

بررسی تجربی اثر موقعیت برجک زیردریایی بر رفتار جریان پایین دست آن*

شکراله محمد بیگی^(۱) مجتبی دهقان منشادی^(۲) علی سعیدی نژاد^(۳) علی اکبر دهقان^(۴)

چکیده در این پژوهش اثر موقعیت برجک بر روی بدنه زیردریایی بر رفتار جریان پایین دست برجک به صورت تجربی در تونل باد بررسی شده است. برای اندازه گیری میدان جریان سه بعدی از پراب پنج حفره استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که پراب پنج حفره به خوبی قادر به تعیین ویژگی های گردابه نعل اسبی می باشد. همچنین مشخص شد که گردابه نعل اسبی با حرکت برجک به سمت دماغه کوچک تر می شود. هرچه برجک روی بدنه نزدیک به دماغه نصب شود، گردابه وارد شده به جریان پروانه اثر نامطلوب کمتری دارد.

واژه های کلیدی مدل زیوسطیحی، برجک، تونل باد، گردابه نعل اسبی، پراب پنج حفره.

Experimental Investigation of the Sail Position of a Submarine on the Downstream Flow Field

Sh. Mohammad Beigi M. Dehghan Manshadi A. Saeidinezhad A.A. Dehghan

Abstract *The effect of sail position on the downstream flow field of the sail is investigated in the wind tunnel. A five-hole pressure probe is used to measure the 3D flow field. The investigation of the five-hole results shows that the five-hole measurements can determine the horseshoe vortex structure. Also, the results show that the horseshoe vortexes become smaller by forward moving of the sail on the body to the nose. Therefore, if the sail is mounted on the hull near the bow, the performance of the impeller increases and nose level decreases.*

Key Words Horseshoe vortex, Submarine model, Sail, Wind tunnel, Five-hole probe.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۲/۲۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۸/۲۰ می باشد.

(۱) کارشناس ارشد، مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، پردیس اصفهان.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، پردیس اصفهان.

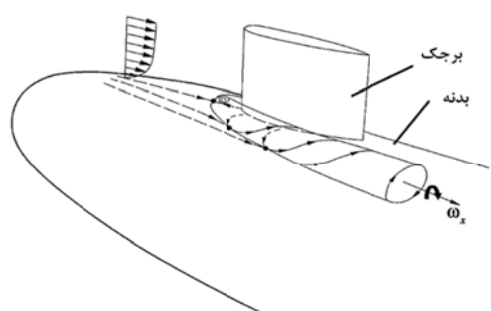
mdmanshadi@alum.sharif.edu

(۳) دکترا مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد.

(۴) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد.

مقدمه

می‌شود. این گردابه در جهت حرکت به جلو مجبور به چرخش و دورزدن برجک می‌شود. در نتیجه گردابه‌ای موسوم به گردابه نعل اسبی در دو طرف برجک تشکیل می‌شود که در امتداد طول زیردریایی تا منطقه پاشنه و پروانه ادامه می‌یابد. عوامل مختلفی مانند ضخامت برجک، ضخامت جابه‌جایی لایه مرزی (δ^*)، عدد رینولدز و صافی سطح می‌توانند بر گردابه نعل اسبی تأثیرگذار باشند [2].



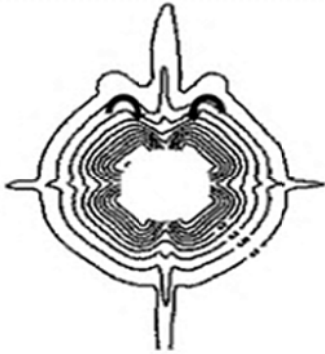
شکل ۱ شماتیکی از نحوه تشکیل گردابه نعل اسبی در اطراف برجک بر روی بدنه زیردریایی [3]

اضافه شدن برجک به بدنه یک زیردریایی، با ایجاد گرادیان فشار و افزایش سطح خیس، باعث افزایش درگ می‌شود و مقداری از انرژی هم صرف تولید گردابه خواهد شد. این گردابه بعد از تشکیل به سمت پایین دست برجک پیش می‌رود و در قسمت انتهایی پاشنه زیردریایی وارد جریان پروانه می‌شود و آشفتگی‌هایی در جریان پروانه ایجاد می‌کند. بنابراین جریان ورودی به پروانه با ضربه اغتشاشی و حرکت گردابه‌ها همراه می‌باشد. اگر پروانه در چنین میدان جریانی کار کند، بار روی پره‌ها در جهت محیطی تغییر می‌کند و نیروی جلوبرنده و ضربات گشتاوری زیادی تولید می‌شود و به تبع آن لرزش و نویز پروانه افزایش می‌یابد. بسیاری از عملیات‌ها و مانورهای زیردریایی باید مخفیانه صورت گیرد اما نویز لرزش پروانه باعث شناسایی سریع آن می‌شود. بنابراین باید تا حد ممکن نویز پروانه به کمک ابزارهای مختلف کاهش داده شود.

زیردریایی یک وسیله نقلیه زیرآبی است که شامل یک بدنه اصلی و متعلقات مختلف می‌باشد. میدان جریان در اطراف بدنه اصلی آن در زاویه صفر تقریباً بدون جدایش و ایجاد گردابه می‌باشد. اما وقتی سایر قسمت‌های جانبی بر روی بدنه آن نصب می‌شوند، شکل خطوط جریان بسیار تحت تأثیر شکل بدنه قرار می‌گیرد و میدان جریان پیچیده‌ای در اطراف آن ایجاد می‌شود. جریان‌های گردابی در اطراف بدنه زیردریایی تأثیر به‌سزایی در عملکرد آن دارند. از جمله این گردابه‌ها، گردابه نعل اسبی است که در محل اتصال برجک به بدنه زیردریایی به وجود می‌آید. برجک زیردریایی دارای شکلی ایرفویل‌گونه است که مکانی برای ورود و خروج خدمه زیردریایی و محلی برای قرارگیری برخی از تجهیزات کنترلی و مخابراتی در زیردریایی فراهم می‌سازد. برجک از نظر هیدرودینامیکی تأثیر به‌سزایی در تعادل و پایداری زیردریایی دارد. از این رو وجود آن بر روی بدنه زیردریایی با طراحی‌های فعلی اجتناب‌ناپذیر است [1]. در محل اتصال برجک به بدنه اصلی زیردریایی گردابه نعل اسبی تشکیل می‌شود. این گردابه تا منطقه پروانه زیردریایی امتداد می‌یابد و یک‌نواختی جریان پروانه را کاهش می‌دهد. در نتیجه حضور گردابه نعل اسبی باعث افت راندمان پروانه و ایجاد نویز می‌شود. از این رو بررسی عملکرد گردابه نعل اسبی و تغییر آن در اثر عوامل مختلف مهم و ضروری است و باید با روش‌های مختلفی که قابل کاربرد در زیردریایی باشد تا حد امکان اثر نامطلوب آن را کاهش داد.

شکل (۱) شماتیکی از نحوه تشکیل گردابه نعل اسبی را نشان می‌دهد که در اثر اتصال برجک (مانع) به بدنه زیردریایی ایجاد شده است. حضور برجک در مقابل جریان باعث ایجاد گرادیان فشار مخالف می‌شود. در این حالت، در لایه مرزی روی بدنه در بالادست برجک، گردابه عرضی تشکیل

کوچک نسبت به مکان قرارگیری آن بر روی بدنه زیردریایی و در پشت برجک، بسیار حساس است و باید به صورت دقیق تعیین شود.



