



# 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.<sup>1</sup> *MSC*,  
Shateri A.<sup>1\*</sup> *PhD*,  
Manshadi M. D.<sup>2</sup> *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.

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty of Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

<sup>2</sup>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  $6 \times 10^5$  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...

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

شکراله محمدیگی 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 بالک‌های انتهایی بر روی جریان دنباله ورودی به پروانه مدل زیرسطحی انجام شده است. به منظور بررسی اثر محل قرارگیری بالک‌های انتهایی به عنوان مهم‌ترین نوآوری پژوهش حاضر، بالک‌های مذکور در سه موقعیت طولی  $X/L = 0.89, 0.92, 0.95$  بر روی پاشنه مدل زیرسطحی نصب شده و جریان دنباله در موقعیت  $X/L = 0.978$  و عدد رینولدز  $6 \times 10^5$  توسط پراب پنج حفره و جریان سنج سیم داغ اندازه‌گیری شده است. در پایان این بررسی‌ها موقعیت طولی  $X/L = 0.95$  به عنوان مکان بهینه برای قرارگیری بالک‌های 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 به دست 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، بالک‌های 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

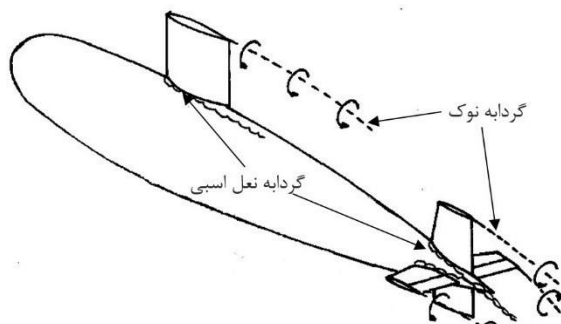
### ۱- مقدمه

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 بالک‌های انتهایی پاشنه، بالکهای سینه، برجک و غیره هستند. با فرار گرفتن قسمت‌های جانبی بر روی بدنه اصلی شکل خطوط جریان بسیار تحت تأثیر شکل بدنه قرار گرفته 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 بالک‌های انتهایی پاشنه است. در شکل ۱ می‌توان به طور شماتیک ساختارهای گردابه‌ای به وجود آمده در اثر اتصال برجک در قسمت میانی و بالک‌های انتهایی پاشنه در قسمت انتهایی بدنه زیردریایی را مشاهده نمود.

میزان یکنواختی میدان جریان ورودی به پروانه (جریان دنباله شناور) تأثیر فراوانی در بهینه‌سازی نوین زیردریایی دارد. در نتیجه بررسی گردابه‌های ایجاد شده 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 کوچک شده 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 انجام شده از قبیل پارک و همکاران [14] و هووانگ و لیو [15] اشاره نمود. پدیده‌شناسی گردابه‌های مختلف تشکیل شده در اطراف بدنه و قسمت‌های



شکل ۱) شماتیکی از نحوه تشکیل ساختارهای گردابه‌ای بر روی بدنه زیردریایی

می‌شود. ژانگ و همکاران<sup>[11]</sup> 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 یک مدل زیردریایی با بدنه متقارن همراه با برجک توسط لیو و همکاران<sup>[21]</sup> مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق پیشنهاد شد که به منظور از بین بردن گردابه نعل اسبی از یک وسیله منشوری استفاده شود که در پایین دست راستای گردابه‌های نعل اسبی برجک 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 منطقه پاشنه را اندازه‌گیری و نتایج عددی را با نتایج تجربی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که اثر این وسیله کوچک نسبت به مکان قرارگیری آن بر روی بدنه زیردریایی و در پشت برجک، بسیار حساس است و باید به صورت 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<sup>[22-31]</sup> اشاره نمود. لوم و همکاران<sup>[32]</sup> به بررسی کاربرد روش مطالعه دنباله بال دوزنقه‌ای 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 اعمال شده 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

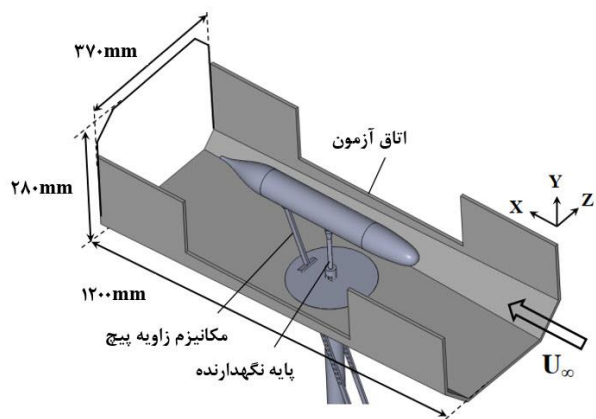
جانبی یک وسیله زیرسطحی، مورد توجه محققان زیادی بوده است. هووانگ و همکاران<sup>[16]</sup> با قرار دادن یک مدل زیردریایی سابوف (SUBOFF) به همراه برجک و کلیه متعلقات بدنه در تونل باد، دنباله مدل را در محل پروانه در عدد رینولدز  $10.6 \times 10^6$   $Re =$  اندازه‌گیری کردند. بر اساس مشاهدات آن‌ها گردابه نعل اسبی در محل دنباله برجک میدان دنباله با آشفتگی بیشتری را در کانتور سرعت محوری دنباله تولید شده در محل پروانه ایجاد می‌کرد. کیم و همکاران<sup>[17]</sup> به بررسی عددی جریان اطراف مدل زیرسطحی BB2 با ۶ درجه آزادی در جریان مستقیم و مانورهای پایا پرداختند. فوری و همکاران<sup>[5]</sup> به بررسی تجربی و عددی فیزیک جریان اطراف یک مدل زیرسطحی عمومی DSTO در جریان مستقیم با  $\beta = 0^\circ$  و شرایط مانور یاو با  $\beta = 10^\circ$  پرداختند. مانوسکی و همکاران به اندازه‌گیری تجربی لایه مزی تشکیل شده 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<sup>[18]</sup>. 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<sup>[2]</sup>.

میدان جریان پایین دست یک مدل زیردریایی، در اعداد رینولدز مختلف توسط جیمنز و همکاران<sup>[18]</sup> و به کمک جریان سنج سیم داغ در تونل باد بررسی شده است. اندازه‌گیری های دنباله در مکان چند برابر قطر، پایین دست مدل در صفحه میانی با استفاده از جریان سنج سیم داغ دو بعدی انجام شده است. نتایج توزیع سرعت متوسط در پایین دست پایه نگه‌دارنده مدل، نشان‌دهنده تأثیرات مهم اثرات دنباله نگه‌دارنده روی جریان اطراف بدنه زیردریایی بود. جیمنز و همکاران در یک تحقیق دیگر<sup>[19]</sup> 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 پایین دست بالک های مذکور همراه با اغتشاش‌های شدید جریان بوده است. آشوک و اسمیتس<sup>[20]</sup> 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

۲-۲- تونل باد و دستگاه فشارسنج

تمامی آزمایش‌ها در پژوهش حاضر درون یک تونل باد مدار بسته 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 ایجاد شده توسط دیواره‌های جانبی، بین دو دیوار گوشه‌هایی با زاویه ۴۵ درجه نصب شده است (شکل ۳). اندازه 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 به‌علاوه پایه نگه‌دارنده آن در اتاق آزمون تونل باد برابر ۹/۴٪ بوده که کمتر از مقدار استاندارد معرفی شده 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 ۰/۱ 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) نحوه 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)	حداکثر زاویه گوشه (°)	ابعاد اتاق آزمون (mm)
۰/۲۵	۳۰	۳۲	۴۵	۲۸۰×۳۷۰×۷۰۰

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 بدنه زیردریایی اندازه لایه 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.

