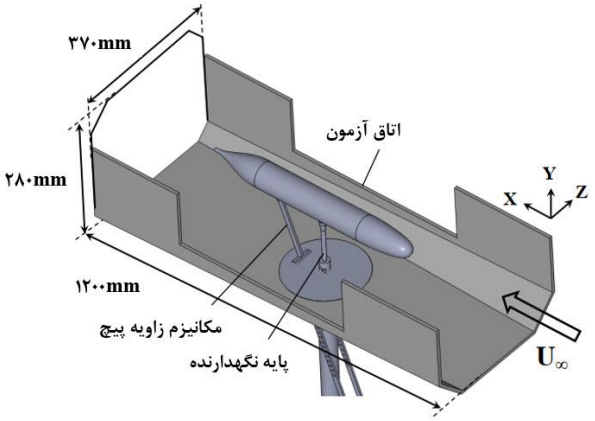


شکل ۲) نمایی از زیرسطحی .DARPA SUBOFF همراه با دستگاه مختصات کارتزین در ابتدای دماغه آن

۲-۲- تونل باد و دستگاه فشارسنج

تمامی آزمایش‌ها در پژوهش حاضر درون یک تونل باد مدارباسته تحقیقاتی متعلق به دانشگاه صنعتی مالک اشتر انجام شده است. تونل باد مذکور دارای حداکثر توان فن ۳۲ Kw و حداکثر سرعت ۳۰ m/s در داخل اتاق آزمون می‌باشد. اتاق آزمون در این تونل باد دارای سطح مقطع ۳۷۰×۲۸۰ mm بوده و طول آن ۷۰۰ میلی‌متر است. دیواره‌های اتاق آزمون دارای دو پنجره از جنس شیشه پلکسی شفاف بوده و برای جلوگیری از تداخل لایه مرزی ایجادشده توسط دیواره‌های جانبی، بین دو دیوار گوشه‌هایی با زاویهٔ ۴۵ درجه نصب شده است (شکل ۳). اندازهٔ این گوشه‌ها در امتداد اتاق آزمون کوچک می‌شود و این باعث بزرگ شدن سطح مقطع اتاق آزمون شده و تا حدودی اثر شناوری طولی در امتداد اتاق آزمون را از بین می‌برد. ضریب انسداد مدل به‌علاوهٔ پایهٔ نگه‌دارندهٔ آن در اتاق آزمون تونل باد برابر۴/۹% بوده که کمتر از مقدار استاندارد معرفی‌شده در مراجع معتبر(۵%) است. شدت اغتشاش‌های اتاق آزمون در این سرعت حدود ۰/۲۵ درصد می‌باشد. در جدول ۲ می‌توان مشخصات تونل باد در پژوهش حاضر را مشاهده نمود.

برای استفاده از وسایلی از قبیل پراب پنج حفره احتیاج به اندازه‌گیری کانال‌های متعدد فشار خواهد بود. به این منظور از یک دستگاه مبدل فشار ۱۵ کاناله با حداکثر فشار دیفرانسیلی ۱۲۷۰± پاسکال با دقت ۳± پاسکال استفاده می‌شود. برای جابجایی دقیق پراب و انتقال آن در سه جهت X،Y و Z از یک سیستم مکانیزم انتقال‌دهنده پراب با دقت جابجایی ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده می‌شود. سیستم مختصات کارتزین از سه محور عمود بر هم (X, Y, Z)تشکیل شده است که طبق قانون دست راست نام‌گذاری می‌شود و دستگاه انتقال‌دهنده پراب نیز بر مبنای همین مختصات کار می‌کند. محور X در راستای جریان و خلاف جهت آن، محور Y به



شکل ۳) نحوهٔ قرارگیری مدل زیرسطحی درون اتاق آزمون تونل باد

جدول ۲) مشخصات تونل باد مورد استفاده در پژوهش تجربی حاضر

شدت تلاطم(%)	حداکثر سرعت(m/s)	حداکثر توان(kw)	زاویه گوشه(°)	ابعاد اتاق آزمون(mm)
۰/۲۵	۳۰	۳۲	۴۵	۲۸۰*۳۷۰*۷۰۰

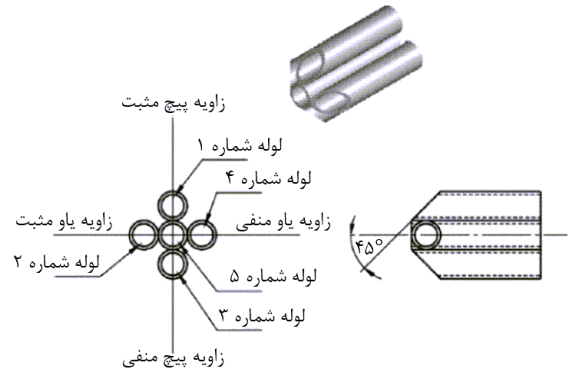
سمت بالا و محور Z عمود بر صفحه X-Y است که جهت آن مطابق قانون دست راست تعیین‌شده و در کلیه اندازه‌گیری‌ها مبدأ مختصات در ابتدای دماغه مدل زیرسطحی در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ مشخصات سیستم اندازه‌گیری مورد استفاده در پژوهش حاضر را می‌توان مشاهده نمود.

جدول ۳) مشخصات سیستم اندازه‌گیری مورد استفاده در پژوهش حاضر

جریان سنج سیم داغ		پراب پنج حفره		منتقل کننده پراب	مبدل فشار الکترونیکی	
فرکانس داده برداری(kHz)	قطر سیم(μm)	زاویه پخ(°)	قطر کلی(mm)	دقت جابجایی(mm)	دقت اندازه گیری(pa)	حداکثر فشار(pa)
۲	۵	۴۵	۳	۰/۰۱	±۳	±۱۲۷۰

۲-۳- پراب پنج حفره

پراب‌های چند حفره به منظور تعیین مؤلفه‌های سرعت جریان، جهت جریان و فشار کل مورد استفاده قرار می‌گیرند. اصول عملکردی این پراب‌ها بر اساس توزیع فشار بر روی سطح مقابل به جریان در یك جسم کروی قرارگرفته درون جریان سیال است. برای استفاده از پراب چند حفره فرض می‌شود که در جریان‌های موضعی، انحراف زیاد جریان و یا گرادیان زیاد سرعت در مقایسه با اختلال‌های پیش‌آمده در حضور پراب ناچیز است و از آن‌ها صرف‌نظر می‌شود. این فرضیات اجازه می‌دهند تا پراب‌های چند حفره برای اندازه‌گیری سرعت و فشار در هر نقطه از جریان در نظر گرفته شوند. مطالب بیشتر در مورد نحوه عملکرد پراب‌های چند حفره در مرجع[23] آورده شده است. پرابی که برای مطالعهٔ تجربی حاضر در نظر گرفته‌شده از پنج لولهٔ فلزی با قطر خارجی ۱ میلی‌متر تشکیل‌شده که به صورت صلیبی در کنار یکدیگر قرار داده‌شده‌اند و لوله‌های مجاور لوله وسط نیز با زاویه ٤٥ درجه بریده‌شده‌اند. شماتیکی از این پراب به همراه شماره‌گذاری لوله‌ها در شکل ٤ نشان داده شده است. پراب پنج حفره مورد استفاده در پژوهش حاضر با استفاده از روابط خاص آن در طی فرآیند کالیبراسیون کالیبره شده و مورد استفاده قرارگرفته که در اینجا به منظور رعایت اختصار به آن اشاره‌ای نمی‌شود.



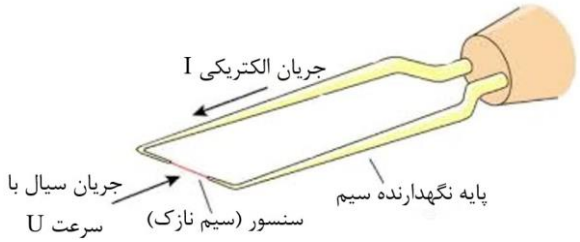
شکل ۴) شماتیك پراب پنج حفره مورد استفاده به همراه شماره‌گذاری سوراخ‌های آن

۲-۴- دستگاه جریان سنج سیم داغ

ابزار مورد استفاده دیگر برای اندازه‌گیری جریان دنباله مدل زیرسطحی درون تونل باد جریان سنج سیم داغ است. دستگاه جریان سنج سیم داغ ابزاری است که به وسیله آن می‌توان سرعت لحظه‌ای جریان سیال را با فرکانس بسیار بالا اندازه‌گیری نموده و با استفاده از سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده، سرعت متوسط، اغتشاش‌های جریان سیال، تنش‌های رینولدز، زاویه جریان (در صورت استفاده از سیم داغ دوبعدی یا سه بعدی)، دمای جریان، جهت حرکت جریان (به خصوص در جریان‌های معکوس)، کمیت-های جریان دو فازی را اندازه‌گیری نمود.

اساس کار دستگاه جریان سنج سیم داغ، انتقال حرارت از یك سیم گرم با قطر بسیار پایین (در حدود چند میکرومتر) از جنس تنگستن، پلاتین و یا آلیاژهای پلاتین است. این سیم داغ بر روی دو پایه نصب‌شده و در مسیر جریان سیال قرار می‌گیرد. هر تغییری که در شرایط جریان سیال ایجاد شود و بر روی نرخ انتقال حرارت از سیم اثر بگذارد، به وسیله دستگاه جریان سنج سیم داغ مشخص می‌شود. در شکل ۵ می‌توان شماتیکی از یک حس گر سیم داغ در مجاورت جریان را مشاهده کرد. در این پژوهش پس از اینکه یک عدد پراب جریان سنج سیم داغ را در طی فرآیند کالیبراسیون درون تونل باد کالیبره نموده، اقدام به نصب آن درون تونل باد در انتهای مدل زیرسطحی و اخذ داده به کمک آن شده است.