شکل ۲ کانتور میدان سرعت محوری دنباله اندازه‌گیری شده در محل پروانه (هووانگ و همکاران [5])

مروار تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که از پراب پنج حفره برای بررسی میدان‌های گردابه‌ای استفاده شده است. میزوند و همکاران [6] جریان اطراف یک نوع بال دلتای دوگانه را به صورت عددی و تجربی مطالعه کردند. آنها به منظور اعتبارسنجی کد عددی تهیه شده برای تحلیل میدان جریان بال دلتای دوگانه مورد نظر، از یک پراب پنج حفره با زاویه رأس ۴۵ درجه استفاده کردند. با استفاده از این روش جریان‌های گردابی ایجاد شده بر روی بال مذکور اندازه‌گیری و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. بلومهورف [7] به منظور مشاهده تغییرات جریان دنباله توربین بادی، یک مدل توربین بادی را داخل تونل باد قرار داد و به وسیله یک پراب پنج حفره جریان دنباله توربین بادی را در مقاطع مختلف اندازه‌گیری کرد و پارامترهای گوناگون را نیز مورد سنجش قرار داد.

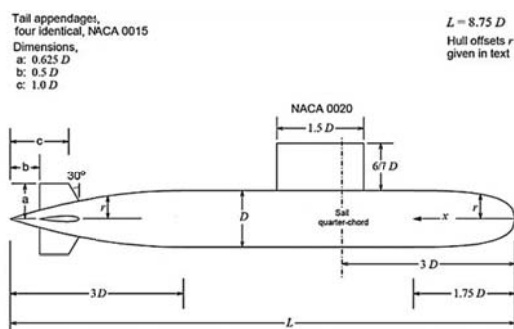
همان‌گونه که گفته شد، گردابه نعل‌اسبی ناشی از برجک زیردریایی باعث غیریکنواختی جریان ورودی به پروانه و در نتیجه کاهش عملکرد پروانه و افزایش تویز آن می‌شود. از این رو بررسی عملکرد این گردابه و تغییر آن در اثر عوامل مختلف دارای اهمیت است و باید تا حد امکان اثر نامطلوب آن کاهش داده شود.

با به کار بردن تجهیزات مختلف می‌توان نویزهای ایجاد شده را تا حد زیادی کم کرد اما یکی از راه‌های مفید برای بهبود عملکرد هیدرودینامیکی زیردریایی، کنترل دنباله جریان قسمت‌های جانبی زیردریایی است. کاهش اندازه و قدرت گردابه نعل‌اسبی جزو یکی از روش‌های افزایش راندمان پروانه و کاهش نویز زیردریایی است.

پدیده‌شناسی گردابه‌های مختلف تشکیل شده در اطراف بدنه و قسمت‌های جانبی یک وسیله زیرسطحی، مورد توجه محققان زیادی بوده است. سعیدی نژاد و همکاران [۴] با استفاده از روش مرئی‌سازی دود و نور لیزر، گردابه‌های جریان عرضی را بر روی بدنه یک مدل زیردریایی بررسی کردند. هووانگ و همکاران [5] 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 $Re = 12 \times 10^6$ اندازه‌گیری کردند. شکل (۲) کانتور سرعت محوری دنباله تولید شده در محل پروانه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود در محل دنباله برجک (قسمت بالایی)، گردابه نعل‌اسبی میدان دنباله آشفتگی بیشتری ایجاد کرده است.

جریان اطراف یک مدل زیردریایی با بدنه متقارن همراه با برجک توسط لیو و همکاران [3] مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق پیشنهاد شد که به منظور از بین بردن گردابه نعل‌اسبی از یک وسیله منشوری استفاده شود که در پائین‌دست راستای گردابه‌های نعل‌اسبی برجک زیردریایی نصب می‌گردد. استفاده شود. 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 حاصل در هر دو توافق خوبی با یکدیگر داشتند. نتایج نشان داد که اثر این وسیله

زیردریایی استاندارد به همراه ابعاد بدون بعد آن در شکل (۳) نشان داده شده است. نسبت طول به قطر برای این مدل $L/D = 8/75$ می باشد. پروفیل مقطع برجک همان گونه که در این شکل نشان داده شده است، به صورت یک ایرفویل ناکا 0020 است، به صورتی که طول وتر آن $L_s = 127 \text{ mm}$ می باشد. مدل مورد استفاده در این تحقیق با طول کلی $L = 700 \text{ mm}$ بر اساس ابعاد مدل استاندارد از جنس آلومینیوم و بوسیله دستگاه سی ان سی ساخته شده است. مدل ساخته شده دارای دقت ابعادی و صافی سطح بسیار خوبی است. بر روی سطح بالایی مدل سوراخ هایی تعبیه شده تا به کمک آنها بتوان مکان برجک بر روی مدل را در جهت طولی تغییر داد. در شکل (۴) نحوه قرارگیری مدل داخل تونل باد نشان داده شده است.



شکل ۳ مدل زیردریایی استاندارد کانادایی همراه با برجک و سطوح کنترلی [8]



شکل ۴ نحوه قرارگیری مدل زیردریایی به همراه برجک داخل اتاق آزمون تونل باد

یکی از عواملی که می تواند در کنترل گردابه نعل اسبی تأثیر گذار باشد، تغییر مکان قرارگیری برجک بر روی بدنه زیردریایی است. با تغییر مکان برجک بر روی بدنه زیردریایی اندازه لایه مرزی برخورد کننده به برجک تغییر می کند، در نتیجه تغییر مکان برجک در امتداد طولی بر روی بدنه زیردریایی بر گردابه نعل اسبی نیز تأثیر خواهد گذاشت. از این رو در این تحقیق با توجه به اثر نامطلوب گردابه های نعل اسبی بر روی جریان دنباله زیردریایی سعی شده است تا با یک روش تجربی نوآورانه محل گردابه نعل اسبی با استفاده از یک پراب پنج حفره بررسی شود. با توجه به مرور کارهای گذشته، تا اکنون در هیچ تحقیقی از یک پراب فشار چند حفره برای بررسی گردابه نعل اسبی در محل اتصال برجک به بدنه زیردریایی در تونل باد استفاده نشده است. قابل ذکر است که سیستم کالیبراسیون پراب پنج حفره توسط محققان طراحی و ساخته شده است.

تجهیزات و روش آزمایش

مدل آزمایشگاهی. در این تحقیق از یک مدل زیردریایی استاندارد برای بررسی اثر جابه جایی برجک این زیردریایی بر گردابه نعل اسبی استفاده شده است. این مدل زیردریایی استاندارد توسط پژوهشگاه وزارت دفاع کانادا (Defense Research & Development Canada (DRDC) و پژوهشکده دریایی هلند (Marine Institute Netherlands) در سال ۱۹۸۴ برای انجام یک سری آزمایش های مشخص طراحی شد [8]. تحقیقات زیادی حول محور بررسی مانورهای زیردریایی (نیروها و ممان های وارد بر آن) به صورت آزمایشگاهی در تونل باد و حوضچه کشش در آزمایشگاه های مختلف انجام شده است. بدنه این مدل دارای سه قسمت دماغه، بدنه میانی و قسمت انتهایی (پاشنه) می باشد. متعلقات دیگر این مدل نیز عبارتند از برجک و بالک های عقبی. شکل شماتیکی مدل

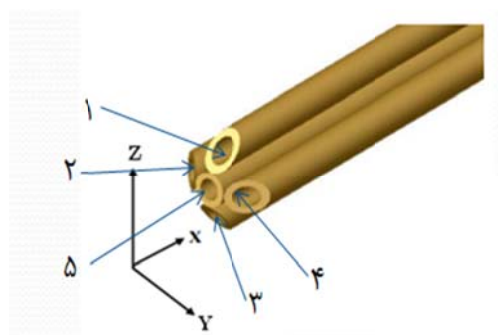
چند حفره از دهه دوم قرن ۲۰ شروع شد و تا اکنون نیز ادامه دارد. از این پراب‌ها نه تنها در محیط آزمایشگاه بلکه در هواپیماها و بالگردها نیز استفاده می‌شود. پراب‌های چند حفره به منظور تعیین مؤلفه‌های سرعت جریان، جهت جریان و فشار کل مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این پراب می‌توان برای بررسی میدان‌های گردابه‌های سه‌بعدی استفاده کرد. برای بررسی چنین جریانی به‌طور کلی می‌توان از چهار روش اندازه‌گیری استفاده کرد. این چهار روش اندازه‌گیری شامل PIV (Particle Image Velocimetry)، LDV (Laser Doppler Velocimetry)، جریان‌سنج سیم داغ (Hotwire Anemometry) به همراه یک پراب سه‌بعدی و استفاده از پراب‌های چند حفره فشار می‌باشد. روش‌های اندازه‌گیری PIV و LDV اگرچه دارای دقت بالایی هستند اما بسیار پیچیده و پرهزینه هستند. تا زمان چاپ این مقاله، هیچ اندازه‌گیری تجربی برای مشاهده گردابه نعل اسبی بر روی بدنه زیرسطحی به‌کمک روش‌های اندازه‌گیری PIV و LDV انجام نشده است. هم‌چنین استفاده از جریان‌سنج سیم داغ سه‌بعدی علاوه بر پیچیدگی فراوان و هزینه بالای آن به دلیل آسیب دیدن پراب این جریان‌سنج در فواصل نزدیک به سطح بسیار مشکل است. مزایای یک پراب پنج‌حفره در اندازه‌گیری میدان جریان به‌صورت زیر قابل بیان می‌باشند:

