مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1394، دوره 15، شماره 6، ص‌ص 81-90

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی و تجربی اثر مولدهای ورتکس بر جریان حول مدل بدنه بدون ملحقات سابوف

مجتبی دهقان منشادی[1*]، کاظم هجران‌فر[2]، امیرحمزه فرج‌الهی[3]

1-استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان
2-استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
3- دانشجوی دکترا، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان
*شاهین‌شهر، صندوق پستی mdmanshadi@mut-es.ac.ir83145/115

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 07 اسفند 1393
پذیرش: 10 فروردین 1394
ارائه در سایت: 29 فروردین 1394

کلید واژگان:
مدل زیرسطحی
مولد ورتکس
مرئی سازی جریان
اپن فوم

چکیده

بررسی میدان جریان اطراف اجسام تقارن محوری که تشکیل دهنده بدنه اصلی هواپیماها و زیرسطحی‌ها می‌باشد، مورد توجه محققین زیادی قرار دارد. زیردریایی‌ها هنگامی که در حال مانور چرخشی هستند، جدایش عرضی را ایجاد می‌کنند که این جدایش نیروهای هیدرودینامیکی بالایی را تولید می‌کنند. جدایش روی بدنه ساده یک جسم زیرسطحی بسیار پیچیده می‌باشد. ارزیابی این جریان‌های گردابه‌ای باعث بهبود در عملکرد و طراحی وسیله می‌شود. این جریان‌های گردابه‌ای، روی آکوستیک، پسای بدنه و مانورپذیری تأثیرگذار می‌باشد. یک روش مناسب برای کاهش اثرات جریان گردابه‌ای، استفاده از مولدهای ورتکس است. در تحقیق حاضر به کمک روش مرئی‌سازی با روغن و شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار متن‌باز اپن فوم، میدان جریان در اطراف مدل زیرسطحی استاندارد سابوف با استفاده از مولدهای ورتکس در زوایای حمله $0 \leq \alpha \leq 30°$ بررسی شده‌است. استفاده از روش مرئی‌سازی با روغن و شبیه‌سازی عددی در مطالعه حاضر به بررسی بیشتر فیزیک اثر مولدهای ورتکس روی ساختار گردابه‌های تشکیل‌شده در اطراف زیرسطحی کمک شایانی خواهد کرد که بعنوان نوآوری این تحقیق محسوب می‌شود. در این مطالعه، نتایج حاصل نشان می‌دهند که استفاده از مولدهای ورتکس باعث کاهش خط جدایش، اندازه ابعاد گردابه‌های عرضی و نیروی پسا می‌شود.

Numerical and experimental investigation of effect of vortex generators on flow over suboff bare hull model

Mojtaba Dehghan Manshadi[1*], Kazem Hejranfar[2], AmirHamzh Farajollahi[3]

1- Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Esfahan, Iran.
2- Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
3- Department of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Esfahan, Iran.
* P.O.B. 83145/115, Shahinshar, Iran, mdmanshadi@mut-es.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 26 February 2015
Accepted 30 March 2015
Available Online 18 April 2015

Keywords:
Submersible model
Vortex generator
Flow visualization
Open FOAM

ABSTRACT

The flow field around the axisymmtric stream lined bodies which forms the main body of the airplaines and submarines has been the subject of several researches. Turning maneuvers of submarines result in cross-flow separation that generates large hydrodynamic forces. The separation of a simple axisymmetric body is very complex in nature. Understanding these vortical flows is paramount to improving vehicle performance and design. A suitable way to reduce the effects of this separated flow is to use vortex generators. The main goal of the present study is to investigate the flow field around a Suboff standard underwater model employing the vortex generator by using the oil flow visualization method and CFD method (OpenFOAM code) at $0° \leq \alpha \leq 30°$ angles of attack. The novelty of this study is the application of oil flow visualizing method and CFD simulation which can help us to precisely study the structure of three-dimensional vortical flow field. The results show that Vortex Generators placed along the submarine do, indeed, significantly reduce cross flow separation, size of vortices and drag forces.