فرآیند اندازه‌گیری یك کمیت فیزیکی همواره با مقداری خطا همراه است. عدم آگاهی از اندازه و علامت خطای اندازه‌گیری به عدم قطعیت اندازه‌گیری موسوم است. تخمین عدم قطعیت، توصیف و تعیین خطای اندازه‌گیری به صورت آماری است و نتیجه اندازه‌گیری یك کمیت تنها زمانی کامل است که عدم قطعیت آن توصیف شده باشد. در این پژوهش از دو وسیله اندازه‌گیری پراب پنج حفره و جریان سنج سیم داغ استفاده شده است، بنابراین با توجه به روابط حاکم بر وسایل فوق عدم قطعیت نسبی پارامترهای مهم در جدول ٤ آورده شده است. در این جدول $\frac{u_x}{x}$ مقدار عدم قطعیت نسبی پارامتر x است که بر حسب درصد بیان شده است. با توجه به مقادیر موجود در این جدول می‌توان مهم‌ترین منابع خطا در پژوهش حاضر را مربوط به اندازه‌گیری سرعت متوسط و شدت تلاطم دانست.



شکل ۵) شماتیکی از یک جریان سنج سیم داغ و چگونگی عملکرد آن

جدول ۴) عدم قطعیت نسبی پارامترهای مهم در اندازه‌گیری‌های پراب پنج حفره و جریان سنج سیم داغ

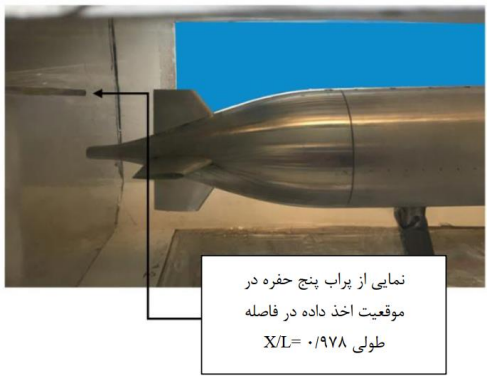
پارامتر	$\frac{u_x}{x}$(%)
چگالی (kg/m^3)	۰/۸
سرعت جریان آزاد (m/s)	۰/۴
عدد رینولدز	۰/۷
سرعت متوسط (m/s)	۹
مؤلفه‌های سرعت (m/s)	۹
شدت تلاطم	۱۲
نرخ استهلاک انرژی (m^2/s^3)	۷

۳- روند انجام آزمایش‌ها و بررسی نتایج

برای انجام آزمایش‌ها باید مدل زیردریایی در داخل اتاق آزمون تونل باد نصب شود. مدل بر روی پایهٔ نگه‌دارنده به صورت کاملاً تراز قرار داده می‌شود و اتصالات مورد نیاز در جای خود قرار می‌گیرند. پراب پنج حفره و جریان سنج سیم داغ بر روی پایهٔ نگه‌دارندهٔ دستگاه منتقل‌کنندهٔ پراب نصب‌شده و با دستور نرم‌افزار نصب‌شده بر روی رایانه آزمایشگاه هر بار به صورت خودکار ابتدا به نقطه مورد نظر جابجا شده و توسط دستگاه مربوطه (فشار یا سیم داغ) اندازه‌گیری‌ها انجام‌شده و پس از تهیه مجموعه‌ای از داده‌ها، برای تجزیه و تحلیل به مرحله بعد فرستاده می‌شوند. در اینجا به منظور جلوگیری از طولانی شدن مطلب از پرداختن به جزئیات بیشتر اجتناب نموده و تنها به ذکر نتایج به دست آمده اکتفا می‌شود. در جدول ۵ فرضیات به‌کاررفته در پژوهش حاضر جهت انجام آزمایش‌های تجربی بر روی مدل زیرسطحی درون تونل باد را می‌توان مشاهده نمود. همچنین در شکل ٦ می‌توان نحوهٔ قرار گرفتن پراب پنج حفره را در کنار مدل مشاهده نمود.

جدول ۵) فرضیات به‌کاررفته در پژوهش حاضر

جریان هوا درون تونل باد	رفتار جریان هوا درون تونل باد با جریان آب اطراف شناور واقعی کاملاً یکسان است.
	لایه مرزی تشکیل‌شده بر روی مدل درون تونل باد و شناور واقعی کاملاً یکسان است.
	خواص سیال هوا در طول دوره آزمایش ثابت است.
پراب پنج حفره و جریان سنج سیم داغ	اثر پایه نگه‌دارنده پراب و پراب بر جریان هوا در اطراف مدل ناچیز است.



شکل ۶) نمایی از نحوه قرار گرفتن پراب پنج حفره در موقعیت اخذ داده داخل اتاق آزمون

۴- بررسی و تحلیل نتایج

۴-۱- بررسی تشابه سینماتیکی و دینامیکی مدل و شناور واقعی

برای اینکه نیروهای وارد بر مدل و شناور واقعی یکسان باشند بایستی سه نوع تشابه بین حرکت جسم واقعی و مدل آزمایشگاهی برقرار باشد که عبارت‌اند از تشابه هندسی، تشابه سینماتیکی و تشابه دینامیکی. در تشابه هندسی باید کلیه ابعاد خطی شناور اصلی و مدل با یک نسبت ثابت مقیاس شوند. تشابه سینماتیکی شامل تشابه حرکت و سرعت بین مدل و شناور واقعی است. در پژوهش حاضر می‌توان ادعا نمود که با ساخت مدل زیردریایی کاملاً شبیه با نمونه واقعی و قرار دادن آن درون تونل باد، شرایط لازم برای برقراری دو تشابه هندسی و سینماتیکی فراهم شده است. در تشابه دینامیکی باید نسبت نیروهای عمل‌کننده بر شناور واقعی به نیروهای نظیر در مدل مقیاس شده ثابت باشد. برای برقراری تشابه دینامیکی کامل بین مدل و شناور اصلی باید دو عدد بدون بعد رینولدز و عدد فرود برای مدل و شناور اصلی یکسان باشد. عدد فرود برای شناوری که بر روی سطح آب شناور است مطرح می‌شود درحالی‌که شناورهای زیرسطحی غالباً در اعماق آب حرکت می‌کنند و از سطح آب فاصله‌دارند، در نتیجه عدد فرود در بررسی‌های هیدرودینامیکی اهمیت نداشته و تنها عدد بدون بعد مهم عدد رینولدز می‌باشد. تا زمانی که عدد رینولدز ثابت باشد از نظر نظریه هیچ اختلافی بین ویژگی‌های هیدرودینامیکی در آب یا هوا وجود ندارد. بنابراین برای برقراری تشابه دینامیکی مدل و شناور واقعی تشابه رینولدز کافی است. اما برای برقراری تساوی رینولدز با توجه به ابعاد بسیار کم مدل باید برای جبران ابعاد کم مدل نسبت به جسم واقعی سرعت تا حد بسیار زیادی افزایش یابد که امکان آن وجود ندارد. با توجه به یکسان نبودن اعداد رینولدز مدل آزمایشگاهی و جسم واقعی باید از تشابه رینولدز جهت تعمیم نتایج استفاده نمود. بدین منظور می‌توان با استفاده از تریپ استریپ محل گذار لایه مرزی جریان روی مدل آزمایشگاهی را با مدل واقعی یکسان نموده و مکان آن را ثابت کرد. با این فرض که نوع لایه مرزی ایجادشده روی مدل آزمایشگاهی و جسم واقعی (آرام یا آشفته) یکسان باشد، تشابه دینامیکی بین مدل و جسم واقعی ارضا خواهد شد و با استفاده از عدد بدون بعد رینولدز می‌توان نتایج آزمایشگاهی را به نتایج مدل واقعی تعمیم داد. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه نحوه و محل نصب تریپ استریپ انجام شده است که در پژوهش حاضر نیز با استناد به نتایج تحقیقات قبل اقدام به نصب یک سیم نازک با قطر ۱ میلی‌متر در فاصله ۰/۰۳ طول کل از نوک دماغه مدل به عنوان تریپ استریپ گردیده است[34]. در جدول ٦ کمیت‌های اثرگذار در تشابه دینامیکی مدل و شناور واقعی و نیز مقادیر آن‌ها در پژوهش حاضر را می‌توان مشاهده نمود.

در ادامه به تشریح مسئله و نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر پرداخته می‌شود.

جدول ۶) کمیت‌های اثرگذار در تشابه دینامیکی مدل و شناور واقعی

$Re_L = \frac{\rho UL}{\mu} \cong 6 \times 10^5$			
$\mu\ (kg/m.s)$	$L\ (m)$	$U\ (m/s)$	$\rho\ (kg/m^3)$
ویسکوزیته دینامیکی هوا	طول مدل	سرعت هوای بالادست مدل	چگالی هوای آزمایشگاه
۰/۰۰۰۱۷۸	۰/۷	۱۵	۱/۱