- ۱- تعیین سه مؤلفه سرعت و مشخص شدن میدان جریان سه‌بعدی
- ۲- تعیین فشار سکون و استاتیک جریان هم‌زمان با اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت (روش PIV و LDV) جریان‌سنج سیم داغ قادر به اندازه‌گیری فشار نیستند)
- ۳- عدم آسیب‌پذیری در نزدیکی سطح مدل
- ۴- دقت نسبتاً خوب و هزینه کم و سادگی استفاده با توجه به مزایای پراب پنج‌حفره نسبت به روش‌های اندازه‌گیری دیگر، در تحقیق حاضر از یک

تونل باد و دستگاه فشارسنج. تمامی آزمایش‌های این تحقیق در تونل باد مدار بسته دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان انجام شده‌اند. این تونل باد دارای حداکثر توان فن ۳۲ Kw و حداکثر سرعت 30 m/s در داخل اتاق آزمون می‌باشد. اتاق آزمون این تونل باد دارای سطح مقطع $380 \times 280 \text{ mm}^2$ و طول آن 700 mm است و دارای دو پنجره از جنس شیشه پلکسی شفاف می‌باشد. برای جلوگیری از تداخل لایه مرزی‌های ایجاد شده توسط دیواره‌های جانبی، بین دو دیوار گوشه‌هایی با زاویه ۴۵ درجه نصب شده است. 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 $4/9\%$ است. این مقدار کمتر از مقدار استاندارد (۵٪) است و لذا قابل اطمینان است. تمامی آزمایش‌های این تحقیق در سرعت m/s ۱۶ انجام می‌شود. شدت اغتشاش‌های اتاق آزمون در این سرعت حدود $0/25$ درصد می‌باشد.

برای استفاده از پراب پنج حفره احتیاج به اندازه‌گیری پنج کانال فشار است. به این منظور از یک دستگاه مبدل فشار ۱۵ کاناله استفاده می‌شود. سنسورهای فشار این دستگاه قادر به اندازه‌گیری حداکثر فشار دیفرانسیلی $1270 \text{ Pa} \pm$ با دقت $3 \text{ Pa} \pm$ می‌باشند. داده‌های اندازه‌گیری شده به‌صورت مستقیم از طریق یک کارت مبدل ولتاژ آنالوگ به دیجیتال ۱۲ بیتی وارد رایانه و نرم‌افزار شده و محاسبات لازم روی آن‌ها انجام می‌شود. با توجه به روابط پراب پنج حفره مقادیر عدم قطعیت نسبی برای فشار و سرعت متوسط به ترتیب برابر $7/8$ و 16 درصد به‌دست آمده است.

معرفی پراب پنج حفره و کالیبراسیون آن. پراب‌های چند حفره یکی از وسایل آزمایشگاهی برای تعیین مشخصه‌های جریان می‌باشند. استفاده از پراب‌های



شکل ۵ طرح کلی پراب پنج حفره مورد استفاده به همراه شماره گذاری سوراخ های آن

یک پراب پنج حفره قبل از استفاده باید کالیبره شود. کالیبراسیون به این معناست که روابط بین فشارهای اندازه گیری شده توسط پراب و زوایای جریان در مکان اندازه گیری به دست آیند. این روابط به صورت ضرایب بی بعد استخراج می شوند که با توجه به زاویه جریان می توان از آنها استفاده کرد. بعد از فرایند کالیبراسیون، باید اندازه گیری پنج فشار مربوط به پنج حفره پراب جهت تعیین زاویه جریان باید انجام شود. برای کالیبراسیون از جریان هوای یک تونل باد مدار باز استفاده شده است. با استفاده از توری و لانه زنبوری در این تونل باد از یکنواخت بودن جریان آن اطمینان حاصل شده است. در این تحقیق برای کالیبره نمودن پراب پنج حفره، از موارد زیر استفاده شده است: (۱) مکانیزم زاویه دهنده پراب، (۲) جریان مستقیم ایجاد شده در اتاق آزمون تونل باد، (۳) دستگاه اندازه گیری فشار، (۴) نرم افزار اخذ داده ها. در شکل (۶) تجهیزات کالیبراسیون پراب پنج حفره مشخص شده است. شکل (۶-الف) پراب پنج حفره، (۶-ب) دستگاه اندازه گیری فشار (مبدل فشار ۱۵ کاناله) و (۶-ج) مکانیزم زاویه دهنده پراب نشان داده شده است.

مقادیر فشارهای پراب اخذ شده و با استفاده از فشار استاتیک و کل به دست آمده از یک پراب پیتوت اعداد بدون بعد حاکم به دست می آیند. این عمل برای زوایای مختلف پیچ و یاو تکرار می شود. در نهایت

پراب پنج حفره برای بررسی میدان گردابه ای سه بعدی استفاده شده است.

اصول عملکردی این پراب ها بر اساس توزیع فشار بر روی سطح جلویی یک جسم مدور می باشد که در جریان سیال قرار داده شده است. توزیع فشار بر روی سطح دارای یک مقدار ماکزیمم در نقطه سکون جریان است و مقدار فشار با حرکت به سمت پایین دست بر روی سطح مدل کاهش می یابد. برای اجسام گرد فشار ماکزیمم، همان فشار کل p_0 است که از مجموع فشار استاتیک (p_{∞}) و فشار دینامیکی (q) دور از جسم به دست می آید و کمترین میزان فشار در آن نواحی که شیب جسم موازی با راستای جریان آزاد قرار گیرد، اتفاق می افتد. با توجه به این نکته می توان با اندازه گیری فشار نقاط مختلف بر روی سطح یک جسم مدور، زاویه جریان نسبت به جسم را تعیین کرد. جریان روی سطح گرد غالباً جدا می شود و جدایش جریان تغییراتی در توزیع فشار محلی ایجاد می کند و یک گرادیان فشار مخالف در جاهایی که شیب سطح در حال کاهش باشد، ایجاد می شود. اما برای استفاده از پراب چند حفره فرض می شود که در موقعیت های جریان موضعی، مکان انحراف زیاد جریان و یا مکان گرادیان زیاد سرعت در مقایسه با اختلال های پیش آمده در حضور پراب ناچیز است و از آنها صرف نظر می شود. این فرضیات اجازه می دهند تا پراب های چند حفره برای اندازه گیری سرعت و فشار در هر نقطه از جریان در نظر گرفته شوند. پرابی که برای مطالعه تجربی حاضر در نظر گرفته شده از پنج لوله فلزی با قطر خارجی ۱ mm تشکیل شده است. تصویر کلی از این پراب در شکل (۵) نشان داده شده است. این لوله ها با زاویه ۴۵ درجه قطع شده و در کنار همدیگر قرار داده شده اند.