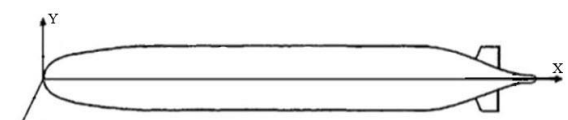
۲- تجهیزات و روش آزمایش

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. بدنه این مدل دارای سه قسمت دماغه، بدنه 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 نصب شده‌اند. 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

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



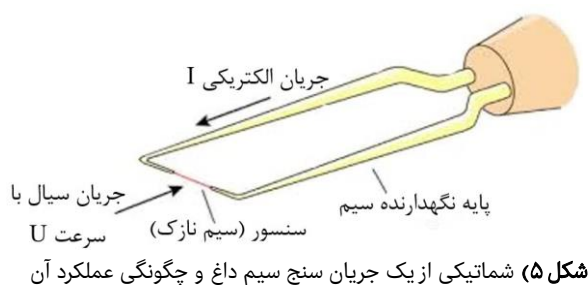
شکل ۲) نمایی از زیرسطحی DARPA SUBOFF همراه با دستگاه مختصات کارتزین در ابتدای دماغه آن

## 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)، کمیت‌های جریان دو فازی را اندازه‌گیری نمود.

اساس کار دستگاه جریان سنج سیم داغ، انتقال حرارت از یک 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 نصب شده 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 یک 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 یک 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 ۴ 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.



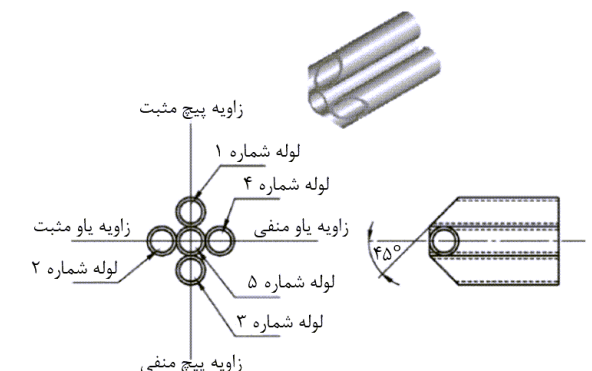
سمت بالا و محور Z عمود بر صفحه X-Y است که جهت آن مطابق قانون دست راست تعیین شده و در کلیه اندازه‌گیری‌ها مبدأ مختصات در ابتدای دماغه مدل زیرسطحی در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ مشخصات سیستم اندازه‌گیری مورد استفاده در پژوهش حاضر را می‌توان مشاهده نمود.

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	قطر	دقت	دقت اندازه حداکثر
سیم ( $\mu\text{m}$ )	زاویه	قطر	فشار (pa)
(kHz) برداری	پخ ( $^\circ$ )	کلی (mm)	گیری (pa)
۲	۵	۰/۰۱	$\pm 3$
	۴۵	۳	$\pm 1270$

## 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 یک جسم کروی قرارگرفته درون جریان سیال است. برای استفاده از پراب چند حفره فرض می‌شود که در جریان‌های موضعی، انحراف زیاد جریان و یا گرادین 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 مطالعه تجربی حاضر در نظر گرفته شده از پنج لوله فلزی با قطر خارجی ۱ میلی‌متر تشکیل شده که به صورت صلیبی در کنار یکدیگر قرار داده شده‌اند و لوله‌های مجاور لوله وسط نیز با زاویه ۴۵ درجه بریده شده‌اند. شماتیکی از این پراب به همراه شماره‌گذاری لوله‌ها در شکل ۴ 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) شماتیک پراب پنج حفره مورد استفاده به همراه شماره‌گذاری سوراخ‌های آن

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

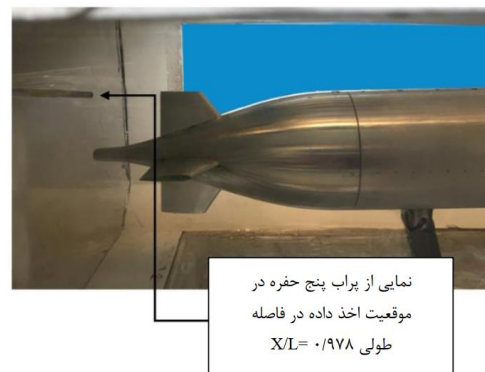
پارامتر	$\frac{\Delta x}{x}(\%)$
چگالی ( $kg/m^3$ )	۰/۸
سرعت جریان آزاد ( $m/s$ )	۰/۴
عدد رینولدز	۰/۷
سرعت متوسط ( $m/s$ )	۹
مؤلفه‌های سرعت ( $m/s$ )	۹
شدت تلاطم	۱۲
نرخ استهلاک انرژی ( $m^2/s^3$ )	۷

### ۳- روند انجام آزمایش‌ها و بررسی نتایج

برای انجام آزمایش‌ها باید مدل زیردریایی در داخل اتاق آزمون تونل باد نصب شود. مدل بر روی پایه 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 پایه نگه‌دارنده دستگاه منتقل کننده پراب نصب شده و با دستور نرم‌افزار نصب شده 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 انجام شده 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 ۶ می‌توان نحوه قرار گرفتن پراب پنج حفره را در کنار مدل مشاهده نمود.

جدول ۵) فرضیات به‌کاررفته در پژوهش حاضر

رفتار جریان هوا درون تونل باد با جریان آب اطراف شناور واقعی کاملاً یکسان است.	جریان هوا درون تونل باد
لایه مرزی تشکیل شده 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 جریان 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 ایجاد شده 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 ۶ 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) کمیت های اثرگذار در تشابه دینامیکی مدل و شناور واقعی

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

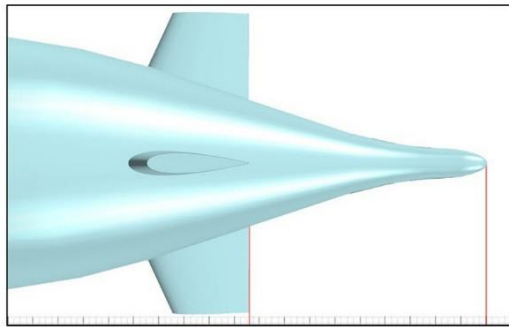
۴-۲- تشریح مسئله

هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر تغییر مکان بالک های انتهایی جسم زیرسطحی در جریان دنباله تشکیل شده 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 عقب گرد ۲۵ درجه توسط سازنده پیشنهاد شده است [33]. به منظور بررسی اثر تغییر موقعیت بالک های انتهایی اندازه گیری ها به گونه ای انجام می شود که فاصله انتهای بالک ها 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 اندازه گیری ها علاوه بر بالک های انتهایی بدون زاویه انحراف، برای حالتی که بالک های انتهایی دارای زاویه انحراف ( $\delta = 5^\circ$ ) 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 داده شده و اندازه گیری ها در صفحه انتهایی مدل یعنی  $X/L = ۰/۹۷۸$  دقیقاً در محل قرارگیری پروانه زیرسطحی انجام شده است. در پایان نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه خواهد شد.