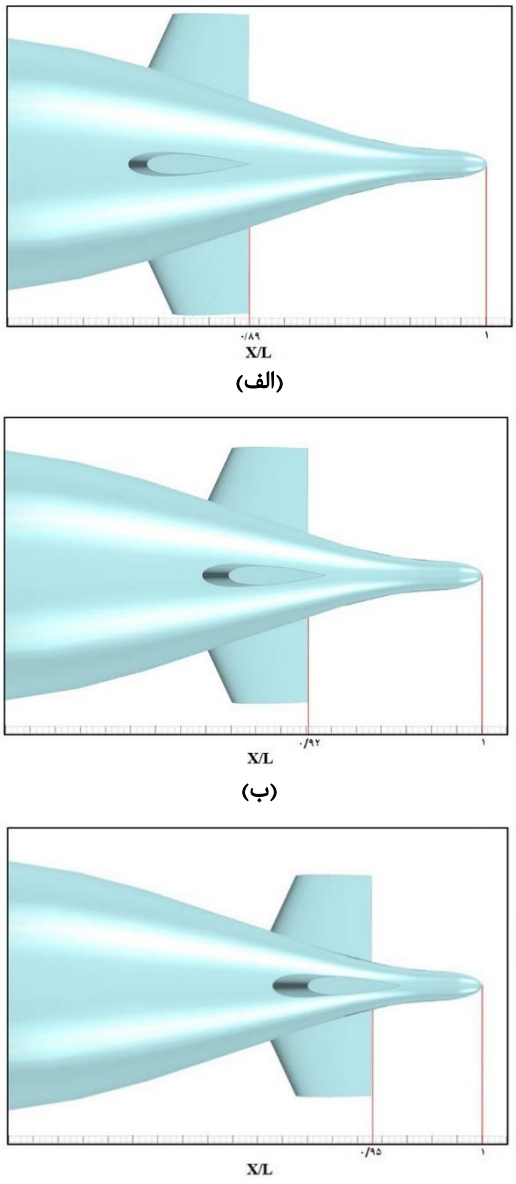
۴-۲- تشریح مسئله

هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر تغییر مکان بالک های انتهایی جسم زیرسطحی در جریان دنباله تشکیل‌شده در انتهای مدل می-باشد. به این منظور ابتدا یک مدل زیرسطحی استاندارد سابوف انتخاب شده است. برای مدل سابوف آرایش استاندارد صلیبی برای بالک های انتهایی با سطح مقطع ناکا ۰۰۲۰ همراه با زاویه عقب‌گرد ۲۵ درجه توسط سازنده پیشنهاد شده است[33]. به منظور بررسی اثر تغییر موقعیت بالک های انتهایی اندازه گیری ها به گونه‌ای انجام می‌شود که فاصله انتهای بالک‌ها از نوک دماغه مدل برای سه موقعیت بالک های انتهایی در محل پاشنه (شکل ۷) برابر $X/L =$ ۰/۸۹, ۰/۹۲, ۰/۹۵ باشد. همچنین اندازه‌گیری‌ها علاوه بر بالک های انتهایی بدون زاویه انحراف، برای حالتی که بالک های انتهایی دارای زاویه انحراف ($\delta = 5°$) هستند نیز انجام خواهد شد. برای تمام اندازه گیری ها مبدأ مختصات در دستگاه مختصات کارتزین و مطابق با قانون دست راست در قسمت نوک دماغه قرار داده‌شده و اندازه گیری ها در صفحه انتهایی مدل یعنی $X/L =$ ۰/۹۷۸ دقیقا در محل قرارگیری پروانه زیرسطحی انجام شده است. در پایان نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه خواهد شد.

برای اطمینان از مغشوش بودن جریان بر روی مدل مطابق با جریان بر روی زیرسطحی واقعی و شبیه‌سازی رینولدز از اثر زبری مصنوعی (تریپ استریپ) استفاده شده است. سرعت جریان آزاد به نحوی انتخاب‌شده که عدد بی بعد رینولدز بر اساس طول کلی مدل برابر $Re_L = 6 \times 10^5$ باشد.

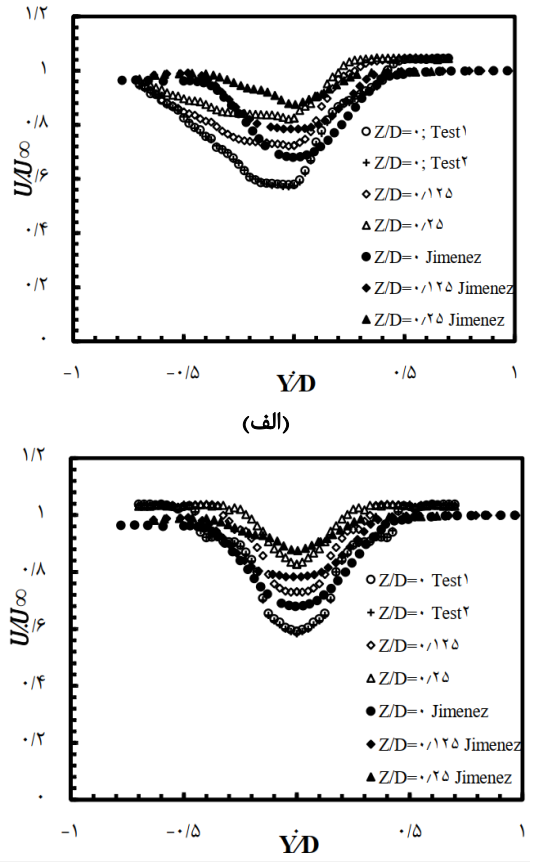
۴-۳- صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی

از آنجا که هندسه مورد بررسی در پژوهش حاضر کاملاً متقارن می-باشد بنابراین طبیعی است که جریان سیال در اطراف آن نیز رفتار مشابهی در دو طرف مدل از خود نشان خواهد داد. از این رو اندازه‌گیری‌ها تنها در یک طرف مدل انجام‌شده و نتایج برای طرف دیگر نیز تطبیق داده می‌شود. ابتدا برای مقایسه نتایج پژوهش حاضر با کارهای قبل درحالی‌که بالک های انتهایی در فاصله $X/L =$ ۰/۹۲ بر روی مدل نصب‌شده‌اند مقدار سرعت متوسط در صفحه $X/L =$ ۰/۹۷۸ اندازه‌گیری شده است. در شکل ۸ نمودار سرعت متوسط برای خطوط $Z/D =$ ۰ ، $Z/D =$ ۰/۱۲۵ و $Z/D =$ ۰/۲۵ ترسیم‌شده و نتایج آن با مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده توسط جیمنز و همکاران[19] در عدد رینولدز $Re_L = 1/2 \times 10^6$ و صفحه $X/L =$ ۱/۷ برای همین خطوط، مقایسه شده است. در این



شکل ۷) محل قرارگیری بالک های انتهایی بر روی پاشنه به نحوی‌که فاصله انتهای بالک های انتهایی از نوک دماغه مدل به ترتیب برابر است با: (الف) $X/L =$ ۰/۸۹، (ب) $X/L =$ ۰/۹۲، (ج) $X/L =$ ۰/۹۵

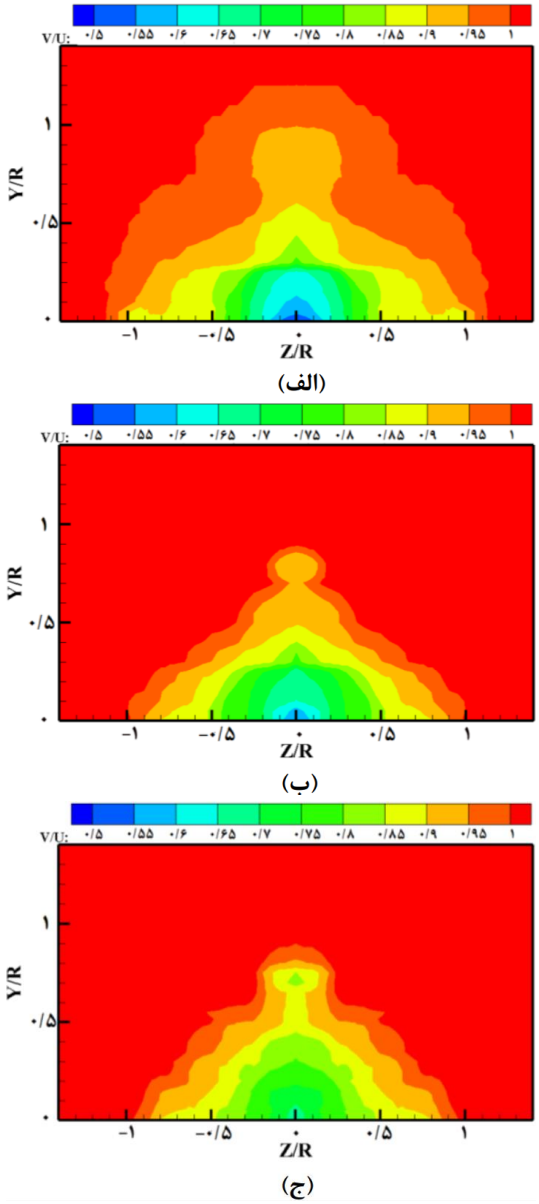
شکل می‌توان به خوبی مشاهده کرد که جریان دنباله مدل زیرسطحی در قسمت پایینی پاشنه در اثر حضور پایه نگه‌دارنده مدل گسترش یافته است. اگرچه صفحات داده‌برداری و نیز عدد رینولدز در پژوهش حاضر با پژوهش انجام‌شده توسط جیمنز و همکاران متفاوت است اما روند نتایج به دست آمده از آزمایش پراب پنج حفره (شکل ۸-الف) و آزمایش جریان سنج سیم داغ (شکل ۸-ب) کاملاً با نتایج به دست آمده توسط جیمنز و همکاران همخوانی دارد. برای اثبات تکرارپذیر بودن اندازه‌گیری‌ها، اندازه‌گیری سرعت توسط پراب پنج حفره و جریان سنج سیم داغ برای خط $Z/D =$ ۰ دو بار صورت گرفته و همان طور که مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده در هردو آزمایش اختلاف بسیار اندکی باهم دارد.



شکل ۸) توزیع سرعت متوسط در صفحه $X/L = ۰/۹۷۸$ برای خطوط $Z/D =$ ۰، ۰/۱۲۵ $Z/D =$ و $Z/D = ۰/۲۵$ و مقایسه نتایج با جیمنز و همکاران [19] در $X/L = ۱/۷$ (الف) نتایج اندازه‌گیری توسط پراب پنج حفره (ب) نتایج اندازه‌گیری توسط سیم داغ

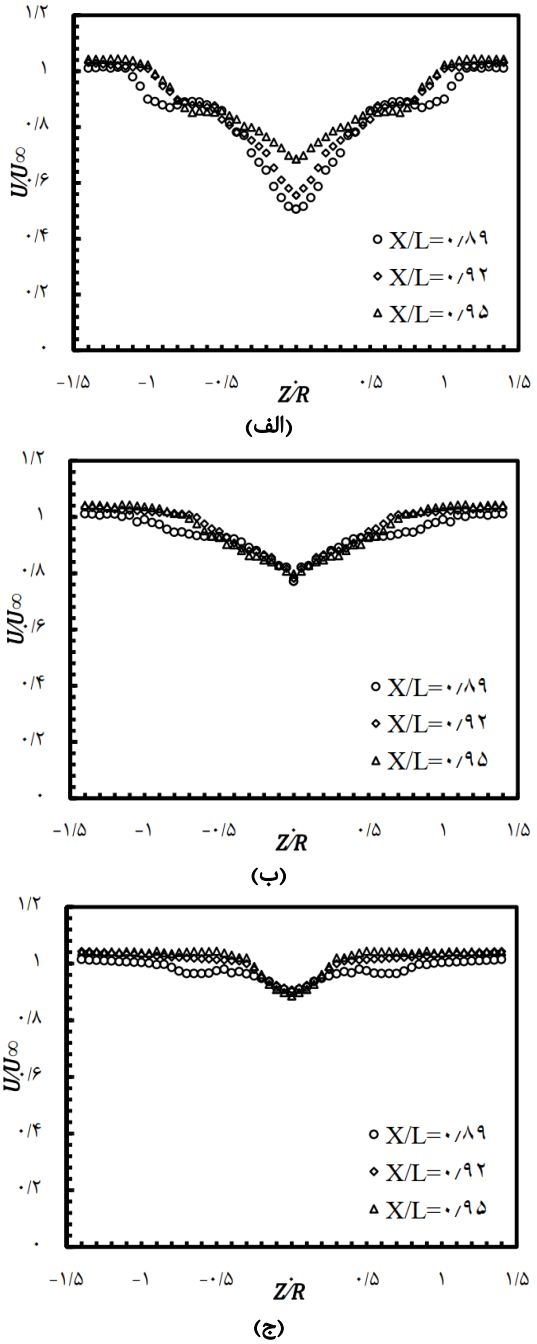
۴-۴- بررسی جریان دنباله زیرسطحی همراه با بالک های انتهایی بدون زاویه انحراف