می‌توان زوایای پراب را در مرحله کالیبراسیون و زوایای جریان را در مرحله بازیابی پارامترهای جریان به فشارهای سوراخ‌های پراب پنج حفره ارتباط داد. هم‌چنین پارامترهای C_{Ptotal} و $C_{Pstatic}$ به ترتیب ضرایب فشار بی‌بعد سکون و استاتیک هستند که به‌واسطه این ضرایب می‌توان فشارهای سکون و استاتیک را در هر نقطه به‌دست آورد سپس با استفاده از دو فشار مذکور و به‌کمک رابطه (۲) مقدار سرعت را در هر نقطه به‌دست آورد.

$$|V| = \sqrt{\frac{2(P_{tot} - P_{stat})}{\rho}} \quad (2)$$

به‌طور کلی فرآیند کالیبراسیون پراب پنج حفره به این صورت است که ابتدا پراب پنج حفره درون تونل باد مدار باز بر روی دستگاه زاویه‌دهنده پراب نصب می‌شود و سوراخ‌های فشار پراب پنج حفره به‌دستگاه مبدل الکترونیکی فشار متصل می‌شوند. پس از آن با قرار دادن پراب در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف فشارها در هر موقعیت اندازه‌گیری می‌گردند و به‌کمک روابط ذکر شده در (۱) فشارها به ضرایب فشار بی‌بعد در هر نقطه تبدیل می‌شوند. پس از انجام فرآیند کالیبراسیون و به‌دست آوردن ضرایب بی‌بعد به شکلی که گفته شد ضرایب کالیبراسیون در یک منحنی به‌عنوان نتیجه رسم می‌شوند. منحنی حاصل به منحنی کالیبراسیون معروف است. در شکل (۷) نمودار کالیبراسیون به‌دست آمده از فرآیند کالیبراسیون پراب پنج حفره در سرعت جریان ورودی 16 m/s نشان داده شده است. پس از کالیبراسیون با قرار گرفتن پراب پنج حفره در جریان دلخواه در هر نقطه پنج فشار اندازه‌گیری می‌شود و سپس ضرایب بی‌بعد فشار با کمک روابط مربوط محاسبه می‌گردند؛ دو ضریب تشکیل یک نقطه را بر روی منحنی کالیبراسیون می‌دهند. با قرار دادن نقطه مذکور بر روی منحنی

منحنی کالیبراسیون حاکم بر پراب براساس چهار پارامتر پیچ و یاو و ضرایب بدون‌بعد به‌دست خواهد آمد.



شکل ۶ تجهیزات مورد استفاده در کالیبراسیون پراب پنج حفره الف) پراب پنج حفره، ب) دستگاه اندازه‌گیری فشار (مبدل فشار ۱۵ کاناله) و ج) مکانیزم زاویه‌دهنده پراب

برای این‌که بتوان زوایای پیچ و یاو را به فشارهای خوانده شده توسط سوراخ‌های مختلف ربط داد، نیاز است تا ضرایب بدون‌بعد فشار تعریف شوند. برای تعریف ضرایب بدون‌بعد فشار چند روش وجود دارد. در این تحقیق از روابط ارائه شده توسط تراستر و یوکوم [9] استفاده شده است. ضرایب بدون‌بعد فشار به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned} C_{Pa} &= \frac{P_1 - P_3}{P_5 - \bar{p}} \\ C_{P\beta} &= \frac{P_2 - P_4}{P_5 - \bar{p}} \\ C_{Ptotal} &= \frac{P_5 - P_{total}}{P_5 - \bar{p}} \\ C_{Pstatic} &= \frac{\bar{p} - P_{static}}{P_5 - \bar{p}} \\ \bar{p} &= \frac{(P_1 + P_2 + P_3 + P_4)}{4} \end{aligned} \quad (1)$$

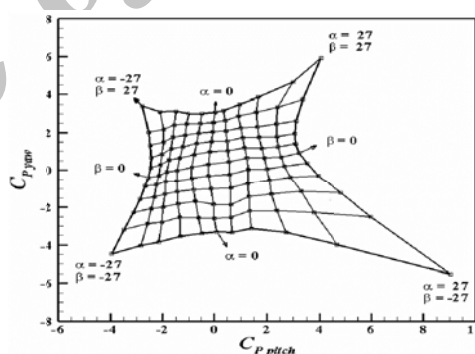
در این روابط پارامترهای $C_{P\beta}$ و C_{Pa} به ترتیب ضرایب فشار بی‌بعد برای زاویه جریان در راستای قائم (پیچ) و راستای افقی (یاو) هستند که به‌واسطه آنها



شکل ۸. نمایی از نحوه قرار گرفتن پراب پنج حفره پشت برجک در داخل اتاق آزمون

پراب پنج حفره بر روی پایه نگهدارنده دستگاه انتقال دهنده نصب می شود. این دستگاه انتقال دهنده قادر است که پراب را در سه راستای مختصات با دقت بسیار مناسب (0.1 mm) جابه جا کند. پراب در میدان جریان پایین دست برجک مدل زیرسطحی قرار می گیرد. در حالی که تونل باد روشن است پراب توسط دستگاه جابجا کننده حرکت داده شده و در موقعیت های مختلف قرار گرفته و مقادیر فشار را در هر مکان ذخیره می کند. بازه اندازه گیری میدان جریان پایین دست برجک در یک صفحه، عمود بر محور مدل (x ثابت) در شکل (۹) نشان داده شده است. مکان نقاط اندازه گیری داده های فشار پراب پنج حفره در این شکل با نقاط سیاه رنگ مشخص شده است. بعد از فرایند داده برداری از تمامی نقاط، داده های فشار شامل: پنج داده فشار مربوط به پراب پنج حفره و دو داده فشار مربوط به پراب پیتوت تیوب (Pitot tube) (که در ابتدای اتاق آزمون در جریان آزاد قرار دارد) برای هر نقطه (در شکل ۹) وارد نرم افزار کالیبراسیون می شوند. این نرم افزار مقادیر فشار کل و استاتیک و زوایای پیچ (α) و یا (β) مربوط به هر نقطه (نقطه سیاه رنگ در شکل ۹) را به عنوان خروجی در اختیار کاربر قرار می دهد. اکنون با داشتن فشار سکون و استاتیک برای هر نقطه مورد آزمایش مقدار سرعت کل به کمک رابطه (۲) قابل محاسبه است.

کالیبراسیون نزدیک ترین زوایا به عنوان نقاط حاشیه نقطه مورد نظر انتخاب می شوند سپس می توان با استفاده از یک میان یابی خطی ساده مقدار دقیق زاویه مربوط را به دست آورد. هم چنین با داشتن مقدار دقیق دو زاویه می توان با استفاده از اطلاعات مرحله کالیبراسیون مقادیر فشار سکون و استاتیک و در نتیجه مقدار سرعت را در نقطه مورد نظر به دست آورد. کلیه این مراحل با تهیه یک برنامه کامپیوتری توسط نویسندگان به صورت خودکار انجام شده است. این برنامه قادر است تا با دریافت اطلاعات مرحله کالیبراسیون و نیز دریافت یک فایل شامل داده های فشار در نقاط مورد آزمون، مقادیر فشار و مؤلفه های سرعت را به صورت یک فایل داده خروجی نمایش دهد. سپس با استفاده از نرم افزار تک پلات (Tecplot) نتایج مورد تحلیل قرار می گیرند.