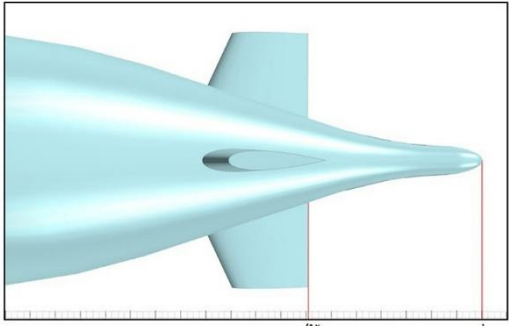
برای اطمینان از مغشوش بودن جریان بر روی مدل مطابق با جریان بر روی زیرسطحی واقعی و شبیه سازی رینولدز از اثر زبری مصنوعی (تریپ استریپ) استفاده شده است. سرعت جریان آزاد به نحوی انتخاب شده که عدد بی بعد رینولدز بر اساس طول کلی مدل برابر  $Re_L = 6 \times 10^5$  باشد.

۴-۳- صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی

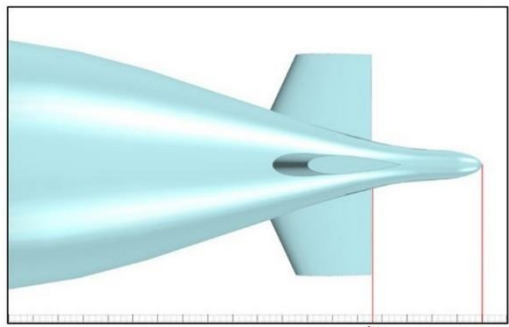
از آنجا که هندسه مورد بررسی در پژوهش حاضر کاملاً متقارن می-باشد بنابراین طبیعی است که جریان سیال در اطراف آن نیز رفتار مشابهی در دو طرف مدل از خود نشان خواهد داد. از این رو اندازه گیری ها تنها در یک طرف مدل انجام شده و نتایج برای طرف دیگر نیز تطبیق داده می شود. ابتدا برای مقایسه نتایج پژوهش حاضر با کارهای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



(الف)



(ب)

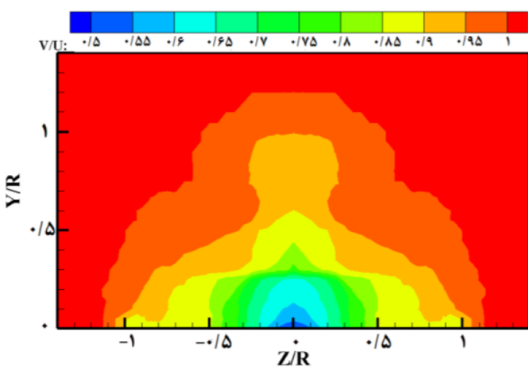


(ج)

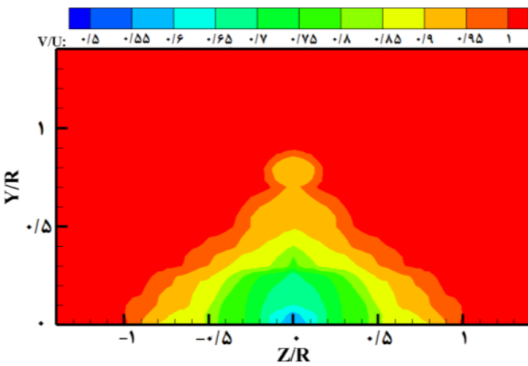
شکل ۷) محل قرارگیری بالک های انتهایی بر روی پاشنه به نحوی که فاصله انتهای بالک های انتهایی از نوک دماغه مدل به ترتیب برابر است با: (الف)  $X/L = ۰/۸۹$ ، (ب)  $X/L = ۰/۹۲$ ، (ج)  $X/L = ۰/۹۵$

شکل می توان به خوبی مشاهده کرد که جریان دنباله مدل زیرسطحی در قسمت پایینی پاشنه در اثر حضور پایه نگه دارنده مدل گسترش یافته است. اگرچه صفحات داده برداری و نیز عدد رینولدز در پژوهش حاضر با پژوهش انجام شده 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 اندازه گیری ها، اندازه گیری سرعت توسط پراب پنج حفره و جریان سنج سیم داغ برای خط  $Z/D = ۰$  دو بار صورت گرفته و همان طور که مشاهده می شود نتایج به دست آمده در هر دو آزمایش اختلاف بسیار اندکی باهم دارد.

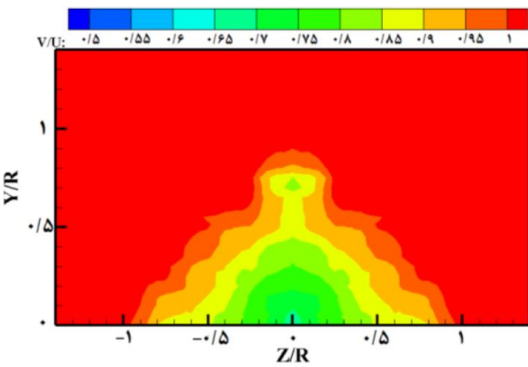
می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود برای حالتی که فاصله بالک های انتهایی از دماغه برابر  $X/L = 0.189$  (شکل ۹-الف) بوده پهنای دنباله به اندازه  $1/2R$  است در حالی که برای فاصله  $X/L = 0.192$  (شکل ۹-ب) پهنای دنباله برابر  $R$  بوده و نیز برای فاصله  $X/L = 0.195$  (شکل ۹-ج) برابر  $0.9R$  است. بنابراین با نصب بالک های انتهایی در فاصله  $X/L = 0.195$  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  $X/L = 0.195$  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.