هرچه جریان ورودی به پروانه زیرسطحی یکنواخت‌تر باشد عملکرد پروانه نیز بهتر بوده و هرچه جریان ورودی به پروانه دارای میزان غیریکنواختی و اغتشاشات بیشتر باشد، راندمان عملکرد پروانه کاهش‌یافته و باعث ایجاد ضربه و تولید نویز و صدای بیشتر توسط پروانه می‌شود. حضور بالک های انتهایی بر روی پاشنه زیرسطحی باعث پیچیده‌تر شدن جریان دنباله ورودی به پروانه خواهد شد. در نتیجه هرگونه تغییر در سطوح مذکور که به کاهش این پیچیدگی کمک کند، در صنعت زیرسطحی مطلوب و مورد توجه خواهد بود. در این قسمت بالک های انتهایی مدل سابوف در سه مکان در راستای طولی بر روی پاشنه قرارگرفته به نحوی که فاصله انتهای سطوح مذکور از نوک دماغه مدل به ترتیب برابر $X/L =$ ۰/۸۹، $X/L = ۰/۹۲$ و $X/L = ۰/۹۵$ است. برای هر یک از حالت‌ها پس از عبور جریان هوا درون تونل باد جریان دنباله تشکیل یافته در قسمت پاشنه ($X/L = ۰/۹۷۸$) توسط جریان سنج سیم داغ اندازه‌گیری شده است. شکل ۹ کانتور سرعت متوسط اندازه‌گیری شده توسط جریان سنج سیم داغ را برای سه حالت فوق نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود برای حالتی که فاصله بالک های انتهایی از دماغه برابر $X/L = ۰/۸۹$ (شکل ۹-الف) بوده پهنای دنباله به اندازه ۱/۲R است در حالی‌که برای فاصله $X/L = ۰/۹۲$ (شکل ۹-ب) پهنای دنباله برابر R بوده و نیز برای فاصله $X/L = ۰/۹۵$(شکل ۹-ج) برابر ۰/۹R است. بنابراین با نصب بالک های انتهایی در فاصله $X/L = ۰/۹۵$ پهنای دنباله از همه حالت‌ها کمتر خواهد بود. همچنین مقدار سرعت متوسط در مرکز جریان دنباله یعنی محل قرارگیری پروانه زیرسطحی در حالتی که بالک های انتهایی در فاصله $X/L = ۰/۹۵$ قرار دارند از دو حالت دیگر کمتر است. در نتیجه میزان غیریکنواختی جریان در این ناحیه کاهش خواهد یافت که از منظر تولید جریان یکنواخت‌تر برای ورود به پروانه بهتر خواهد بود.



شکل ۹) مقایسه سرعت متوسط جریان در صفحه y-z انتهای مدل زیرسطحی در حالتی که بالک های انتهایی فاقد زاویه انحراف می باشند: (الف) $X/L =$ ۰/۸۹، (ب) $X/L = ۰/۹۲$، (ج) $X/L = ۰/۹۵$

برای مقایسه بیشتر مقدار سرعت متوسط در صفحه میانی مدل یعنی Y/R = ۰ برای سه حالت مختلف نصب بالک های انتهایی در شکل ۱۰- الف ترسیم شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود در شعاع Z/R ≤ ۰/۵ یعنی جایی که پروانه زیرسطحی نصب می‌شود مقدار سرعت متوسط جریان دنباله برای حالتی که بالک های انتهایی در فاصله X/L = ۰/۹۵ نصب‌شده‌اند تقریباً به اندازه ۲۰% بیشتر از دو حالت دیگر است. در خارج از این شعاع مقدار سرعت متوسط در این حالت (نصب بالک های انتهایی



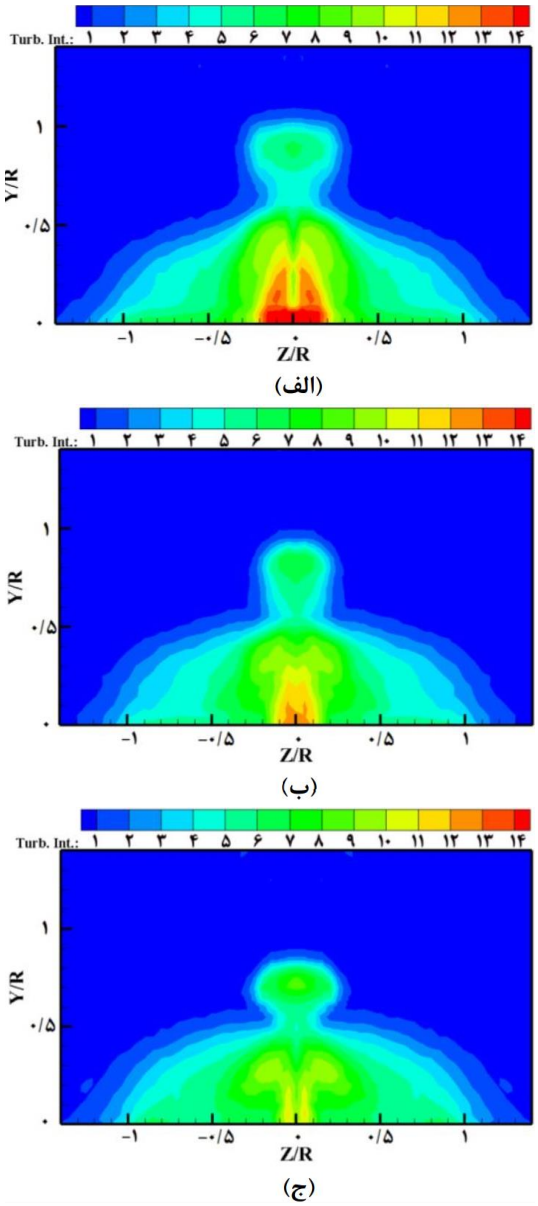
شکل ۱۰) مقایسه سرعت متوسط جریان در صفحه y-z انتهای مدل زیرسطحی در $o: X/L$ = ۰/۸۹ ، $\diamond: X/L$ = ۰/۹۲ ، $\Delta: X/L$ = ۰/۹۵ در حالتی که بالک های انتهایی فاقد زاویه انحراف می باشندو برای فواصل: (الف) Y/R = ۰ ، (ب) Y/R = ۰/۳ ، (ج) Y/R = ۰/۶

در فاصله X/L = ۰/۹۵) تقریباً کمتر از دو حالت دیگر است. در نتیجه رفتار جریان دنباله زیرسطحی در فاصله کمتر از Z/R ≤ ۰/۵ با رفتار آن در فاصله بیشتر از Z/R ≥ ۰/۵ متفاوت است. در واقع با جابجایی بالک های انتهایی زیرسطحی به سمت انتهای پاشنه، جریان دنباله در محل حضور پروانه ضعیف‌تر اما در خارج از آن دنباله قوی‌تری در اثر حضور بالک های انتهایی بر روی پاشنه زیرسطحی تشکیل می‌شود. همچنین در این شکل دیده می‌شود که پهنای منطقه دنباله زیرسطحی هرچه بالک های انتهایی به سمت دماغه نصب می‌شوند، افزایش خواهد یافت که این موضوع باعث افزایش میزان نیروی درگ اعمال‌شده بر روی بدنه زیرسطحی خواهد شد.

همچنین مقدار سرعت متوسط در خط Y/R = ۰/۳ در شکل ۱۰- ب و برای خط Y/R = ۰/٦ در شکل ۱۰- ج برای سه مکان نصب بالک های انتهایی ترسیم شده است. همان طور که در این شکل‌ها نیز دیده می‌شود هرچه فاصله از مرکز مدل بیشتر می‌شود جریان دنباله ضعیف‌تر شده و مقدار سرعت متوسط به سرعت جریان آزاد نزدیک‌تر می‌شود. مقدار سرعت متوسط جریان دنباله زیرسطحی در لایه‌های بالاتر تفاوت چندانی باهم ندارند اگرچه در فاصله Z/R ≤ ۰/۵ مقدار سرعت متوسط برای حالتی که بالک های انتهایی در X/L = ۰/۸۹ قرار دارند به اندازه اندک بیشتر از دو حالت دیگر می‌باشد. همچنین در این شکل‌ها نیز می‌توان مشاهده کرد که پهنای منطقه دنباله در حالت مذکور (X/L = ۰/۸۹) بیشتر از دو حالت دیگر است.