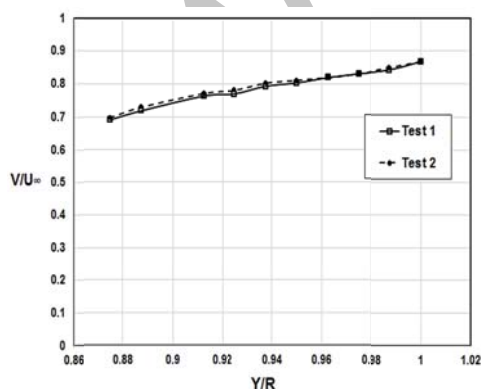
شکل ۷. منحنی کالیبراسیون پراب پنج حفره

مراحل انجام آزمایش ها و بررسی نتایج

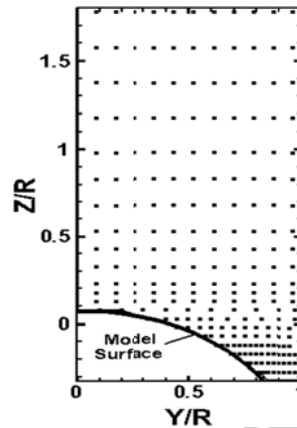
برای انجام آزمایش ها باید مدل زیردریایی در داخل اتاق آزمون تونل باد نصب شود. مدل بر روی پایه نگهدارنده به صورت کاملاً تراز قرار داده می شود و اتصالات مورد نیاز در جای خود قرار می گیرند. پراب پنج حفره بر روی پایه نگهدارنده دستگاه منتقل کننده پراب نصب می شود. در شکل (۸) می توان نحوه قرار گرفتن پراب پنج حفره را در کنار مدل مشاهده نمود.

داده‌ها به این نرم‌افزار، یک شبکه با المان‌های مثلثی بر روی تمامی محیط اندازه‌گیری ایجاد می‌شود تا نرم‌افزار تک‌پلات قادر باشد مقادیر پارامترهای مختلف را در مکان‌هایی که داده وجود ندارد، میان‌یابی کند. در انتها شبکه‌ای از مقادیر پارامترهای مختلف وجود دارد که به کمک آنها می‌توان کانتور هر پارامتر مانند سرعت متوسط را رسم کرد. هم‌چنین با داشتن مؤلفه‌های سرعت می‌توان به کمک دستور بردار در نرم‌افزار تک‌پلات بردارهای سرعت را نیز رسم نمود. برای بررسی صحت اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در مطالعه تجربی حاضر تکرارپذیری نتایج و تعیین مقادیر عدم قطعیت نتایج انجام شده است. در ادامه به بررسی هر کدام از این قسمت‌ها پرداخته می‌شود.

بررسی تکرارپذیری نتایج. تکرارپذیری آزمایش‌ها خود نشان دهنده قابل اعتماد بودن نتایج است که در این جا به عنوان نمونه توزیع سرعت کل (V) بر روی یک خط مشخص در فاصله $X/L = 0.62$ از دماغه و روی خط $Z/R = 0.325$ و در فاصله $0.875 \leq Y/R \leq 1.0$ دو بار اندازه‌گیری شده و در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اختلاف سرعت اندازه‌گیری شده برای دو آزمایش بسیار ناچیز است و می‌توان نتیجه گرفت که آزمایش‌های انجام گرفته توسط محققین با دقت خوبی قابل تکرار هستند.

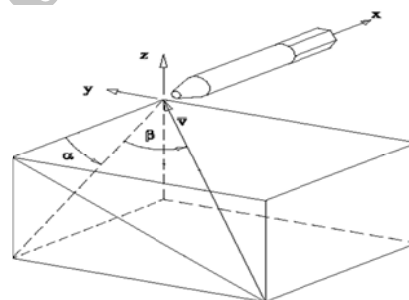


شکل ۱۱ مقایسه توزیع سرعت کل (V) بر روی یک خط مشخص در فاصله $X/L = 0.62$ از دماغه و روی خط $Z/R = 0.325$ و در فاصله $0.875 \leq Y/R \leq 1.0$



شکل ۹ بازه اندازه‌گیری میدان جریان پایین دست برجک و مکان نقاط اندازه‌گیری (نقطه‌های سیاه) در یک صفحه X ثابت

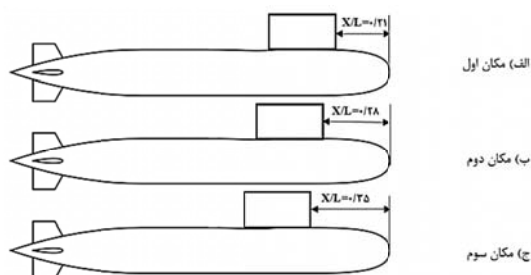
اکنون با داشتن زوایای α و β و مقدار سرعت کل، می‌توان مؤلفه‌های سرعت در جهت محورهای مختصات (u, v, w) را با توجه به شکل (۱۰) و روابط (۳) بدست آورد.



شکل ۱۰ نمایی از بردار سرعت کلی برخورد کننده به پراب پنج‌حفره و زوایای جریان

$$\begin{aligned} u &= V \cos \beta \cos \alpha \\ v &= V \sin \beta \\ w &= V \cos \beta \sin \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

مقادیر مختصات هر نقطه مورد آزمایش و مؤلفه‌ها و مقدار سرعت و هم‌چنین مقادیر فشارهای کل و استاتیک که در هر نقطه محاسبه شده، در یک فایل داده در نرم‌افزار اکسل وارد می‌شوند؛ پس از این‌که تمامی نقاط مورد آزمایش در این فایل ذخیره شدند، این فایل وارد نرم‌افزار تک‌پلات می‌شود. بعد از ورود فایل



شکل ۱۲ طرح کلی مکان‌های مورد استفاده برای برجک بر روی مدل در تحقیق حاضر

بررسی نتایج و تحلیل آنها

ارزیابی تقارن جریان اطراف مدل. در ابتدا برای بررسی تقارن جریان در دو طرف برجک، اندازه‌گیری‌ها در هر دو طرف برجک مدل به صورت یکسان انجام شده‌اند. در این حالت برجک در موقعیت $X/L = 0.28$ از نوک دماغه قرار دارد. در شکل (۱۳) کانتور سرعت متوسط بی‌بعد (الف) و بردارهای سرعت در صفحه Y-Z (ب) در موقعیت $X/L = 0.55$ از نوک دماغه آورده شده است. با توجه به این شکل متقارن بودن رفتار جریان در دو طرف برجک مدل به جز منطقه نوک برجک (گردابه نوک) می‌توان مشاهده نمود. با اتکا به تقارن جریان در دو طرف برجک مدل، در مراحل بعدی تنها نتایج یک طرف برجک مدل بررسی می‌شوند.

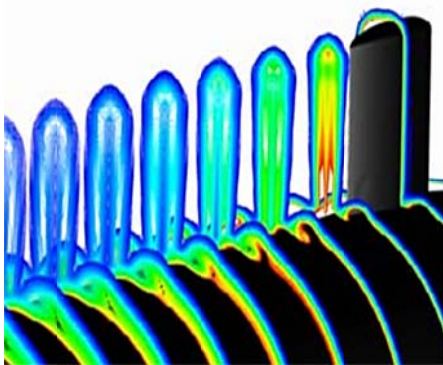
برای بررسی صحت اندازه‌گیری‌های انجام شده در این تحقیق در تعیین ساختار گردابه نعل اسبی، میدان ورتیسیت در پایین دست برجک مدل زیردریایی سابوف همراه با برجک و سطوح کنترل حاصل از نتایج عددی مرجع [11] در شکل (۱۴) ارائه شده است. نحوه تشکیل و رشد گردابه نعل اسبی با حرکت به سمت پایین دست برجک به وضوح در این شکل دیده می‌شود. با مقایسه نتایج تحقیق حاضر شکل (۱۳) و نتایج عددی ارائه شده در شکل (۱۴) می‌توان نتیجه گرفت

تعیین مقادیر عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری شده. مقادیر عدم قطعیت پارامترهای جریان سیال و نتایج پراب پنج حفره در جدول (۱) آورده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشخص است، میزان عدم قطعیت نسبی پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط پراب پنج حفره مناسب می‌باشند که نشان‌دهنده دقت مناسب اندازه‌گیری‌های انجام شده می‌باشد.