1- مقدمه

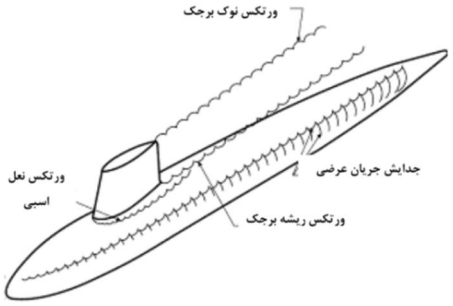
بررسی میدان جریان اطراف اجسام خط جریانی تقارن محوری، همیشه مورد توجه محققین زیادی قرار داشته است زیرا چنین اجسامی غالباً برای طراحی شکل بدنه اصلی وسایل متحرک در هوا یا آب مانند هواپیماها، زیردریایی‌ها، اژدرها و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. بررسی پایداری و کنترل پذیری حرکت این وسایل متحرک، احتیاج به پیش‌بینی صحیح مقادیر نیروها و ممان‌های وارد به جسم دارد که خود وابسته به فیزیک جریان اطراف آن‌ها در شرایط عملیاتی آن‌ها می باشد. در شکل 1 شماتیکی از میدان پیچیده جریان اطراف یک جسم زیرسطحی نشان داده شده است [1]. مشاهده می شود که میدان جریان بوسیله جدایش گردابی احاطه شده است.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Dehghan Manshadi, K. Hejranfar, A. Farajollahi, Numerical and experimental investigation of effect of vortex generators on flow over suboff bare hull model, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 6, pp. 81-90, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

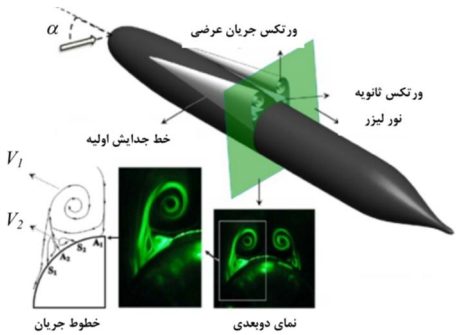
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.47.3]



شکل 1 شماتیکی از میدان پیچیده جریان اطراف زیردریایی [1]

وقتی که این اجسام نسبت به جریان سیال زاویه می‌گیرند، لایه مرزی در سمت مخالف باد از روی بدنه جدا شده و یک میدان جریان سه بعدی گردابه-ای در اطراف جسم ایجاد می‌شود. در واقع وقتی که یک زیردریایی در حال انجام گردش است، این نوع جدایش گردابه‌ای بر روی سطح آن ایجاد می-گردد. این جریان‌های گردابه‌ای یا حلقوی، بر جنبه‌های مختلف عملکردی زیردریایی اثر گذار است که در بیشتر موارد نامطلوب است [2]. در شکل 2 ساختار گردابه‌ای تشکیل شده در اطراف یک مدل زیرسطحی نشان داده شده است [3]. در واقع در شکل 2 علاوه بر اینکه جفت گردابه متقارن با چرخش مخالف را نشان می‌دهد، همچنین در آن به خوبی نحوه جدایش لایه مرزی و تشکیل گردابه اولیه و ثانویه مشاهده می‌شود. جدایش اولیه جریان در اثر گرادیان فشار نامطلوب عرضی رخ می‌دهد و لایه مرزی از سطح جدا می‌شود. در اثر جدایش ثانویه گردابه‌های کوچکی بین سطح مدل و گردابه اولیه تشکیل شده که به عنوان گردابه‌های ثانویه شناخته می‌شود. این ساختارهای پیچیده گردابه‌ای در زوایای بالا می‌توانند نیروهای غیرخطی و غیردائمی به جسم اعمال کنند. بر اساس مطالعه بوشنل و دونالدسون جریان گردابه‌ای روی آکوستیک، کارایی جلوبرندگی، پسای بدنه و مانورپذیری اثرگذار است [2]. در نتیجه برای تعیین مناسب نیروها و ممان‌های وارده به چنین اجسامی باید جدایش جریان و ساختارهای گردابه‌ای ایجاد شده در میدان جریان اطراف این اجسام، به درستی پیش بینی شوند.