(الف)

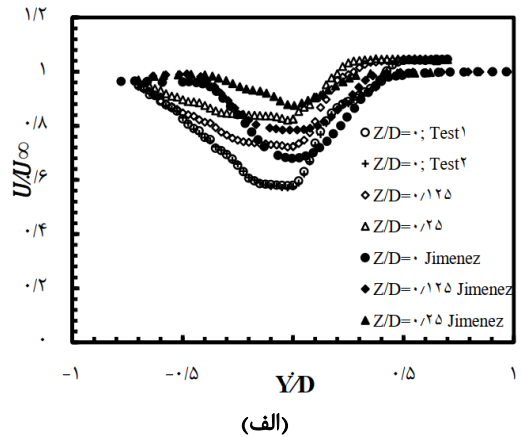


(ب)

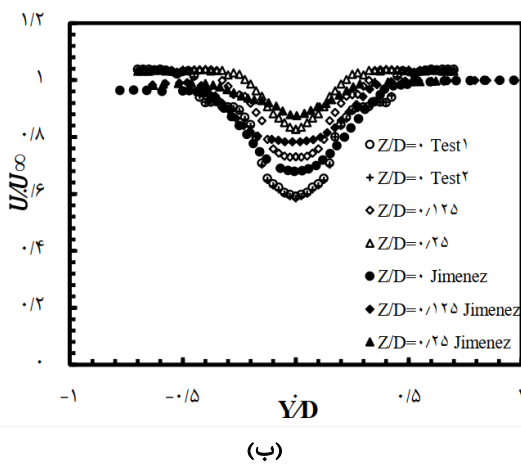


(ج)

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)  $X/L = 0.189$ ، (ب)  $X/L = 0.192$ ، (ج)  $X/L = 0.195$



(الف)



(ب)

شکل ۸) توزیع سرعت متوسط در صفحه  $X/L = 0.1978$  برای  $Z/D = 0, 0.125, 0.25$  و مقایسه نتایج با جیمنز و همکاران [19] در  $X/L = 1/7$  (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 کاهش یافته 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 قرار گرفته به نحوی که فاصله انتهای سطوح مذکور از نوک دماغه مدل به ترتیب برابر  $X/L = 0.189, 0.192$  و  $X/L = 0.195$  است. برای هر یک از حالتها پس از عبور جریان هوا درون تونل باد جریان دنباله تشکیل یافته در قسمت پاشنه ( $X/L = 0.1978$ ) 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



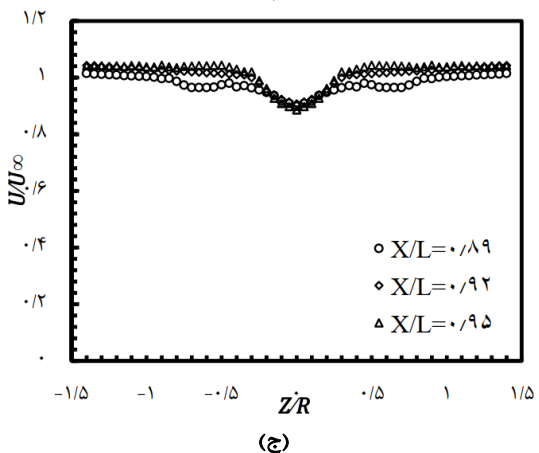
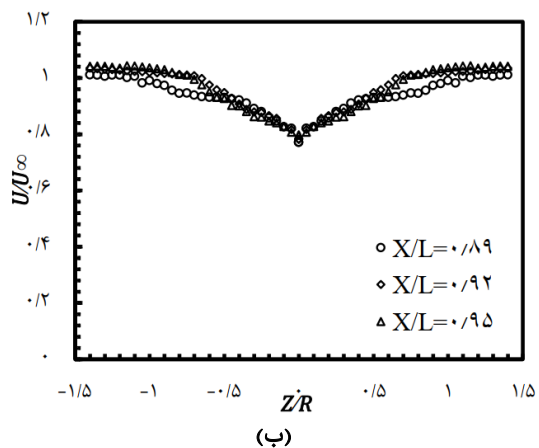
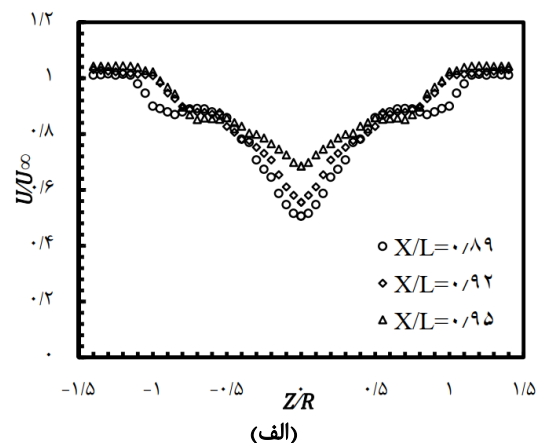
در فاصله  $X/L = 0/95$  تقریباً کمتر از دو حالت دیگر است. در نتیجه رفتار جریان دنباله زیرسطحی در فاصله کمتر از  $Z/R \leq 0/5$  با رفتار آن در فاصله بیشتر از  $Z/R \geq 0/5$  متفاوت است. در واقع با جابجایی بالک های انتهایی زیرسطحی به سمت انتهایی پاشنه، جریان دنباله در محل حضور پروانه ضعیفتر اما در خارج از آن دنباله قویتری در اثر حضور بالک های انتهایی بر روی پاشنه زیرسطحی تشکیل می شود. همچنین در این شکل دیده می شود که پهنای منطقه دنباله زیرسطحی هرچه بالک های انتهایی به سمت دماغه نصب می شوند، افزایش خواهد یافت که این موضوع باعث افزایش میزان نیروی درگ اعمال شده بر روی بدنه زیرسطحی خواهد شد.

همچنین مقدار سرعت متوسط در خط  $Y/R = 0/3$  در شکل ۱۰-ب و برای خط  $Y/R = 0/6$  در شکل ۱۰-ج برای سه مکان نصب بالک های انتهایی ترسیم شده است. همان طور که در این شکل ها نیز دیده می شود هرچه فاصله از مرکز مدل بیشتر می شود جریان دنباله ضعیفتر شده و مقدار سرعت متوسط به سرعت جریان آزاد نزدیکتر می شود. مقدار سرعت متوسط جریان دنباله زیرسطحی در لایه های بالاتر تفاوت چندانی باهم ندارند اگرچه در فاصله  $Z/R \leq 0/5$  مقدار سرعت متوسط برای حالتی که بالک های انتهایی در  $X/L = 0/89$  قرار دارند به اندازه اندک بیشتر از دو حالت دیگر می باشد. همچنین در این شکل ها نیز می توان مشاهده کرد که پهنای منطقه دنباله در حالت مذکور ( $X/L = 0/89$ ) بیشتر از دو حالت دیگر است.

#### ۴-۵- اندازه گیری شدت تلاطم جریان دنباله زیرسطحی

روند اندازه گیری ها در این قسمت همانند قسمت قبل است به طوری که بالک های انتهایی در سه فاصله طولی نصب شده و با عبور جریان از روی مدل، جریان دنباله تشکیل شده توسط جریان سنج سیم داغ اندازه گیری شده است. در شکل ۱۱ کانتور شدت تلاطم اندازه گیری شده توسط جریان سنج سیم داغ در صفحه  $Y-Z$  و در انتهای مدل زیرسطحی یعنی فاصله طولی  $X/L = 0/978$  برای فواصل طولی بالک های انتهایی از دماغه  $X/L = 0/95, 0/92, 0/89$  ارائه شده است. با مقایسه این شکل ها در کنار یکدیگر می توان نتیجه گیری نمود که: ۱- کمترین میزان پهنای شدت تلاطم در جریان دنباله کلی برای حالتی که بالک های انتهایی در فاصله  $X/L = 0/95$  واقع شده اند، مشاهده می شود. ۲- مقدار شدت تلاطم ناشی از جریان گردابه های نوک در بالک های انتهایی در فاصله  $X/L = 0/95$  نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است اما برای دنباله بالک های انتهایی تقریباً کمترین مقدار شدت تلاطم را می توان برای فاصله طولی  $X/L = 0/89$  مشاهده کرد. این موضوع البته فقط برای بالک های انتهایی قائم بوده و برای بالک های انتهایی افقی که جریان دنباله پایه نگه دارنده وارد دنباله مدل می شود مقدار شدت تلاطم در پشت بالک های مذکور نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است. بنابراین از آنجایی که در این تحقیق برچک