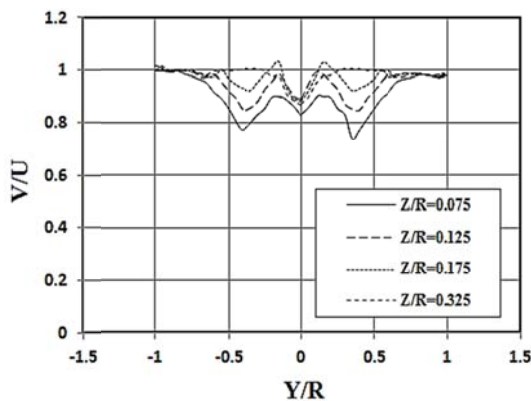
جدول ۱ تعیین عدم قطعیت پارامترهای جریان سیال و نتایج پراب پنج حفره

پارامتر	مقدار عدم قطعیت نسبی $\frac{u_x}{x}$ (%)
چگالی (kg/m^3)	۰/۸
فشار جریان (pa.)	۰/۰۶۳
سرعت جریان آزاد (m/s)	۰/۴
عدد رینولدز	۰/۷
زاویه α	۴/۲
زاویه β	۴/۲
سرعت کل V (m/s)	۸/۷
مؤلفه سرعت u (m/s)	۴/۷
مؤلفه سرعت v (m/s)	۹/۵
مؤلفه سرعت w (m/s)	۱۰/۷

برای بررسی اثر موقعیت برجک بر گردابه نعل اسبی، برجک مدل زیردریایی در سه موقعیت مختلف در نیمه جلویی مدل قرار داده شده است. علت انتخاب نیمه جلویی مدل محدودیت‌های طراحی برای ایجاد پایداری هیدرودینامیکی بیشتر زیردریایی است. این فاصله‌ها بر حسب فاصله لبه حمله برجک از ابتدای دماغه مدل و نسبت به طول کلی مدل سنجیده می‌شوند. پارامتر X فاصله لبه حمله برجک از دماغه مدل و L طول مدل است. طول وتر برجک نسبت به طول مدل برابر با $L_g/L = 0.18$ است. در شکل (۱۲) این فواصل آورده شده‌اند.



شکل ۱۴ بررسی عددی میدان ورتیسسته پایین دست برجک مدل زیردریایی سابوف [11]

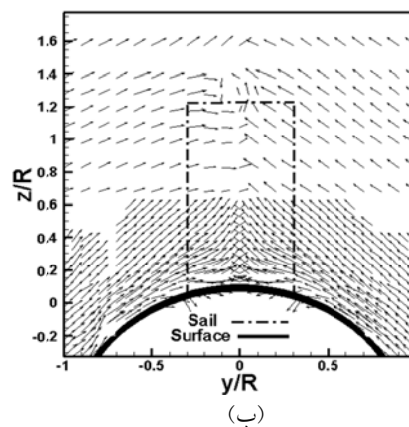
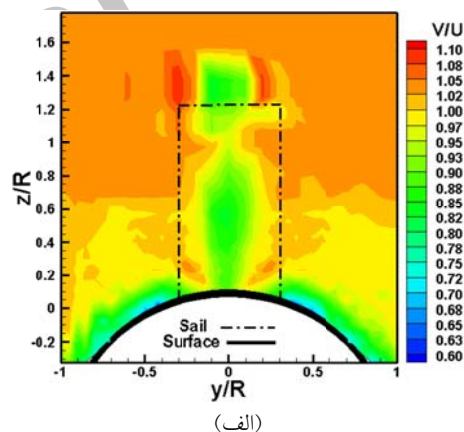


شکل ۱۵ نمودار سرعت متوسط در چند فاصله عمودی از سطح

در این مرحله برای بررسی گردابه نعل اسبی در حالی که مدل هیچ گونه زاویه حمله و زاویه جانبی نداشته است، برجک در مکان سوم ($X/L=0.35$) قرار داده شده و پراب در سه موقعیت طولی جابه‌جا شده و پس از آن در مکان ثابت پراب برجک در سه مکان جابه‌جا شده است و نتایج به صورت کانتور سرعت متوسط و کانتور فشار آورده شده است. پس از آن مدل در زاویه حمله $10/5$ درجه قرار گرفته و یک مرحله بدنه بدون برجک و در مرحله دیگر برای مکان ثابت پراب سه بار برجک جابه‌جا شده است. در تحلیل نتایج کلیه مراحل اندازه‌گیری برای بی‌بعدسازی سرعت‌ها از سرعت جریان آزاد 16 m/s استفاده شده است.

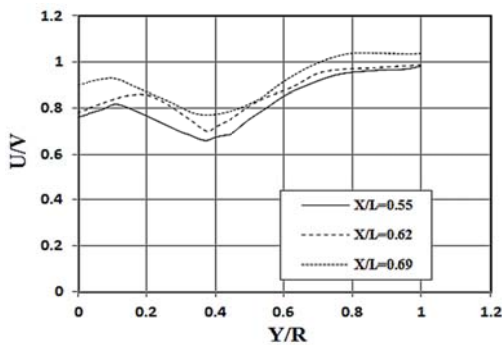
که نتایج تحقیق حاضر از نظر کیفی ساختار کلی گردابه نعل اسبی را به درستی نشان می‌دهد.

در شکل (۱۵) نمودار سرعت متوسط در چند فاصله عمودی از سطح (Z/R) آورده شده است (موقعیت برجک $0 \leq Z/R \leq 1/25$). همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود نمودارهای سرعت محوری در محل گردابه نعل اسبی ($Y/R = \pm 0.5$) دارای یک مقدار مینیمم است. با فاصله گرفتن از سطح مدل اثر گردابه نعل اسبی کم می‌شود تا این‌که در موقعیت $Z/R=0.325$ اثر گردابه نعل اسبی بر میدان جریان اطراف مدل از بین می‌رود. هم‌چنین با توجه به این نمودار می‌توان تقارن جریان را مشاهده نمود. روند این شکل با آنچه در نتایج لیو و همکارانش [3] آمده است هم‌خوانی خوبی دارد.



شکل ۱۳ الف) کانتور سرعت متوسط ب) بردارهای سرعت در موقعیت $X/L=0.55$ از نوک دماغه

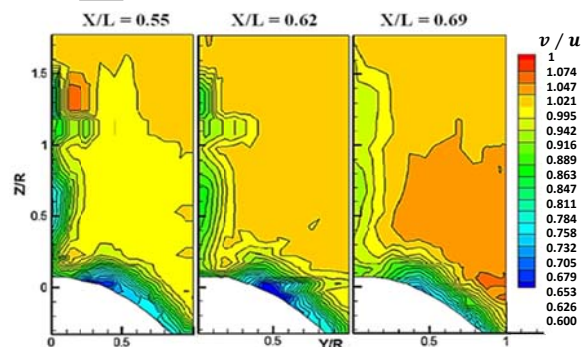
برای مقایسه بیشتر برای سه موقعیت مذکور نمودار سرعت متوسط برای فاصله عمودی از سطح $Y/R=0.075$ نیز در شکل (۱۸) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از برجک، میزان سرعت متوسط نیز افزایش یافته است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود با حرکت گردابه نعل‌اسبی به سمت انتهای مدل، نقطه مینیمم در این نمودار اندکی به سمت راست جابه‌جا شده یا به عبارت دیگر گردابه مقداری از مرکز مدل فاصله گرفته است.