اریکسون و ردینگ [4] چهار رژیم برای رفتار جریان اطراف یک جسم خط جریانی که نسبت به جریان از صفرتا 90 درجه زاویه دارد، تعیین کرده-اند. در زوایای حمله کم، جدایش جریان وجود ندارد و جریان محوری بر میدان جریان اطراف جسم حکمفرماست. در این رژیم، تغییرات نیروی لیفت و ممان پیچ نسبت به زاویه حمله، خطی می‌باشد. در رژیم میانی، گرادیان



شکل 2 ساختارهای گردابه‌ای تشکیل‌شده در اطراف زیرسطحی سابوف با روش مرئی‌سازی با دود در زاویه حمله 40 درجه [3]

فشار جانبی توسط جریان عرضی در روی سطح مدل ایجاد می‌شود و باعث جدایش لایه مرزی از سطح شده و یک جفت گردابه متقارن در سمت مخالف جریان ایجاد می‌شود. بعلت تقارنی که این گردابه‌ها در این رژیم دارند، هیچ نیروی جانبی به جسم وارد نمی‌شود. با افزایش زاویه حمله، جفت گردابه تشکیل شده، تقارن خود را از دست داده و باعث ایجاد نیروها و ممان‌های جانبی نامشخص و غیرخطی به جسم خواهند شد. در زوایای حمله بسیار زیاد، گردابه‌های تشکیل شده همانند میدان جریان اطراف یک سیلندر از اطراف جسم ریزش می‌کنند.

گردابه‌های تشکیل شده در اثر جدایش جریان عرضی، مهمترین گردابه ایجاد شده در هنگام عملیات مانوری یک زیرسطحی محسوب می‌شوند. با افزایش زاویه حمله، سرعت جریان عرضی منجر به جدایی جریان در سمت مخالف جریان می‌شود و اجازه می‌دهد که جریان لایه مرزی سطح بدنه را ترک کرده و گردابه ایجاد شده به سمت پایین دست انتقال یابد. این یک جدایش سه بعدی متداول جریان از بدنه در زاویه حمله می‌باشد، جایی که یک گردابه اولیه (اصلی) و گردابه‌های ثانویه مختلف بسته به طول گردابه اولیه تشکیل خواهند شد. جدایش عرضی جریان با یک گرادیان فشار عرضی مشخص می‌شود، در این مکان فشار کمتر در سمت مخالف باد با سمت موافق باد مقایسه می‌شود و در نتیجه یک نیرو و ممان بر روی بدنه تشکیل خواهد شد. به‌ویژه، برای یک زیردریایی در یک مانور گردشی، جریان عرضی[1] و جدایش گردابه‌ای حکمفرماست. این جدایش با مولفه سرعت جریان عرضی ایجاد می‌شود. برای استوانه چرخشی در زاویه عرضی 15 درجه معمولاً جریان عرضی نزدیک زاویه 105 درجه جدا می‌شود [5].

در این راستا، برخی از محققین در زمینه کاهش جدایش عرضی مطالعاتی را انجام داده‌اند. آن‌ها روش‌های مختلفی را برای کاهش جدایش عرضی و در نتیجه کاهش پسا در جسم زیرسطحی ارائه کرده‌اند. یک روش مرسوم جهت کاهش جدایش جریان استفاده از مولد ورتکس است. مفهوم مولدهای ورتکس در ابتدا توسط تیلور در سال 1947 بیان شد [6]. او نشان داد که ورتیسیته‌های ایجاد شده در انتهای جریان توسط ردیفی از پلیت‌های کوچک، مومنتوم را در راستای جریان افزایش می‌دهند و بنابراین باعث تأخیر در پدیده جدایش می‌شوند. سپس آزمایش‌های زیادی جهت نشان دادن اثرات مولدهای ورتکس بعنوان وسایل کنترل‌کننده جریان انجام گرفت. اسچوباور و اسپانگن برگ در سال 1960 لایه مرزی آشفته توسعه داده شده روی یک صفحه تخت در گرادیان فشارهای معکوس را مورد مطالعه قرار دادند [7]. مطالعه آن‌ها نشان داد که استفاده از مولدهای ورتکس سبب آمیختن جریان با مومنتوم بالا با لایه مرزی شده و باعث می‌شوند که گرادیان فشار معکوس کاهش یابد.