۴-۵- اندازه‌گیری شدت تلاطم جریان دنباله زیرسطحی

روند اندازه‌گیری‌ها در این قسمت همانند قسمت قبل است به طوری که بالک های انتهایی در سه فاصله طولی نصب‌شده و با عبور جریان از روی مدل، جریان دنباله تشکیل‌شده توسط جریان سنج سیم داغ اندازه‌گیری شده است. در شکل ۱۱ کانتور شدت تلاطم اندازه‌گیری شده توسط جریان سنج سیم داغ در صفحه Y-Z و در انتهای مدل زیرسطحی یعنی فاصله طولی X/L = ۰/۹۷۸ برای فواصل طولی بالک های انتهایی از دماغه X/L = ۰/۸۹, ۰/۹۲, ۰/۹۵ ارائه شده است. با مقایسه این شکل‌ها در کنار یکدیگر می‌توان نتیجه‌گیری نمود که: ۱- کمترین میزان پهنای شدت تلاطم در جریان دنباله کلی برای حالتی که بالک های انتهایی در فاصله X/L = ۰/۹۵ واقع‌شده‌اند، مشاهده می‌شود. ۲- مقدار شدت تلاطم ناشی از جریان گردابه‌های نوک در بالک های انتهایی در فاصله X/L = ۰/۹۵ نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است اما برای دنباله بالک های انتهایی تقریباً کمترین مقدار شدت تلاطم را می‌توان برای فاصله طولی X/L = ۰/۸۹ مشاهده کرد. این موضوع البته فقط برای بالک های انتهایی قائم بوده و برای بالک های انتهایی افقی که جریان دنباله پایه نگه‌دارنده وارد دنباله مدل می‌شود مقدار شدت تلاطم در پشت بالک های مذکور نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است. بنابراین از آنجایی که در این تحقیق برجک



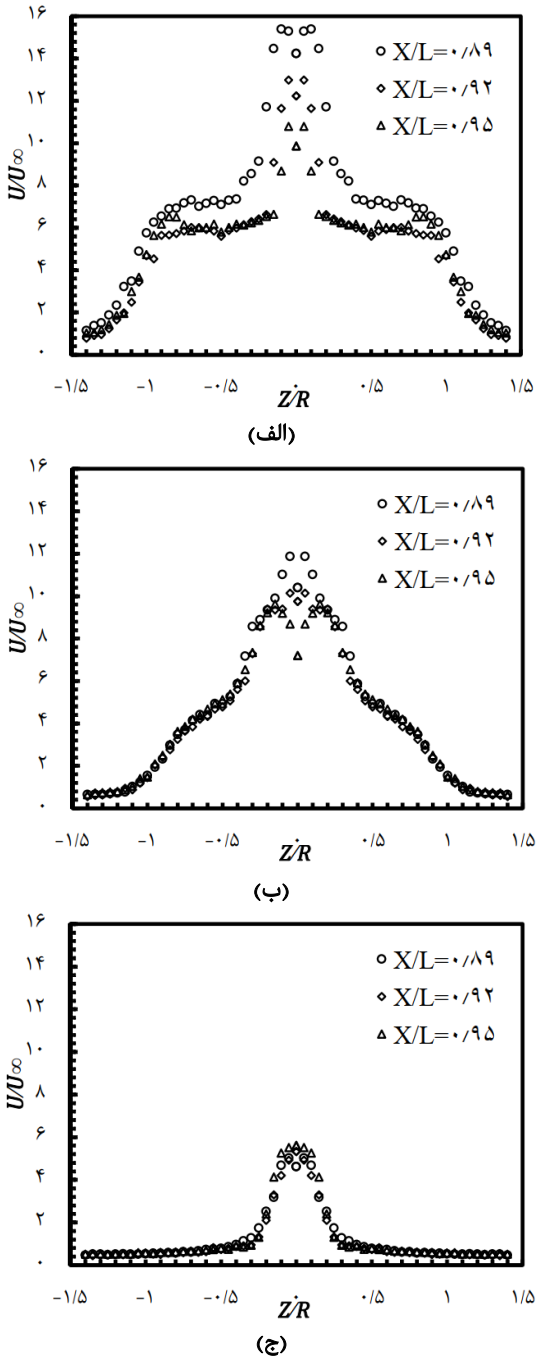
شکل ۱۱) مقایسه شدت تلاطم جریان در صفحه y-z انتهای مدل زیرسطحی برای سه محل قرارگیری بالک های انتهایی بر روی پاشنه در حالتی که بالک های انتهایی فاقد زاویه انحراف می‌باشند: (الف)$X/L =$ ۰/۸۹ ، (ب)$X/L =$ ۰/۹۲ ، (ج)$X/L =$ ۰/۹۵

بر روی مدل زیرسطحی نصب نشده ممکن است با نصب بالک های انتهایی جریان دنباله ناشی از آن‌ها تقریباً کاری شبیه به دنباله پایه نگه‌دارنده را انجام دهد. به هر حال با توجه به این مطالب نصب بالک های انتهایی در نزدیک انتهای زیرسطحی از نظر شدت تلاطم کمتر مناسب‌تر به نظر می‌رسد. ٤- مقدار شدت تلاطم در فاصله $Z/R \leq$ ۰/۵ یعنی محل کارکرد پروانه برای فاصله $X/L =$ ۰/۹۵ تقریباً کمتر دو فاصله دیگر است.

به طور کلی با توجه به نتایجی که از اندازه‌گیری جریان توسط جریان سنج سیم داغ به دست آمد می‌توان گفت که برای هنگامی- که بالک های انتهایی فاقد زاویه انحراف هستند نصب بالک های انتهایی در فاصله طولی $X/L =$ ۰/۹۵ شرایط بهتری را برای رسیدن به جریان با شدت تلاطم کمتر در محدوده‌ی کارکرد پروانه فراهم می‌کند.

۴-۶- مقایسه کمی توزیع شدت تلاطم در فواصل مختلف از مرکز مدل

در این قسمت به منظور مقایسه کمی مقادیر، مقدار شدت تلاطم جریان دنباله در انتهای مدل زیرسطحی برای سه فاصله مختلف از مرکز مدل مقایسه شده است. در شکل ۱۲ نمودار شدت تلاطم



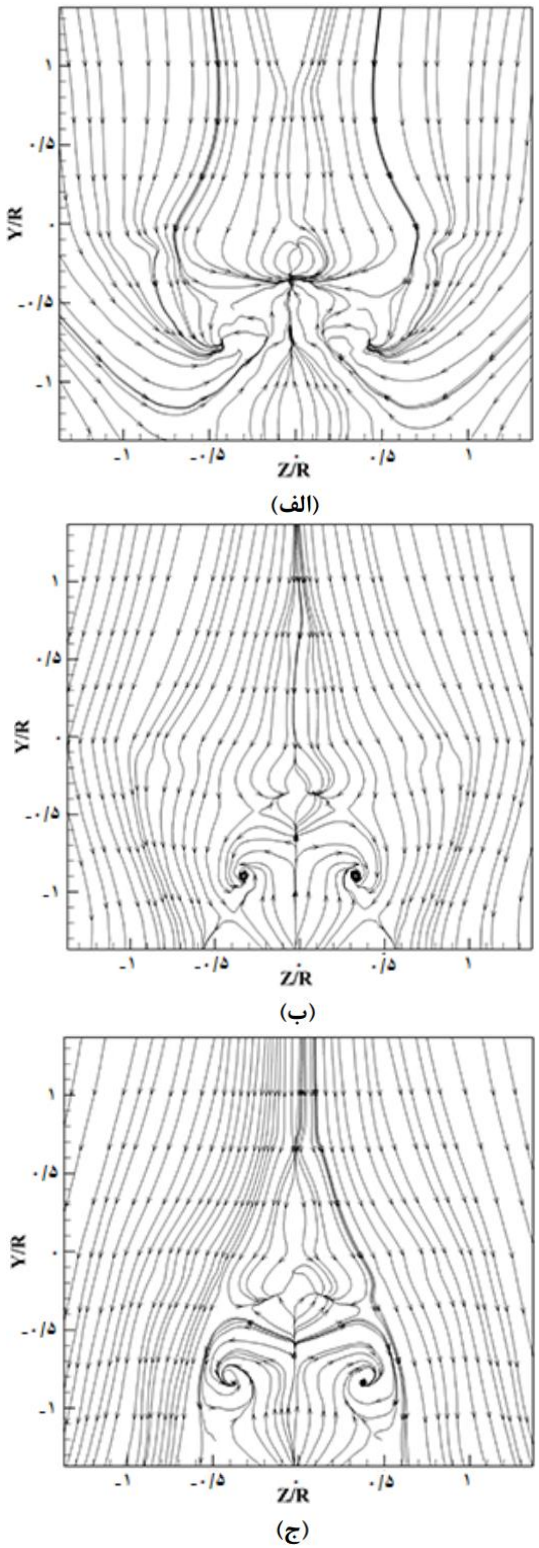
شکل ۱۲) مقایسه شدت تلاطم جریان در صفحه y-z انتهای مدل زیرسطحی در $o: X/L =$ ۰/۸۹ ، $\diamond: X/L =$ ۰/۹۲ ، $\Delta: X/L =$ ۰/۹۵ در حالتی که بالک های انتهایی فاقد زاویه انحراف می باشندو برای فواصل: (الف) Y/R = ۰ ، (ب) Y/R = ۰/۳ ، (ج) Y/R = ۰/۶

اندازه‌گیری شده توسط جریان سنج سیم داغ در صفحه y-z به فاصله طولی $X/L =$ ۰/۹۷۸ از دماغه مدل و در فاصله Y/R = ۰ از مرکز مدل (شکل ۱۲- الف)، Y/R = ۰/۳ (شکل ۱۲- ب) و Y/R = ۰/٦ (شکل ۱۲- ج) در راستای محور Z برای سه حالت نصب بالک های انتهایی در فاصله $X/L =$ ۰/۸۹, ۰/۹۲, ۰/۹۵ ترسیم شده است. در شکل ۱۲- الف مشاهده می‌شود که برای حالتی که بالک های انتهایی مدل زیرسطحی در فاصله $X/L =$ ۰/۸۹ قرار داشته‌اند، در مرکز جریان دنباله مقدار شدت تلاطم تقریباً به اندازه ۲۰% از دو حالت دیگر بیشتر است. پس از آن بیشترین شدت تلاطم در شعاع Z/R ≤ ۰/۵ متعلق به حالت نصب بالک های انتهایی در فاصله طولی $X/L =$ ۰/۹۲ می‌باشد. در خارج از این شعاع(Z/R ≥ ۰/۵) تقریباً برای بیشتر نقاط مقدار شدت تلاطم برای دو فاصله $X/L =$ ۰/۹۲, ۰/۹۵ یکسان است. در شکل ۱۲-ب و شکل ۱۲-ج نیز نمودار شدت تلاطم تنها در یک فاصله اندک از مرکز مدل در راستای محور Z متفاوت بوده و برای حالت نصب بالک های انتهایی در فاصله $X/L =$ ۰/۸۹ کمی بیشتر از دو حالت دیگر است و در بقیه نقاط تقریباً دارای مقدار یکسان هستند. به طور کلی با مقایسه نتایج به دست آمده در این قسمت می‌توان نتیجه گرفت که نصب بالک های انتهایی در فواصل نزدیک‌تر به انتهای پاشنه زیرسطحی باعث کاهش شدت تلاطم جریان ورودی به پروانه خواهد شد.