برای مقایسه بیشتر مقدار سرعت متوسط در صفحه میانی مدل یعنی  $Y/R = 0$  برای سه حالت مختلف نصب بالک های انتهایی در شکل ۱۰-الف ترسیم شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود در شعاع  $Z/R \leq 0/5$  یعنی جایی که پروانه زیرسطحی نصب می شود مقدار سرعت متوسط جریان دنباله برای حالتی که بالک های انتهایی در فاصله  $X/L = 0/95$  نصب شده اند 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

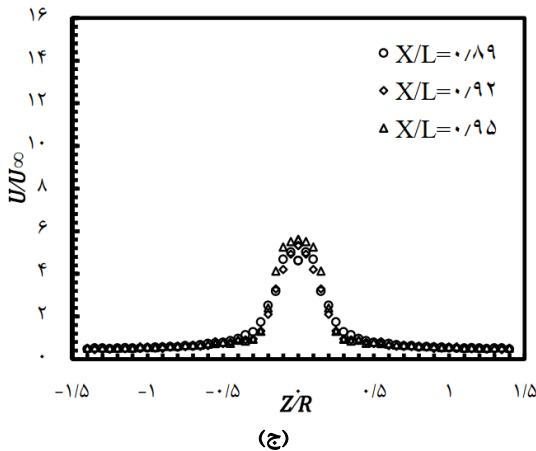
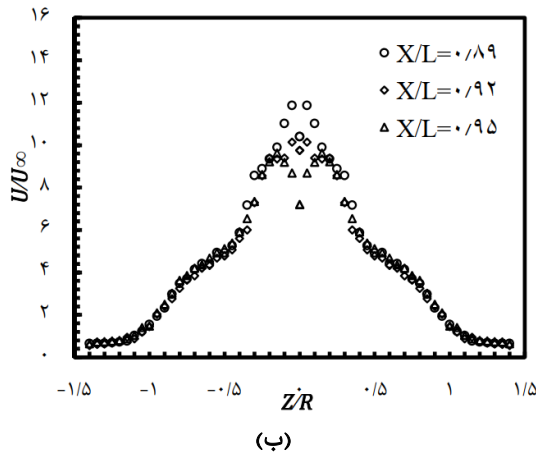
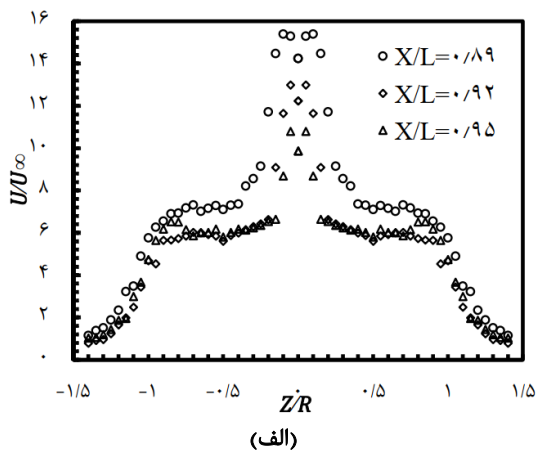


شکل ۱۰) مقایسه سرعت متوسط جریان در صفحه  $y-z$  انتهای مدل زیرسطحی در  $X/L = 0/89$  (○)،  $X/L = 0/92$  (◇)،  $X/L = 0/95$  (△) در حالتی که بالک های انتهایی فاقد زاویه انحراف می باشند و برای فواصل: (الف)  $Y/R = 0$ ، (ب)  $Y/R = 0/3$ ، (ج)  $Y/R = 0/6$

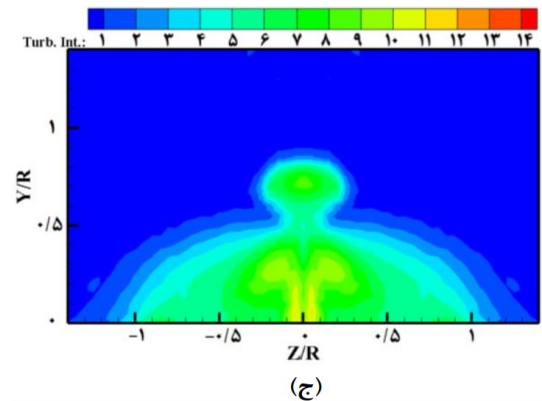
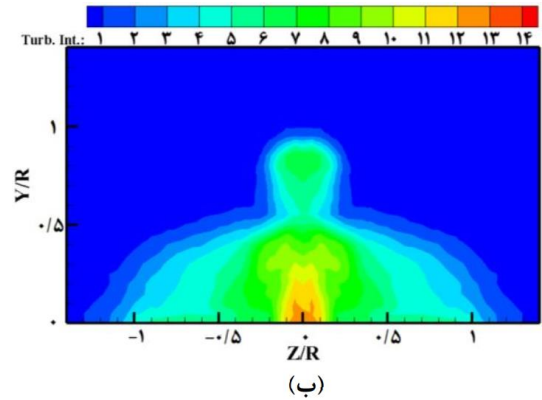
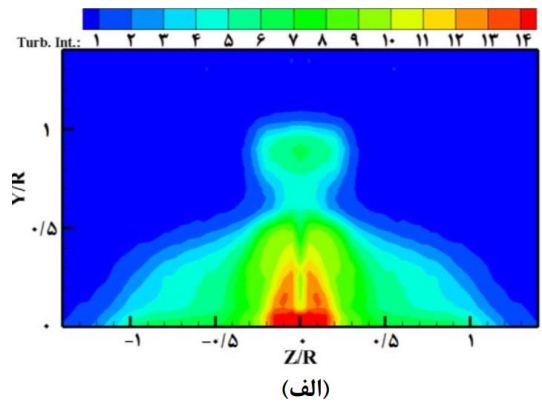
به جریان با شدت تلاطم کمتر در محدوده‌ی کارکرد پروانه فراهم می‌کند.