پیرسی در سال 1961 مقاله کاملی را در زمینه تئوری استفاده از مولدهای ورتکس در جریان دوبعد [8] ارائه نمود. بر اساس مطالعه پیرسی، اصطکاک لزجتی و گرادیان فشار معکوس لایه مرزی را آهسته می‌کند و وقوع پدیده جدایش حتمی می‌شود. بطور کلی، مولد ورتکس یک مکانیسمی را فراهم می‌کند که موجب می‌شود انرژی بالاتر سیالی که خارج از لایه مرزی است به سیالی که نزدیک سطح است و دارای سرعت و انرژی پایین‌تری است انتقال یابد و این انتقال انرژی موجب می‌شود لایه مرزی دوباره انرژی‌دهی شود که این امر سبب تأخیر یا جلوگیری از جدایش لایه مرزی می‌شود. گسترش این تئوری برای جریان‌های سه‌بعدی مانند جدایش گردابه‌ای که توسط مانور یاو زیردریایی به وجود می‌آید، بسیار پیچیده‌تر می‌شود؛ در این

1- CrossFlow

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.47.3]

زمینه مطالعات دیگری انجام شده است [9-11].

پیش‌بینی رفتار گردابه‌های عرضی اطراف جسم زیرسطحی برای تعیین نیروها و ممان‌های وارده به بدنه آن، بسیار با اهمیت است [12]. برای پیش بینی رفتار ساختارها و گردابه‌های تشکیل شده در یک شبیه سازی عددی به حجم محاسبات بسیار زیادی نیاز است. همچنین جهت صحه گذاری نتایج شبیه سازی عددی باید از اندازه‌گیری تجربی بهره برد. در نتیجه بررسی تجربی تجسم جریان سیال در اطراف جسم اهمیت داشته و کمک شایانی به درک و فهم چنین پدیده‌هایی خواهد نمود.

محققین زیادی جهت طراحی بهینه شکل بدنه یک وسیله زیرسطحی، ویژگی‌های جریان اطراف اینگونه وسایل را بصورت آزمایشگاهی یا عددی بررسی کرده‌اند. ویژگی‌هایی همچون محل گذار و جدایش لایه مرزی تشکیل شده بر روی سطح جسم دارای اهمیت است [13]. پدیده شناسی گردابه‌های مختلف تشکیل شده در اطراف بدنه و قسمت‌های جانبی یک وسیله زیرسطحی نیز مورد توجه بوده است. شبیه‌سازی جریان اطراف بدنه یک مدل زیرسطحی به منظور اندازه‌گیری نیروها و ممان‌های وارده به آن، به‌طور مکرر در تونل بادهای مختلف دنیا انجام شده است [14]. این آزمایش‌ها در کنار آزمایش‌های حوضچه کشش و تونل آب همیشه در پیشرفت هیدرودینامیک بدنه این وسایل نقش به سزایی داشته و هم‌اکنون نیز در مراکز تحقیقاتی معتبر دنیا در حال انجام می‌باشد.

مکی [15] یک سری آزمایش‌های مرئی سازی و نیرویی بر روی یک مدل زیردریایی استاندارد در یک تونل باد مادون صوت انجام داد. هدف از انجام این آزمایشات مطالعه قابلیت مانور، هیدرودینامیک بدنه و مقایسه نتایج تونل باد با نتایج حاصله از آزمایشات تونل آب بوده است. در ابتدا برای ایجاد دید فیزیکی جریان در اطراف مدل، یک سری آزمایشات مرئی سازی جریان بوسیله روغن و رنگدانه[1] بر روی سطح مدل انجام شده است. نتایج آزمایش مرئی سازی، مکان جدایش را روی بدنه و برجک در زوایای حمله مختلف و اعداد رینولدز متفاوت مشخص کردند. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مرئی سازی کمک شایانی به تحلیل نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های نیرویی داشته‌اند.