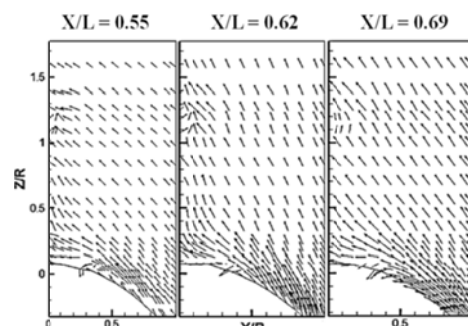
شکل ۱۸- نمودار سرعت متوسط برای سه مکان مختلف در خط $Z/R=0.075$ و در پشت برجک (برجک در موقعیت $X/L=0.35$)

بررسی تأثیر جابه‌جایی برجک بر گردابه نعل‌اسبی در موقعیت‌های 0.21 ، 0.28 و 0.35 . در این بخش پراب در موقعیت $X/L=0.69$ از نوک دماغه قرار دارد، برجک در سه موقعیت 0.21 ، 0.28 و 0.35 $X/L=$ جابه‌جا شده و نتایج آن در زیر آورده شده است. در شکل (۱۹) کانتور نتایج هر سه آزمون در کنار هم قرار داده شده است. هم‌چنین در شکل (۲۰) بردارهای سرعت برای سه مکان مختلف برجک آورده شده است. شکل‌ها به ترتیب از راست به چپ مربوط به مکان برجک در موقعیت‌های 0.21 ، 0.28 و 0.35 هستند. از روی این شکل می‌توان دید که از نظر موقعیت مکانی گردابه نعل‌اسبی برای برجک در

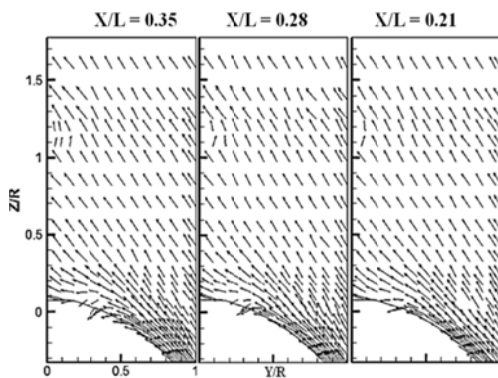
نحوه تغییر گردابه نعل‌اسبی در جهت طول مدل برای یک مکان ثابت برجک. در این بخش رفتار گردابه نعل‌اسبی در راستای مدل و در جهت جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور نتایج اندازه‌گیری جریان توسط پراب پنج حفره در میدان جریان اطراف مدل برای سه موقعیت مختلف طولی 0.62 و 0.69 و $X/L=0.55$ بررسی شده است. در این حالت برجک در موقعیت ثابت $X/L=0.35$ قرار داده شده است. در شکل‌های (۱۷ و ۱۶) کانتور سرعت متوسط بی‌بعد و بردارهای سرعت در موقعیت‌های مختلف آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود با حرکت گردابه نعل‌اسبی به سمت پاشنه مدل مقدار سرعت متوسط در محل این گردابه افزایش یافته و این گردابه اگرچه از نظر اندازه بزرگ‌تر شده است، ولی قدرت آن کمتر شده است. این مطلب در مراجع دیگر از جمله [8] نیز تأیید شده است.



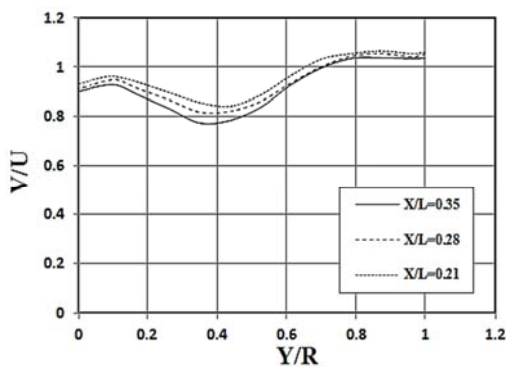
شکل ۱۶- کانتور سرعت متوسط برای مقایسه رفتار گردابه نعل‌اسبی در جهت طول مدل در سه مکان مختلف



شکل ۱۷- بردارهای سرعت برای مقایسه رفتار گردابه نعل‌اسبی در جهت طول مدل در سه مکان مختلف پایین‌دست برجک



شکل ۲۰ مقایسه بردارهای سرعت برای سه موقعیت برجک و پراب در $X/L = 0.69$

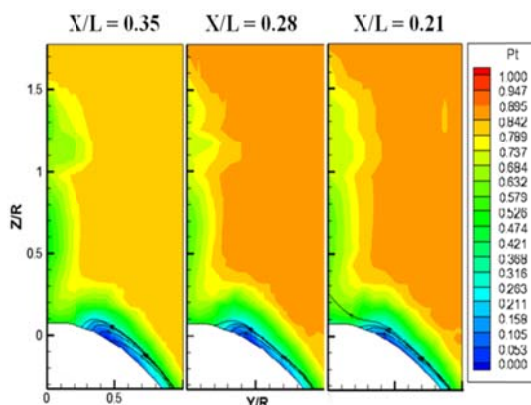


شکل ۲۱ نمودار سرعت متوسط برای سه موقعیت برجک در فاصله $Z/R = 0.075$ از سطح و پراب در $X/L = 0.69$

بررسی اثر موقعیت برجک در زاویه حمله 10° درجه. شیزاوا و همکاران [12] یک بال استوانه‌ای با ضخامت ثابت و دماغه نیم‌دایره شکل را در زوایای حمله کمتر از 15° درجه مورد بررسی قرار دادند. آنها از مشاهدات خود به این نتیجه رسیدند که به جز تغییرات اندکی که در ساق‌های گردابه نعل‌اسبی ایجاد شده است، تغییرات دیگری نمی‌توان در گردابه نعل‌اسبی مشاهده کرد. این مشاهدات هم‌چنین توسط وود و وستفول [13] بر روی ایرفویل ناکا 0012 در زاویه حمله 10° درجه انجام شد. نتایج آنها نیز گواه این مطلب بود که گردابه نعل‌اسبی در اثر زاویه حمله برای بال‌های مختلف تغییر چندانی نمی‌کند. اما در مدل زیردریایی وجود گردابه‌های بدنه، که در اثر داشتن زاویه حمله بر روی بدنه زیردریایی به وجود می‌آید، بر روی گردابه‌های نعل‌اسبی نیز تأثیر می‌گذارد. برای ارزیابی این موضوع مدل بدون اتصال

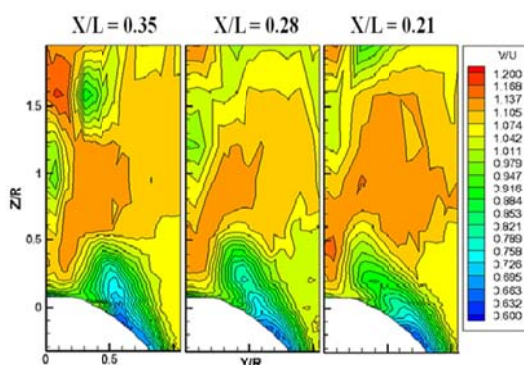
مکان $X/L = 0.21$ از نظر موقعیت عرضی بین $0.28 \leq Y/R \leq 0.55$ ، برای برجک در مکان $X/L = 0.28$ بین $0.35 \leq Y/R \leq 0.55$ و برای برجک در مکان $X/L = 0.21$ بین موقعیت عرضی $0.6 \leq Y/R \leq 0.35$ است. هم‌چنین می‌توان مرکز گردابه نعل‌اسبی را در مکان اول برجک در $Y/R = 0.45$ ، برای مکان دوم در $Y/R = 0.4$ و برای برجک در مکان سوم در $Y/R = 0.35$ مشاهده نمود. با تحلیل نتایج فوق می‌توان نتیجه گرفت که میزان گردابه نعل‌اسبی از نظر اندازه در حالتی که برجک در مکان سوم ($X/L = 0.35$) قرار دارد، بزرگ‌تر است.

برای مقایسه دقیق‌تر نتایج برای سه موقعیت برجک مقادیر سرعت متوسط در فاصله $Z/R = 0.075$ از سطح در شکل (۲۱) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر سرعت متوسط به‌طور کلی برای حالتی که برجک در موقعیت سوم ($X/L = 0.35$) قرار دارد در نزدیکی منطقه تشکیل گردابه نعل‌اسبی از دو حالت دیگر کمتر است. هم‌چنین مطابق با این شکل نقاط مینیمم با افزایش فاصله از برجک از مرکز مدل دورتر شده‌اند و به این معنی است که مرکز گردابه با افزایش فاصله از برجک به سمت طرفین مدل حرکت می‌کند.