**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  $X/L = 0.89$ ،  $0.92$ ،  $0.95$ ؛ در حالتی که بالک های انتهایی فاقد زاویه انحراف می باشند برای فواصل: (الف)  $Y/R = 0$ ، (ب)  $Y/R = 0.3$ ، (ج)  $Y/R = 0.6$

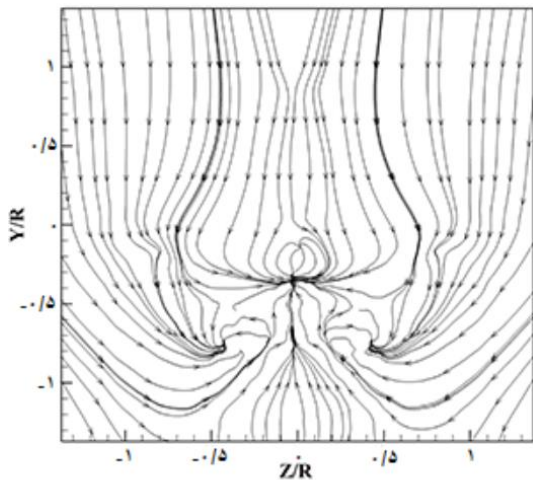


**شکل ۱۱** مقایسه شدت تلاطم جریان در صفحه  $y-z$  انتهای مدل زیرسطحی برای سه محل قرارگیری بالک های انتهایی بر روی پاشنه در حالتی که بالک های انتهایی فاقد زاویه انحراف می باشند: (الف)  $X/L = 0.89$ ، (ب)  $X/L = 0.92$ ، (ج)  $X/L = 0.95$

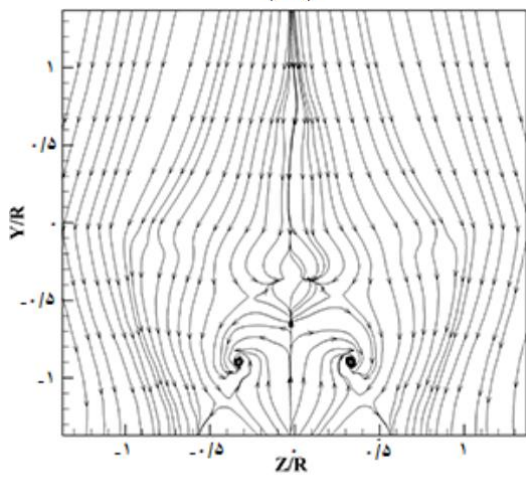
بر روی مدل زیرسطحی نصب نشده ممکن است با نصب بالک های انتهایی جریان دنباله ناشی از آنها تقریباً کاری شبیه به دنباله پایه نگه‌دارنده را انجام دهد. به هر حال با توجه به این مطالب نصب بالک های انتهایی در نزدیک انتهای زیرسطحی از نظر شدت تلاطم کمتر مناسب‌تر به نظر می‌رسد. ۴- مقدار شدت تلاطم در فاصله  $Z/R \leq 0.5$  یعنی محل کارکرد پروانه برای فاصله  $X/L = 0.90$  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  $X/L = 0.90$  شرایط بهتری را برای رسیدن

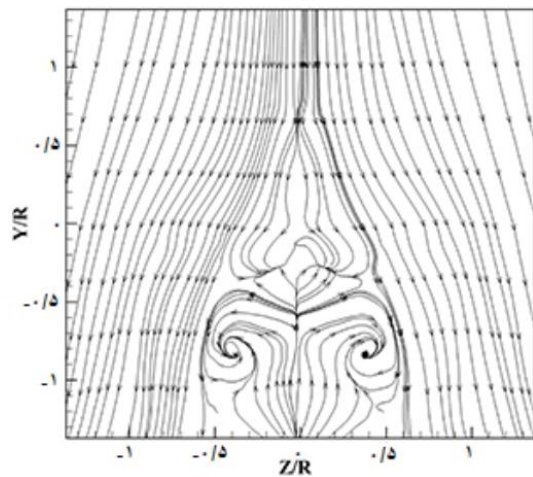
کانتور ورتیسیتته در مرکز می توان گفت که نصب بالک های انتهایی در فاصله طولی  $X/L = 0.95$  شرایط بهتری را فراهم می کند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۳) مقایسه الگوی جریان به کمک بردارهای سرعت متوسط برای سه محل قرارگیری بالک های انتهایی (الف)  $X/L = 0.89$ ، (ب)  $X/L = 0.92$ ، (ج)  $X/L = 0.95$

اندازه گیری شده توسط جریان سنج سیم داغ در صفحه  $y-z$  به فاصله طولی  $X/L = 0.978$  از دماغه مدل و در فاصله  $Y/R = 0$  از مرکز مدل (شکل ۱۲- الف)،  $Y/R = 0.3$  (شکل ۱۲- ب) و  $Y/R = 0.6$  (شکل ۱۲- ج) در راستای محور  $Z$  برای سه حالت نصب بالک های انتهایی در فاصله  $X/L = 0.89, 0.92, 0.95$  ترسیم شده است. در شکل ۱۲- الف مشاهده می شود که برای حالتی که بالک های انتهایی مدل زیرسطحی در فاصله  $X/L = 0.89$  قرار داشته اند، 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  $Z/R \leq 0.5$  متعلق به حالت نصب بالک های انتهایی در فاصله طولی  $X/L = 0.92$  می باشد. در خارج از این شعاع ( $Z/R \geq 0.5$ ) تقریباً برای بیشتر نقاط مقدار شدت تلاطم برای دو فاصله  $X/L = 0.92, 0.95$  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  $X/L = 0.89$  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 می توان نتیجه گرفت که نصب بالک های انتهایی در فواصل نزدیک تر به انتهای پاشنه زیرسطحی باعث کاهش شدت تلاطم جریان ورودی به پروانه خواهد شد.

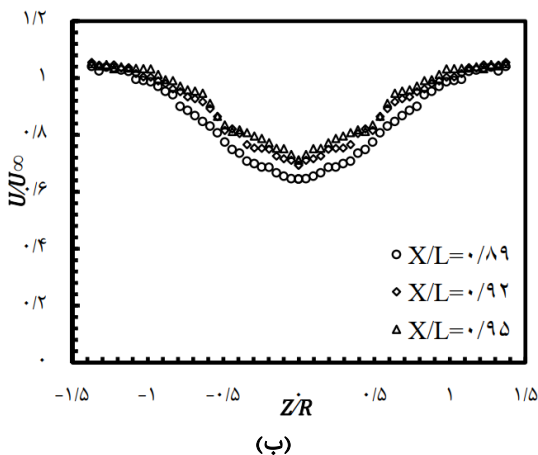
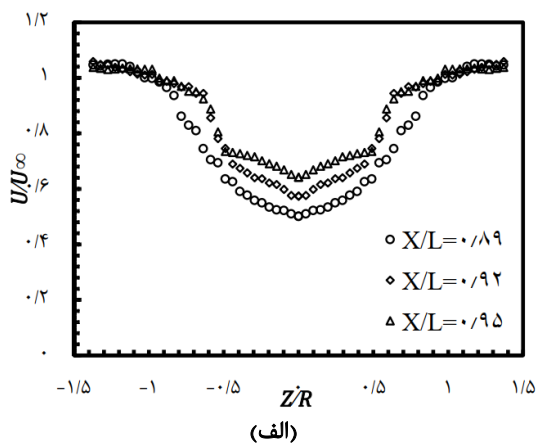
#### ۴-۷- نتایج اندازه گیری جریان به کمک پراب پنج حفره

در این قسمت به منظور مشاهده چگونگی رفتار جریان دنباله زیرسطحی پس از نصب پراب پنج حفره کالیبره شده بر روی دستگاه منتقل کننده پراب، اقدام به اندازه گیری جریان با استفاده از پراب مذکور می شود. در اینجا با استفاده از مؤلفه های 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 می توان 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  $X/L = 0.95$  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.