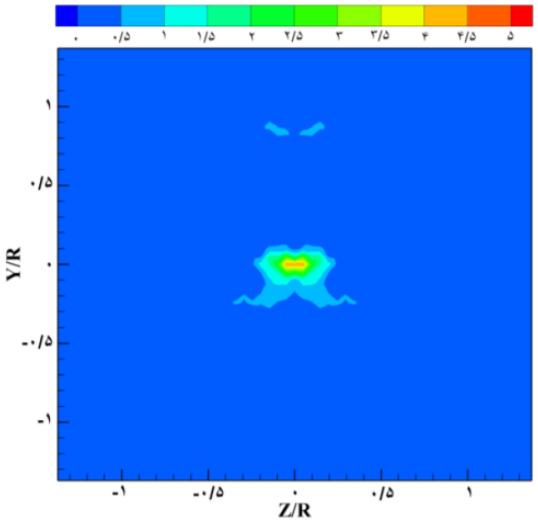
۴-۷- نتایج اندازه‌گیری جریان به کمک پراب پنج حفره

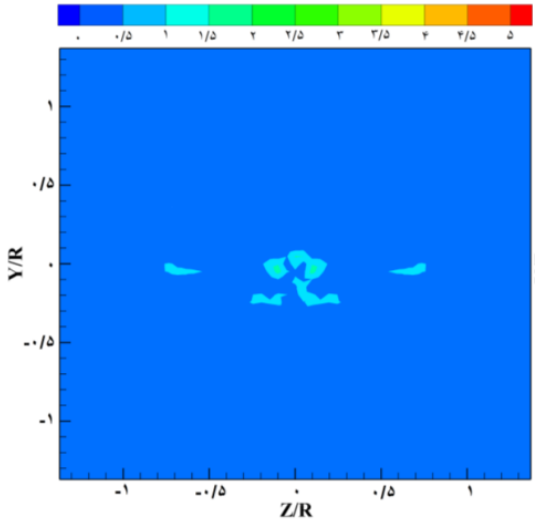
در این قسمت به منظور مشاهده چگونگی رفتار جریان دنباله زیرسطحی پس از نصب پراب پنج حفره کالیبره شده بر روی دستگاه منتقل‌کننده پراب، اقدام به اندازه‌گیری جریان با استفاده از پراب مذکور می‌شود. در اینجا با استفاده از مؤلفه‌های سرعت بدست آمده از کالیبراسیون پراب پنج حفره اقدام به ترسیم خطوط جریان با استفاده از بردارهای سرعت در صفحه Y-Z در انتهای مدل شده و نتایج آن در شکل ۱۳ آورده شده است. با توجه به این شکل می‌توان در هر کدام از حالات نصب بالک های انتهایی وجود دو جفت گردابه را مشاهده کرد که شامل یک جفت گردابه در مرکز جریان دنباله و یک جفت گردابه نیز در قسمت پایین جریان دنباله است. اگرچه انتقال بالک های انتهایی به انتهای پاشنه یعنی فاصله $X/L =$ ۰/۹۵ باعث تقویت جفت گردابه پایین شده اما از طرف دیگر باعث کاستن از جفت گردابه مرکز که اتفاقاً محل قرارگیری پروانه زیرسطحی نیز هست، شده است.

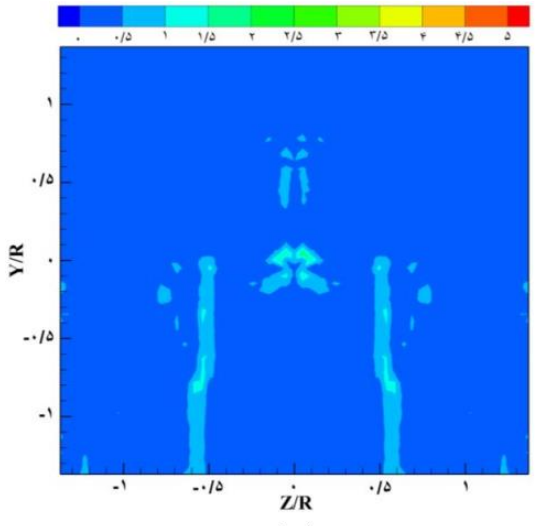
در شکل ١٤ کانتور اندازه ورتیسیته ω_x بر اساس تغییرات دو مؤلفه سرعت u_y و u_z برای فواصل طولی بالک های انتهایی از دماغه $X/L =$ ۰/۸۹, ۰/۹۲, ۰/۹۵ مقایسه شده است. با مشاهده این شکل‌ها در کنار یکدیگر می‌توان نتیجه گرفت که نصب بالک های انتهایی در فاصله $X/L =$ ۰/۸۹ باعث افزایش میزان ورتیسیته جریان ورودی به پروانه می‌شود. در مقابل، نصب سطوح مذکور در فاصله طولی $X/L =$ ۰/۹۲, ۰/۹۵ می‌تواند منجر به کاهش میزان ورتیسیته جریان ورودی به پروانه شود. همچنین از نظر پهنای کانتور ورتیسیته در مرکز می‌توان گفت که نصب بالک‌های انتهایی در فاصله طولی $X/L =$ ۰/۹۵ شرایط بهتری را فراهم می‌کند.



شکل ۱۳) مقایسه الگوی جریان به کمک بردارهای سرعت متوسط برای سه محل قرارگیری بالک های انتهایی (الف)$X/L =$ ۰/۸۹ ، (ب) $X/L =$ ۰/۹۲، (ج)$X/L =$ ۰/۹۵



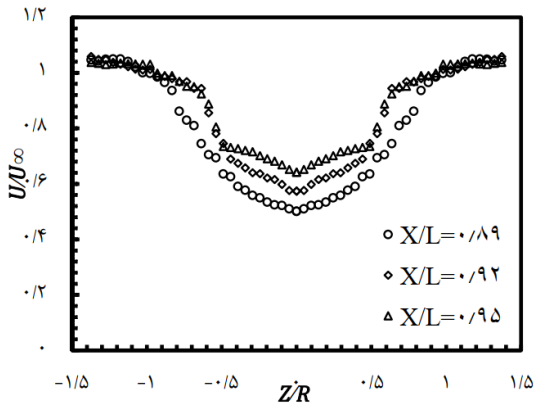


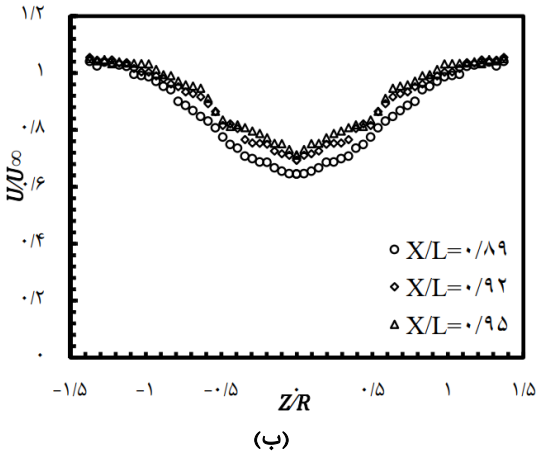


شکل ۱۴) مقایسه اندازه ورتیسیتهω_x جریان در صفحه y-z انتهای مدل زیرسطحی برای سه محل قرارگیری بالک های انتهایی بر روی پاشنه در حالتی که بالک های انتهایی فاقد زاویه انحراف می‌باشند: (الف)$X/L=$ ۰/۸۹، (ب)$X/L=$ ۰/۹۲، (ج)$X/L=$ ۰/۹۵

۴-۸- بررسی اثر پایه نگه‌دارنده مدل

در این قسمت به منظور مشاهده اثر پایه نگه‌دارنده مقدار سرعت متوسط اندازه‌گیری شده توسط پراب پنج حفره برای سه مکان نصب بالک های انتهایی به صورت نمودار در شکل ۱۵ ارائه شده است. شکل ۱۵- الف نمودار سرعت متوسط در خط $Y/R=$ ۰/۳- شکل ۱۵- ب نمودار سرعت متوسط در خط $Y/R=$ ۰/۶-را نشان می‌دهد. در هر دو شکل فوق مشاهده می‌شود که مقدار سرعت متوسط تقریباً در سرتاسر شعاع مدل برای هر سه حالت نصب بالک های انتهایی تا ۱۵% کاهش می‌یابد. همچنین با مشاهده این دو شکل می‌توان نتیجه گرفت که اولاً اثر حضور پایه نگه‌دارنده از شعاع $Z/R \leq$ ۰/۵ به $Z/R \leq$ ۰/۷ افزایش می‌یابد و ثانیاً حضور پایه نگه‌دارنده در بالادست پاشنه مدل زیرسطحی باعث شده است تا در سرتاسر فواصل Z/R، برای حالت نصب بالک های انتهایی در $X/L=$ ۰/۹۵ میزان سرعت متوسط جریان بیشتر بوده و در نتیجه جریان دنباله مدل زیرسطحی ضعیف‌تر باشد. از آنجا که در این پژوهش برجک زیرسطحی نصب نشده است، ممکن است حضور پایه نگه‌دارنده در قسمت میانی مدل زیرسطحی اثری شبیه به اثر برجک را داشته باشد که نیاز به مطالعه بیشتر در این زمینه