شکل ۱۹ مقایسه سرعت متوسط برای سه موقعیت برجک و پراب در $X/L = 0.69$

در شکل (۲۳) مدل در زاویه حمله $10/5$ درجه قرار داشته و اندازه‌گیری‌ها در مکان $X/L=0/62$ از نوک دماغه مدل برای سه حالت برجک رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که گردابه نعل‌اسبی از نظر اندازه و قدرت در حالتی که برجک در مکان سوم ($X/L=0/35$) قرار دارد، بیشتر است. هم‌چنین اندازه این گردابه در اثر زاویه مدل بزرگ‌تر و کشیده‌تر شده است.

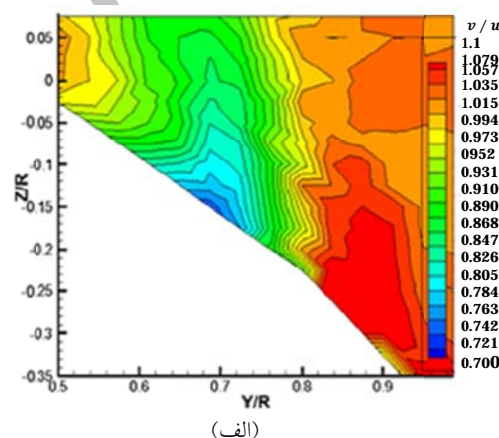


شکل ۲۳ مقایسه سرعت متوسط برای سه مکان برجک با زاویه حمله $10/5$ درجه

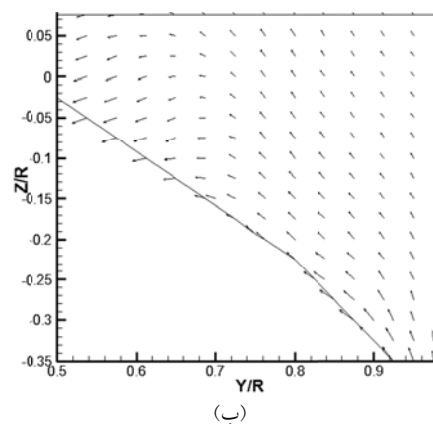
جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر موقعیت طولی برجک مدل زیردریایی در جهت طولی بر روی میدان جریان اطراف آن در تونل باد بوده است. در اثر اتصال برجک به بدنه زیردریایی گردابه نعل‌اسبی به وجود می‌آید. بنابراین در طول مطالعه تجربی حاضر سعی شد تا با انجام آزمایش‌های مختلف گردابه مورد نظر اندازه‌گیری شود و تغییرات آن در اثر جابه‌جا نمودن محل برجک بر روی بدنه مشاهده و ثبت شود. برای اندازه‌گیری‌ها از یک پراب پنج حفره استفاده شد. در طول تحقیق برای استفاده از فناوری پراب‌های چند حفره یک پراب پنج حفره ساخته و در طی فرآیند کالیبراسیون، پراب مذکور کالیبره شد. با انجام تست‌های تجربی بر روی مدل نتایجی به شرح زیر به دست آمد:

برجک در زاویه حمله $10/5$ درجه قرار می‌گیرد و میدان جریان از جمله موقعیت گردابه بدنه توسط پراب پنج حفره مشخص می‌شود. سپس با حضور برجک بر روی مدل، اندازه‌گیری‌ها تکرار شده است. نتایج به صورت کانتور سرعت متوسط در شکل (۲۲-الف) و بردارهای سرعت (۲۲-ب) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود گردابه بدنه در نزدیکی سطح بین $0/75 \leq Y/R \leq 0/6$ دیده شده است و هم‌چنین پراب پنج حفره به دلیل نزدیکی به سطح چرخش جریان گردابی حاصل را نشان نداده است اما به طور کلی نحوه شکل‌گیری این جریان گردابی در میدان جریان اطراف مدل توسط بردارهای سرعت تولیدشده توسط پراب پنج حفره به خوبی قابل مشاهده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲۲ (الف) کانتور سرعت متوسط (ب) بردارهای سرعت برای مدل بدون برجک در زاویه حمله $10/5$ درجه

فهرست علائم		
ضریب فشار زاویه پیچ	C_{Pu}	با انجام تست‌های تجربی مدل زیردریایی در تونل باد و استفاده از پراب پنج حفره میدان گردابه‌ای در اطراف تعیین و بردارهای سرعت در اطراف آن قابل بررسی هستند.
ضریب فشار زاویه یاو	$C_{p\beta}$	
ضریب فشار کل	C_{Ptot}	
ضریب فشار استاتیک	$C_{Pstatic}$	در محل گردابه، مقدار سرعت نسبت به مقدار سرعت جریان آزاد عبور کرده از روی مدل کمتر است. با حرکت در امتداد جریان و در جهت طولی گردابه مذکور ضعیف‌تر می‌شود و سرعت در محل آن افزایش می‌یابد.
قطر مدل	D	
طول کلی مدل زیردریایی	L	
طول کلی برجک (وتر برجک)	L_S	
فشار استاتیک	P_S	
فشار کل	P_T	با جابه‌جا نمودن برجک تغییر گردابه نعل‌اسبی مشاهده شد، هرچه برجک به سمت دماغه حرکت کند، گردابه مذکور در مکان مشخص بر روی بدنه ضعیف‌تر می‌گردد.
فشارهای خروجی پراب پنج حفره	$P_{1,2,3,4,5}$	
متوسط فشارهای پراب پنج حفره	\bar{P}	
شعاع مدل	R	
محورهای مختصات قرار گرفته در انتهای برجک روی بدنه زیردریایی	x,y,z	
علائم یونانی		
زاویه پیچ	α	جلو نصب شود جریان گردابی مذکور نیز کوچک‌تر و ضعیف‌تر می‌شود. لذا از دیدگاه نویز شرایط بهتری برای مدل زیرسطحی فراهم می‌گردد.
زاویه یاو	β	

مراجع

1. مونسان، محمد، «اصول طراحی زیردریایی»، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، بهار ۱۳۸۸.
2. Simpson, R.L., "Junction flows", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 33, pp. 415- 443, (2001).
3. Liu, Z.H., Xiong, Y., Wang, Z.Z., Wang, S. and Tu, C.X., "Experimental study on effect of a new vortex control baffle and its influencing factor", China Ocean Engineering, Vol. 25, pp. 83-96, (2011).
4. سعیدی نژاد، علی. دهقان، علی اکبر. دهقان منشادی، مجتبی. کاظمی اسفه، محمد، "بررسی تجربی ساختار گردابه‌ای روی یک مدل زیرسطحی"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳، شماره ۱۵، ص. ۹۸-۱۰۹، اسفند (۱۳۹۲).
5. Huang, T., Liu, H.L., Groves, N., Forlini, T., Blanton, J. and Gowing, S., "Measurements of flows over an axisymmetric body with various appendages in a wind tunnel: the darpa suboff experimental program", In Nineteenth Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul, Korea, (1992).
6. Maseland, J. and Verhaagen, N., "Experimental and numerical investigation of vortex flow over a 76/60-deg double-delta wing", Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering (1992).

7. Blomhoff, H.P., "An experimental investigation of wind turbine wakes", Msc thesis, Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, (2002).
8. Mackay, M., and Defence, R., "The standard submarine model: a survey of static hydrodynamic experiments and semiempirical predictions", Defence R&D Canada-Atlantic, (2003).
9. Treaster, A.L. and Yocum, A.M., "The calibration and application of five-hole probes", ISA Transactions, Vol. 18, No. 3, (1979).
10. Gorski, J., "Marine vortices and their computation", NSWC, Carderock 9500 Macarthur Boulevardwest Bethesda, MD 20817-5700, USA, (2003).
11. Holmes, S., "Calculation of maneuvering forces on submarines using two viscous-flow solvers", Proceedings of ASME 29th International Conference on Ocean Engineering, June 6–11, (2010).
12. Shizawa, T., Honami, S. and Yamamoto, M., "Experimental study of horseshoe vortex at wing/body junction with attack", 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA, Reno, NV., January 15-18, 1996.
13. Wood, D.H. and Westphal, Rv., "Measurements of the flow around a lifting-wing/body junction", AIAA J. 30:6–12, (1992).

Archive of SID