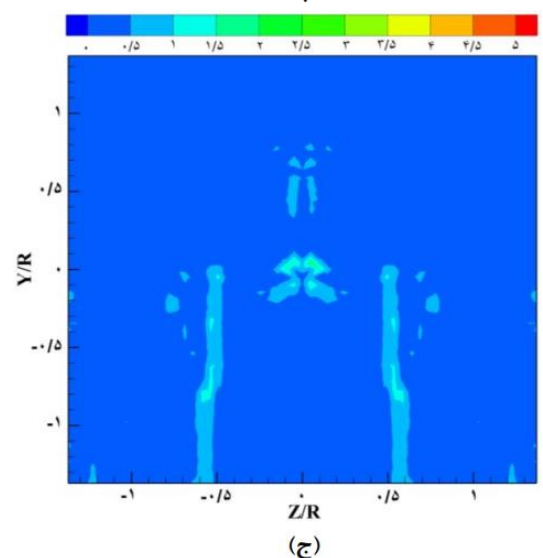
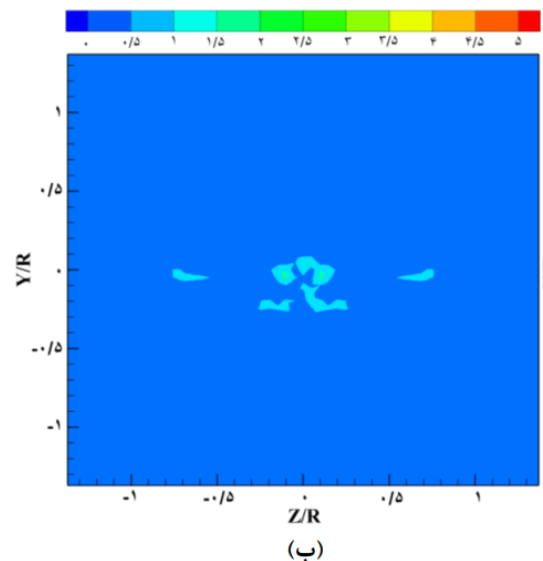
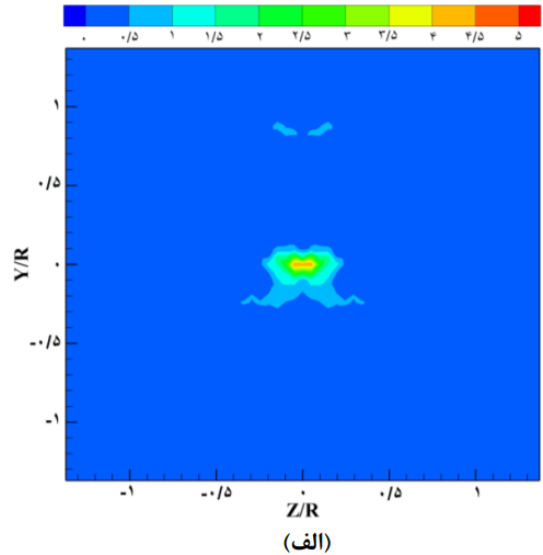
در شکل ۱۴ کانتور اندازه ورتیسیتته  $w_x$  بر اساس تغییرات دو مؤلفه سرعت  $u_x$  و  $u_z$  برای فواصل طولی بالک های انتهایی از دماغه این شکل ها در کنار یکدیگر می توان نتیجه گرفت که نصب بالک های انتهایی در فاصله  $X/L = 0.89$  باعث افزایش میزان ورتیسیتته جریان ورودی به پروانه می شود. در مقابل، نصب سطوح مذکور در فاصله طولی  $X/L = 0.92, 0.95$  می تواند منجر به کاهش میزان ورتیسیتته جریان ورودی به پروانه شود. همچنین از نظر پهنای

۴-۸- بررسی اثر پایه نگاهدارنده مدل

در این قسمت به منظور مشاهده اثر پایه نگاهدارنده 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  $Y/R = 0/3$  - شکل ۱۵- ب نمودار سرعت متوسط در خط  $Y/R = -0/6$  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 نگاهدارنده از شعاع  $Z/R \leq 0/5$  به  $Z/R \leq 0/7$  افزایش می‌یابد و ثانیاً حضور پایه نگاهدارنده در بالادست پاشنه مدل زیرسطحی باعث شده است تا در سرتاسر فواصل  $Z/R$ ، برای حالت نصب بالک های انتهایی در  $X/L = 0/95$  میزان سرعت متوسط جریان بیشتر بوده و در نتیجه جریان دنباله مدل زیرسطحی ضعیف‌تر باشد. از آنجا که در این پژوهش برچک زیرسطحی نصب نشده است، ممکن است حضور پایه نگاهدارنده در قسمت میانی مدل زیرسطحی اثری شبیه به اثر برچک را داشته باشد که نیاز به مطالعه بیشتر در این زمینه

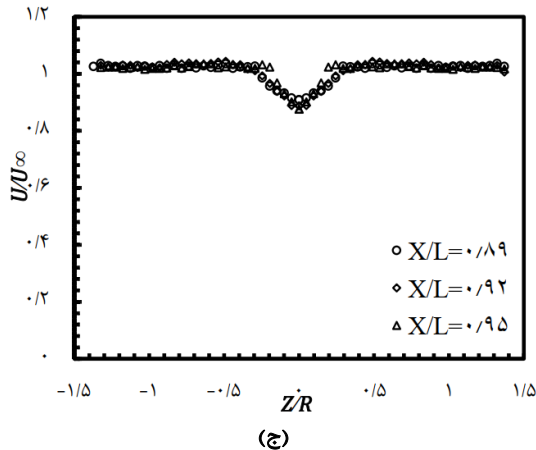
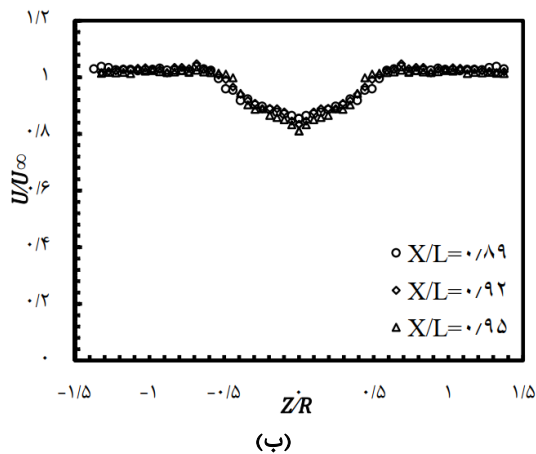
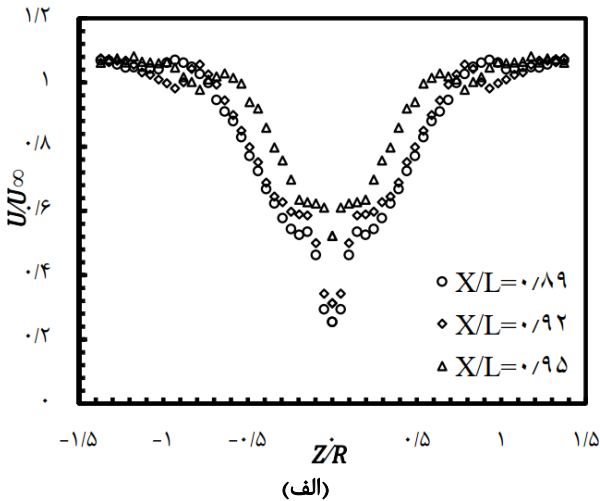