دموس و سیمپسون [16] جریان در اطراف سطح یک مدل بیضی گون کشیده به همراه ویک آن را مورد مطالعه قرار داده‌اند. بررسی دوبعدی ویک با استفاده از یک پراب هفت حفره[2] در فاصله یک برابر طول مدل انجام شده است. بررسی ویک و پروفیل‌های جریان ثانویه، نشان می‌دهد که در زاویه 10 درجه گردابه‌های چرخشی ناشی از جدایش جریان در پشت مدل تشکیل می‌شوند. همچنین اضافه کردن تریپ استریپ تأثیر چندانی بر نتایج لیف و درگ نگذاشته است.

جیمنز و همکارانش [17] میدان جریان پایین‌دست یک مدل زیردریایی، در اعداد رینولدز (بر اساس طول مدل) $1/0\times10^6$ الی 67×10^6 توسط جریان سنج سیم داغ در تونل باد فشار متغییر مورد بررسی قرار دادند. مدل انتخاب شده در این آزمایش‌ها بر اساس مدل زیردریایی استاندارد سابوف بوده که در داخل تونل باد و روی یک عدد نگه دارنده قرار داشته است. نتایج توزیع سرعت متوسط در پایین‌دست نگه دارنده، نشان دهنده تأثیرات مهم اثرات ویک نگهدارنده روی جریان اطراف بدنه زیردریایی می‌باشد.

لیو و همکارانش [18] بصورت عددی و تجربی گردابه نعل اسبی تشکیل شده روی بدنه زیردریایی استاندارد را بررسی کردند. گردابه‌های نعل‌اسبی که در محل اتصال برجک به زیردریایی تشکیل می‌شوند یکی از مهمترین عوامل غیر یکنواختی جریان در محل پروانه زیردریایی به حساب می‌آیند. نتایج عددی آن‌ها نشان داد که با ایجاد ورتکس چسبیده، اندازه ورتکس نعل اسبی ایجاد شده، کوچکتر شده است. اندازه‌گیری‌های تجربی نیز بر روی مدل زیردریایی استاندارد سابوف در تونل باد انجام شده است. نتایج تجربی آن‌ها نیز نشان داده که مولد ورتکس تأثیر زیادی در کاهش غیریکنواختی جریان ویک، در محل نصب پروانه زیردریایی ایفا کرده و راندمان پروانه را افزایش می‌دهد.

سعیدی‌نژاد و همکارانش [19] مجموعه‌ای از آزمایش‌های مرئی سازی بر روی مدل زیرسطحی سابوف در زوایای حمله مختلف در یک تونل باد مادون صوت انجام دادند. آن‌ها برای بررسی فیزیک جریان آزمایشات مرئی سازی بوسیله روغن و رنگدانه را انجام دادند. نتایج آزمایشات مرئی سازی، مکان جدایش اولیه ثانویه جریان بر روی مدل را نشان دادند و همچنین بر اساس نتایج آزمایش مرئی سازی، خط جدایش جریان با حرکت به سمت پاشنه بیشتر می‌شود. علاوه بر آن، برای دیدن نحوه شکل گیری و رشد گرادبه‌های عرضی بر روی سطح مدل آزمایش‌های مرئی سازی با دود و نور لیزر را نیز انجام دادند. نتایج مرئی سازی دود نشان داد با حرکت به سمت پاشنه یا انتهای مدل گردابه‌های عرضی بزرگتر شده و رشد بیشتری را از خود نشان می‌دهند.

وتزل و سیمپسون [9] اثر مولدهای ورتکس را روی جریان عرضی بصورت تجربی در تونل آب مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آن‌ها برای کاهش جریان عرضی از یک سری مولد به شکل بال دلتا استفاده نمودند. در این آزمایش‌ها از تکنیک مرئی‌سازی بوسیله روغن استفاده شده است. مطالعه مرئی‌سازی نشان داد، هنگامی که مولدهای ورتکس روی سطح بدنه مدل زیرسطحی نصب شده باشد، جدایش اولیه تا حد زیادی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که در کنترل جدایش جریان، بدنه مدل زیرسطحی که مولدهای ورتکس روی آن نصب است بسیار مؤثرتر از حالتی است که مدل بدون مولد ورتکس باشد. بطور کلی، نتایج آن‌ها نشان داد که ناحیه جدایش گردابه‌ای بزرگی که در اثر مانور یاو مدل زیرسطحی به‌وجود می‌آید، بعلت وجود مولد ورتکس روی سطح مدل حذف شده است.