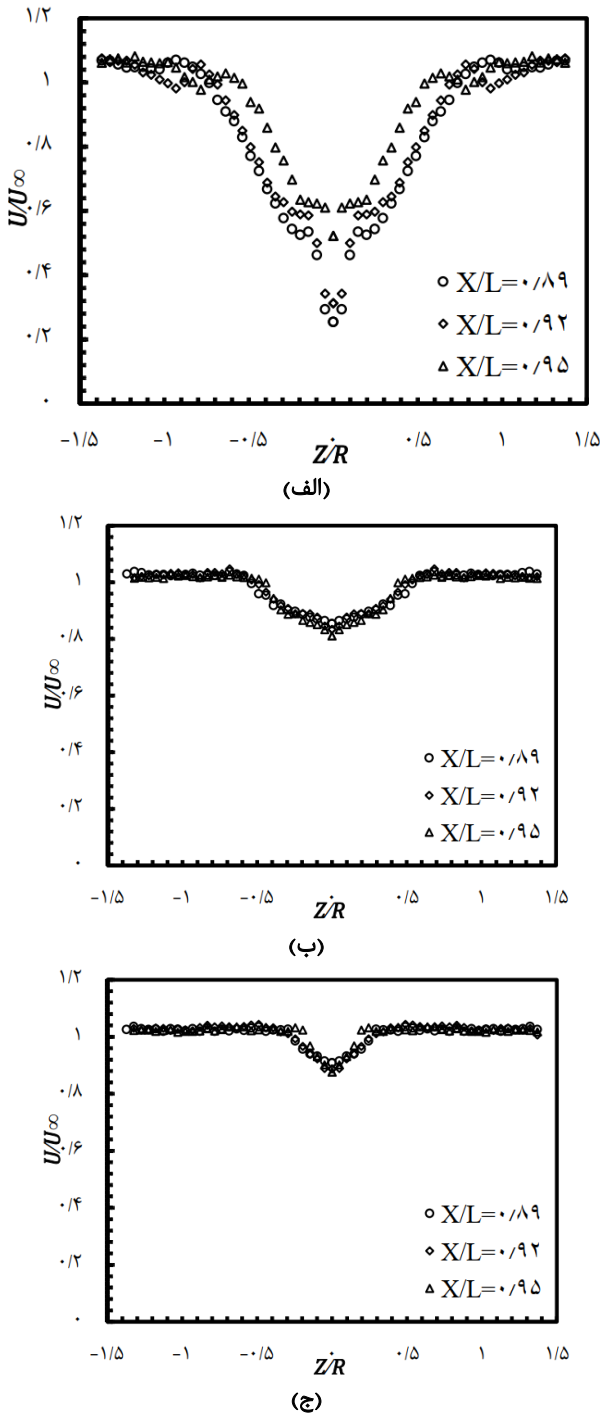


شکل ۱۵) مقایسه سرعت متوسط جریان در صفحه y-z انتهای مدل زیرسطحی در $X/L=$ ۰/۸۹ ،$X/L=$ ۰/۹۲ ،$X/L=$ ۰/۹۵ در حالتی که بالک های انتهایی فاقد زاویه انحراف می باشندو برای فواصل: (الف)$Y/R=$ ۰ ، (ب)$Y/R=$ ۰/۳

دارد. به طور کلی از آنچه که در این قسمت گفته شد می‌توان استنباط نمود که اثر حضور پایه نگه‌دارنده در قسمت میانی مدل مانع از اثرگذاری مبحث جابجایی بالک های انتهایی به سمت انتهای پاشنه ($X/L =$ ۰/۹۵) در بهبود جریان دنباله مدل زیرسطحی نخواهد شد.

۴-۹- بررسی جریان دنباله زیرسطحی همراه با بالک های انتهایی همراه دارای زاویه انحراف ۵ درجه

هدف از نصب بالک های انتهایی بر روی پاشنه زیرسطحی، هدایت وسیله مذکور و انجام مانورهای گوناگون پیچ و یاو می‌باشد. بالک های انتهایی ایرفویل‌های با مقاطع متقارن گوناگون بوده که در صورت داشتن زاویه انحراف(زاویه حمله) نسبت به راستای جریان منجر به تولید نیروی لیفت بر روی آن‌ها در قسمت پاشنه زیرسطحی شده که در نهایت با تولید ممان چرخشی حول مرکز وسیله زیرسطحی باعث گردش آن به سمت دلخواه خواهد شد. بنابراین طبیعی است که برای هدایت وسیله زیرسطحی دائم نیاز به چرخش بالک های انتهایی و انجام عملیات مانوری باشد. در نتیجه سطوح مذکور دیگر به صورت مستقیم بر روی بدنه زیرسطحی قرار نداشته و ممکن است رفتار متفاوتی از خود بروز دهند. با چرخش بالک های انتهایی یک ناحیه کم سرعت در قسمت میانی پروانه ایجادشده و با افزایش زاویه انحراف بالک های انتهایی این ناحیه گسترش می‌یابد[35]. در نتیجه مطالعه جریان دنباله زیرسطحی درحالی‌که بالک های انتهایی دارای زاویه انحراف هستند نیز دارای اهمیت می‌باشد. از این رو در این قسمت درحالی‌که بالک های انتهایی در سه مکان $X/L =$ ۰/۸۹ و $X/L =$ ۰/۹۲ و $X/L =$ ۰/۹۵ قرار داشته‌اند به میزان $\delta = 5°$ حول محور z (بالک های انتهایی واقع در صفحه افقی که موجب گردش زیرسطحی در صفحه قائم می‌شوند) به صورت ساعت گرد چرخانده شده‌اند. جریان دنباله تشکیل یافته بر روی انتهای مدل زیرسطحی توسط پراب پنج حفره اندازه‌گیری شده و مقدار سرعت متوسط در صفحه میانی مدل یعنی Y/R = ۰ برای سه حالت مختلف نصب بالک های انتهایی در شکل ۱۶-الف ترسیم شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در شعاع $Z/R \leq$ ۰/۵ مقدار سرعت متوسط جریان دنباله برای حالتی که بالک های انتهایی در فاصله $X/L =$ ۰/۹۵ نصب‌شده‌اند، بیشتر از دو حالت دیگر است. مقدار سرعت متوسط در خارج از این فاصله ($Z/R \geq$ ۰/۵) در این حالت تقریباً کمتر از دو مکان دیگر برای نصب بالک های انتهایی می-باشد. در اینجا نیز با بیشتر شدن فاصله از مرکز مدل جریان دنباله ضعیف‌تر شده و مقدار سرعت متوسط به سرعت جریان آزاد نزدیک-تر می‌شود. همچنین مقدار سرعت متوسط در خط Y/R = ۰/۳ در شکل ۱۶-ب و برای خط Y/R = ۰/۶ در شکل ۱۶-ج برای سه مکان نصب بالک های انتهایی ترسیم شده است. همان طور که در این شکل‌ها نیز دیده می‌شود مقدار سرعت متوسط جریان دنباله زیرسطحی در لایه‌های بالاتر تفاوت اندکی باهم داشته و گاهی نیز مقدار سرعت متوسط برای حالتی که بالک های انتهایی در $X/L =$ ۰/۸۹ قرار دارند بیشتر از دو حالت دیگر می‌باشد، اگرچه این تفاوت بسیار اندک است. همچنین در این شکل‌ها نیز می‌توان مشاهده کرد که پهنای منطقه دنباله در حالت $X/L =$ ۰/۸۹ بیشتر از دو حالت دیگر است.



شکل ۱۶) مقایسه سرعت متوسط جریان در صفحه y-z انتهای مدل زیرسطحی در $o: X/L =$ ۰/۸۹ ، $\diamond: X/L =$ ۰/۹۲ ، $\Delta: X/L =$ ۰/۹۵ در حالتی که بالک های انتهایی دارای زاویه انحراف ۵ درجه می‌باشند و برای فواصل: (الف) Y/R = ۰ ، (ب) Y/R = ۰/۳ ، (ج) Y/R = ۰/۶

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی اثر تغییر موقعیت طولی بالک های انتهایی در محل پاشنه زیردریایی بر روی جریان دنباله تشکیل یافته در انتهای آن و محل نصب پروانه زیرسطحی می-باشد. در اثر قرار گرفتن بالک های انتهایی بر روی پاشنه زیرسطحی میدان جریان گردابه‌ای پیچیده‌ای در اطراف آن به وجود می‌آید، بنابراین هرگونه تغییر در جهت کاستن از میزان این پیچیدگی مطلوب خواهد بود. در طول مطالعهٔ تجربی حاضر سعی شد تا با انجام آزمایش‌های تجربی تغییرات جریان دنباله تشکیل یافته در انتهای مدل زیرسطحی سابوف در اثر جابه‌جا نمودن محل بالک های انتهایی بر روی پاشنه به کمک پراب پنج حفره و جریان سنج سیم داغ اندازه‌گیری و ثبت شود. به طور کلی می‌توان نتایج به-دست آمده از پژوهش حاضر را به‌صورت زیر خلاصه نمود:

با جابه‌جا نمودن بالک های انتهایی در راستای طولی در محل پاشنه زیرسطحی از $X/L =$ ۰/۸۹ به $X/L =$ ۰/۹۵ جریان دنباله تشکیل یافته در انتهای مدل از خود رفتار متفاوتی را نشان می-دهد. برخلاف انتظار در شعاع $Z/R \leq$ ۰/۵ از بدنه که پروانه قرار داشته و جریان دنباله زیرسطحی به آن وارد می‌شود، جریان دنباله با افزایش مقدار سرعت متوسط یکنواخت‌تر می‌شود و در خارج از این شعاع از میزان یکنواختی جریان دنباله کاسته می‌شود.

در اثر جابه‌جایی طولی بالک های انتهایی بر روی پاشنه از$= X/L$ ۰/۸۹ به $X/L =$ ۰/۹۵ ، پهنای جریان دنباله در انتهای مدل از ۱/۲R به ۰/۹R تغییر می‌کند. در واقع با افزایش فاصله بالک های انتهایی از مرکز مدل در راستای شعاعی جریان دنباله تشکیل یافته در انتهای مدل نیز پهن‌تر خواهد شد.

اثر جابه‌جایی طولی بالک های انتهایی در قسمت پاشنه در شرایط مانور یعنی داشتن زاویه انحراف برای بالک های مذکور بررسی شد. جابجایی بالک های انتهایی بر روی پاشنه و به سمت انتهای مدل در شرایط مانوری نیز موجب افزایش مقدار سرعت متوسط در قسمت مرکزی جریان دنباله تشکیل‌شده در انتهای مدل زیرسطحی یعنی محل نصب پروانه می‌شود.