شکل ۱۵) مقایسه سرعت متوسط جریان در صفحه  $y-z$  انتهای مدل زیرسطحی در  $X/L = 0/89$ ،  $X/L = 0/92$ ،  $X/L = 0/95$ ،  $\Delta$  در حالتی که بالک های انتهایی فاقد زاویه انحراف می باشند برای فواصل: (الف)  $Y/R = 0/3$ ، (ب)  $Y/R = 0/6$



شکل ۱۶) مقایسه اندازه ورتیسیته  $\omega_z$  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 می باشند: (الف)  $X/L = 0/89$ ، (ب)  $X/L = 0/92$ ، (ج)  $X/L = 0/95$

مقدار سرعت متوسط برای حالتی که بالک های انتهایی در  $X/L = 0.89$  قرار دارند بیشتر از دو حالت دیگر می باشد، اگرچه این تفاوت بسیار اندک است. همچنین در این شکل ها نیز می توان مشاهده کرد که پهنای منطقه دنباله در حالت  $X/L = 0.89$  بیشتر از دو حالت دیگر است.



شکل ۱۶) مقایسه سرعت متوسط جریان در صفحه  $y-z$  انتهای مدل زیرسطحی در  $X/L = 0.89$ ،  $X/L = 0.92$ ،  $X/L = 0.95$ ؛ در حالتی که بالک های انتهایی دارای زاویه انحراف ۵ درجه می باشند و برای فواصل:  $Y/R = 0$  (الف)،  $Y/R = 0.3$  (ب)،  $Y/R = 0.6$  (ج)

دارد. به طور کلی از آنچه که در این قسمت گفته شد می توان استنباط نمود که اثر حضور پایه نگهدارنده در قسمت میانی مدل مانع از اثرگذاری مبحث جابجایی بالک های انتهایی به سمت انتهایی پاشنه ( $X/L = 0.95$ ) در بهبود جریان دنباله مدل زیرسطحی نخواهد شد.

#### ۹-۴- 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 می باشد. بالک های انتهایی ایرفویل های با مقاطع متقارن گوناگون بوده که در صورت داشتن زاویه انحراف (زاویه حمله) نسبت به راستای جریان منجر به تولید نیروی لیفت بر روی آن ها 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 ایجاد شده و با افزایش زاویه انحراف بالک های انتهایی این ناحیه گسترش می یابد<sup>[35]</sup>. در نتیجه مطالعه جریان دنباله زیرسطحی در حالی که بالک های انتهایی دارای زاویه انحراف هستند نیز دارای اهمیت می باشد. از این رو در این قسمت در حالی که بالک های انتهایی در سه مکان  $X/L = 0.89$  و  $X/L = 0.92$  و  $X/L = 0.95$  قرار داشته اند به میزان  $\delta = 5^\circ$  حول محور  $z$  (بالک های انتهایی واقع در صفحه افقی که موجب گردش زیرسطحی در صفحه قائم می شوند) به صورت ساعتگرد چرخانده شده اند. جریان دنباله تشکیل یافته بر روی انتهای مدل زیرسطحی توسط پراب پنج حفره اندازه گیری شده و مقدار سرعت متوسط در صفحه میانی مدل یعنی  $Y/R = 0$  برای سه حالت مختلف نصب بالک های انتهایی در شکل ۱۶-الف ترسیم شده است. در این شکل مشاهده می شود که در شعاع  $Z/R \leq 0.5$  مقدار سرعت متوسط جریان دنباله برای حالتی که بالک های انتهایی در فاصله  $X/L = 0.95$  نصب شده اند، بیشتر از دو حالت دیگر است. مقدار سرعت متوسط در خارج از این فاصله ( $Z/R \geq 0.5$ ) 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 ضعیف تر شده و مقدار سرعت متوسط به سرعت جریان آزاد نزدیک تر می شود. همچنین مقدار سرعت متوسط در خط  $Y/R = 0.3$  در شکل ۱۶-ب و برای خط  $Y/R = 0.6$  در شکل ۱۶-ج برای سه مکان نصب بالک های انتهایی ترسیم شده است. همان طور که در این شکل ها نیز دیده می شود مقدار سرعت متوسط جریان دنباله زیرسطحی در لایه های بالاتر تفاوت اندکی با هم داشته و گاهی نیز

### 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 می‌باشد. 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 مطالعه 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 به صورت زیر خلاصه نمود:

با جابه‌جا نمودن بالک های انتهایی در راستای طولی در محل پاشنه زیرسطحی از  $X/L = 0.189$  به  $X/L = 0.195$  جریان دنباله تشکیل یافته در انتهای مدل از خود رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد. برخلاف انتظار در شعاع  $Z/R \leq 0.10$  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  $X/L = 0.189$  به  $X/L = 0.195$ ، پهنای جریان دنباله در انتهای مدل از  $1/2R$  به  $0.9R$  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 تشکیل شده 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  $X/L = 0.189$  به  $X/L = 0.195$  مقدار شدت تلاطم جریان در نزدیکی سطح و محل کارکرد پروانه شیب

نزولی به خود می‌گیرد. در نتیجه در فاصله  $X/L = 0.195$ ، کمترین مقدار شدت تلاطم در شعاع  $Z/R \leq 0.10$  مشاهده می‌شود. نصب بالک های انتهایی در فواصل  $X/L = 0.192, 0.195$  باعث کاهش میزان ورتیسیتته در قسمت مرکزی جریان دنباله زیرسطحی و جریان ورودی به پروانه می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر فاصله طولی  $X/L = 0.195$  به عنوان مکان بهینه برای نصب بالک های انتهایی پاشنه به منظور تولید جریان دنباله با میزان یکنواختی بیشتر، شدت تلاطم و ورتیسیتته کمتر انتخاب می‌شود.

### ۶- فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

D	قطر مدل
L	طول کلی مدل زیردریایی
$\ell$	فاصله انتهای بالک های انتهایی از انتهای مدل
$U_\infty$	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 کارتیزین فاصله نقاط از مرکز دماغه مدل زیردریایی
	<b>علائم یونانی</b>
$\alpha$	زاویه پیچ
$\beta$	زاویه یاو
$\omega_x$	ورتیسیتته 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 محمدیگی ۳۴% - ۲- علیرضا شاطری ۳۳% - ۳- مجتبی دهقان منشادی ۳۳%

**منابع مالی:** دانشگاه شهردکرد

#### 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.

- 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. In *Eighth 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. In *31st 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. In *ASME 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. In *XXII 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.
- 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  $Re = 2.65 \times 10^7$ . *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. In *AIAA 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. In *AIAA 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. In *Optical 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. In *33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 1995* (p. 528).

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. In 9th 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. In International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers. 2020:84409:41-52.