اثر حضور پایه نگه‌دارنده بر جریان دنباله تشکیل یافته در انتهای مدل زیرسطحی بررسی شد. در اثر ورود جریان دنباله پایه نگه‌دارنده به قسمت پاشنه سرعت متوسط جریان دنباله در قسمت مرکزی دنباله در اثر جابجایی بالک های انتهایی با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد. در پژوهش حاضر اثر حضور برجک زیرسطحی مطالعه نشده است و از آنجا که ممکن است وجود برجک بر روی بدنه باعث به وجود آوردن شرایطی شبیه به پایه نگه‌دارنده مدل شود، در نتیجه بررسی این موضوع در مطالعات پیش رو پیشنهاد می‌شود.

برای مواقعی که بالک های انتهایی فاقد زاویه انحراف هستند با حرکت بالک های مذکور از $X/L =$ ۰/۸۹ به $X/L =$ ۰/۹۵ مقدار شدت تلاطم جریان در نزدیکی سطح و محل کارکرد پروانه شیب نزولی به خود می‌گیرد. در نتیجه در فاصله $X/L =$ ۰/۹۵، کمترین مقدار شدت تلاطم در شعاع $Z/R \leq$ ۰/۵ مشاهده می‌شود.

نصب بالک های انتهایی در فواصل $X/L =$ ۰/۹۲, ۰/۹۵ باعث کاهش میزان ورتیسیته در قسمت مرکزی جریان دنباله زیرسطحی و جریان ورودی به پروانه می‌شود.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر فاصله طولی $X/L =$ ۰/۹۵ به عنوان مکان بهینه برای نصب بالک های انتهایی پاشنه به منظور تولید جریان دنباله با میزان یکنواختی بیشتر، شدت تلاطم و ورتیسیته کمتر انتخاب می‌شود.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

D	قطر مدل
L	طول کلی مدل زیردریایی
ℓ	فاصـــله انتهای بالک های انتهایی از انتهای مدل
U_∞	سرعت جریان آزاد
U	سرعت متوسط جریان
u_x	عدم قطعیت پارامتر x
R	شعاع مدل
Re_L	عدد رینولدز بر اساس طول مدل
x, y, z	مختصات کارتزین فاصله نقاط از مرکز دماغه مدل زیردریایی

علائم یونانی

α	زاویه پیچ
β	زاویهٔ یاو
$\boldsymbol{\omega_x}$	ورتیسیته در جهت محور x

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مقاله پس از حمد خداوند متعال از تمامی افراد موثر در به ثمر رسیدن این مقاله کمال تشکر و قدردانی را دارند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این مقاله متعهد می‌شوند که این مقاله در زمان ارسال برای این مجله در هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی در حال بررسی نبوده و تا تعیین تکلیف قطعی در این نشریه برای هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی دیگری ارسال نخواهد شد.

تعارض منافع: نویسندگان این مقاله با اختیار و آگاهی کامل، کلیه حقوق مادی مربوط به انتشار این مقاله را به نشریه دانشگاه تربیت مدرس، واگذار می‌نمایند و نشریه در انتشار این مقاله به هر صورت اختیار تام دارد و منافع مادی احتمالی متعلق به نشریه است.

سهم نویسندگان: ۱- شکراله محمدبیگی ۳۴% ۲- علیرضا شاطری ۳۳% ۳- مجتبی دهقان منشادی ۳۳%

منابع مالی: دانشگاه شهرکرد

منابع

1- Lee SK, Manovski P, Kumar C. Wake of a dst submarine model captured by stereoscopic particle image velocimetry. Laser. 2018;50:60-65.

2- Lee SK, Manovski P, Kumar C. Wake of a cruciform appendage on a generic submarine at 10◦ yaw. Journal of Marine Science and Technology. 2019:1-3.
3- Feng D, Wang X, Jiang F, Zhang Z. Large eddy simulation of darpa suboff for Re= 2.65× 107. Journal of Coastal Research. 2015 (73):687-91.
4- Fureby C, Anderson B, Clarke D, Erm L, Henbest S, Giacobello M, Jones D, Nguyen M, Johansson M, Jones M, Kumar C. Experimental and numerical study of a generic conventional submarine at 10 yaw. Ocean Engineering. 2016;116:1-20.
5- Fureby C, Norrison D. RANS, DES and LES of the flow past the 6: 1 prolate spheroid at 10 and 20 angle of incidence. InAIAA Scitech 2019 Forum 2019:85.
6- Posa A, Balaras E. A numerical investigation about the effects of Reynolds number on the flow around an appended axisymmetric body of revolution. Journal of Fluid Mechanics. 2020;884.
7- Rao ZQ, Yang CJ. Numerical prediction of effective wake field for a submarine based on a hybrid approach and an RBF interpolation. Journal of Hydrodynamics. 2017;29(4):691-701.
8- Manovski P, Jones MB, Henbest SM, Xue Y, Giacobello M, de Silva C. Boundary layer measurements over a body of revolution using long-distance particle image velocimetry. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2020;83:108591.
9- Zhou D, Wang K, Wang M. Large-Eddy Simulation of an Axisymmetric Boundary Layer on a Body of Revolution. InAIAA Aviation 2020 Forum 2020:2989.
10- Manshadi MD, Esfandeh S, Dehghan AA, Saeidinezhad A. Experimental investigation of the wake of a submarine model by five-hole probe in a wind tunnel. Modares Mechanical Engineering. 2015;15(8).
11- Zhang J, Zhao F, Hong FW, Xu J. Towing PIV and its application on the juncture forms of stern appendage with main-body. InOptical Technology and Image Processing for Fluids and Solids Diagnostics. International Society for Optics and Photonics. 2003:5058:208-213.
12- Van Randwijck EF, Feldman JP. Results of experiments with a segmented model to investigate the distribution of the hydrodynamic forces and moments on a streamlined body of revolution at an angle of attack or with a pitching angular velocity. NAVAL SURFACE WARFARE CENTER CARDEROCK DIV BETHESDA MD HYDROMECHANICS DIRECTORATE; 2000.
13- Javadi M, Manshadi MD, Kheradmand S, Moonesun M. Experimental investigation of the effect of bow profiles on resistance of an underwater vehicle in free surface motion. Journal of Marine Science and Application. 2015;14(1):53-60.
14- Park JY, Kim N, Shin YK. Experimental study on hydrodynamic coefficients for high-incidence-angle maneuver of a submarine. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2017;9(1):100-13.
15- Sung C, Fu T, Griffin M, Huang T. Validation of incompressible flow computational forces and moments on axisymmetric bodies at incidence. In33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 1995 (p. 528).
16- Huang T, Liu HL. Measurements of flows over an axisymmetric body with various appendages in a wind tunnel: the DARPA SUBOFF experimental program. 1994.
17- Kim H, Ranmuthugala D, Leong ZQ, Chin C. Six-DOF simulations of an underwater vehicle undergoing straight line and steady turning manoeuvres. Ocean Engineering. 2018;150:102-12.
18- Jiménez JM, Hultmark M, Smits AJ. The intermediate wake of a body of revolution at high Reynolds numbers. Journal of Fluid Mechanics. 2010;659:516.
19- Jiménez JM, Reynolds RT, Smits AJ. The effects of fins on the intermediate wake of a submarine model. Journal of Fluids Engineering. 2010;132(3).
20- Ashok A, Smits AJ. The turbulent wake of a submarine model in pitch and yaw. InEighth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena. Begel House Inc. 2013:1-6.
21- Liu ZH, Xiong Y, Wang ZZ, Wang S, Tu CX. Numerical simulation and experimental study of the new method of horseshoe vortex control. Journal of Hydrodynamics. 2010;22(4):572-81.
22- Paul AR, Upadhyay RR, Jain A. A novel calibration algorithm for five-hole pressure probe. International Journal of Engineering, Science and Technology. 2011;3(2).
23- Treaster AL, Yocum AM. The calibration and application of five-hole probes. PENNSYLVANIA STATE UNIV UNIVERSITY PARK APPLIED RESEARCH LAB; 1978.
24- Sitaram N, Srikanth K. Effect of chamfer angle on the calibration curves of five hole probes. International Journal of Rotating Machinery. 2014.
25- Karahan S, Kutay AT. Calibration of Five-Hole Probe with Redundant Coefficients. In31st AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. 2015:3381.
26- Young A, Guion R, Atkins N, Costan J. Novel usage of five-hole probes: Tidal channel turbulence measurements. 2016:1-8.
27- Town J, Camci C. A Time Efficient Adaptive Gridding Approach and Improved Calibrations in Five-Hole Probe Measurements. International Journal of Rotating Machinery. 2015.
28- Wang H, Zeng W, Zhang Q. Development of an omnidirectional five-hole pressure probe. AIAA Journal. 2016;54(7):2190-3.
29- Grimshaw SD, Taylor JV. Fast settling millimetre-scale five-hole probes. InASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition 2016 Jan 1. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. 2.16:1-13.
30- Magkoutas KI, Efstathiadis TG, Kalfas AI. Experimental Investigation of Geometry Effects and Performance of Five-Hole Probe in Measuring Jets in Crossflow. InXXII Biannual Symposium on Measuring Techniques in Turbomachinery Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines 2016:1-9.
31- Hall BF, Povey T. The Oxford Probe: an open access five-hole probe for aerodynamic measurements.

Measurement Science and Technology. 2017;28(3):035004.
32- Lum CW, Sandhu N, Diebold JM, Woodard B, Bragg MB. The application of a five-hole probe wake-survey technique to the study of swept wing icing aerodynamics. In9th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference 2017:4374.
33- Groves NC, Huang TT, Chang MS. Geometric characteristics of DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) SUBOFF models (DTRC model numbers 5470 and 5471). David Taylor Research Center Bethesda MD Ship Hydromechanics Dept; 1989.
34- Saeidinezhad A, Dehghan AA, Manshadi MD. Experimental investigation of hydrodynamic characteristics of a submersible vehicle model with a non-axisymmetric nose in pitch maneuver. Ocean engineering. 2015;100:26-34.
35- Takahashi K, Sahoo PK. Numerical Study on the Hydrodynamic Performance of the DARPA Suboff Submarine for Steady Translation. InInternational Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers. 2020:84409:41-52.