فرخی و همکارانش [20] نحوه کاهش پسای فشاری یک مدل زیردریایی را بصورت تجربی در تونل باد بررسی کردند. آن‌ها از یک سری مولدهای ورتکس چهار وجهی هوشمند بر روی سطح یک مدل زیر دریایی استفاده کردند. در این آزمایش‌ها از تکنیک مرئی سازی بوسیله روغن استفاده شده است. زمانیکه آزمایش‌های مرئی سازی بر روی بدنه مدل زیردریایی بدون مولد ورتکس انجام شد، نتایج نشان داده‌اند که یک جدایش گردابه‌ای خیلی قوی در پشت برجک دیده می‌شود و یک ناحیه جدایش سه بعدی بزرگ نیز در قسمت دم زیردریایی روی بدنه تشکیل می‌شود. بعد از اینکه مولدهای ورتکس ثابت روی سطح زیردریایی نصب شدند، نتایج آن‌ها نشان داد که ناحیه جدایش گردابه‌ای بزرگ حذف شده است.

یکی از رایج‌ترین روش‌های مرئی‌سازی جریان به منظور بررسی ساختار میدان جریان نزدیک به سطح یک مدل در تونل باد، استفاده از روش مرئی سازی به کمک روغن[3] و ماده رنگی می‌باشد. در اکثر تحقیقات تجربی گذشته جهت تعیین الگوی تنش برشی و مکان جدایش جریان بر روی سطح مدل-های زیرسطحی، از جریان مخلوط روغن و دوده یا روغن با اکسید تیتانیم بر

1- Oil and Pigment Flow visualization
2- Seven hole probe
3- Oil

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.47.3]

روی سطح مدل استفاده شده است. در این تحقیق از روش روغن و ماده رنگی آشکار سازی جریان برای بررسی ساختار جریان شامل جدایش جریان و ساختارهای گردابه‌ای تشکیل شده در اطراف یک مدل زیرسطحی استاندارد بدون قسمت‌های جانبی استفاده شده است. در ادامه با استفاده از پخش روغن و رنگدانه بر روی سطح مدل مکان جدایش و اثرات گردابه‌ها بر روی سطح مدل در داخل تونل باد مشخص شده‌اند.

یکی دیگر از روش‌هایی که در این تحقیق از آن استفاده شده‌است، شبیه‌سازی عددی سه بعدی جریان اطراف مدل زیرسطحی است. در زمینه شبیه‌سازی عددی رفتار جریان اطراف مدل زیرسطحی مطالعات بسیاری صورت گرفته ولی تاکنون هیچ‌گونه مطالعه عددی در زمینه اثر استفاده از مولدهای ورتکس روی رفتار هیدردینامیکی جریان اطراف جسم زیرسطحی انجام نشده‌است. در واقع، شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان اطراف اجسام تقارن محوری به نوبه خود سبب کاهش هزینه‌های سنگین تجربی می‌شود. در واقع، روش‌های تجربی تخمین خوبی را برای ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی فراهم می‌کنند، ولی انجام آزمایش‌های تجربی در فاز اولیه طراحی هزینه بالایی را به‌خود اختصاص می‌دهد و همچنین نیازمند تجهیزات و لوازم آزمایشگاهی مجهز می‌باشد. بیشتر جریان کاربردی روی بدنه زیرسطحی‌ها، جریان‌های انتقالی و جریان‌های آشفته است، که در زوایای حمله بالا رفتار این جریان‌ها بسیار پیچیده می‌باشد. شبیه‌سازی عددی جریان اطراف زیرسطحی به نوع شبکه و مدل آشفته مناسب وابسته است. سارکر و همکارانش در سال 1997 شبیه‌سازی عددی خود را بصورت دوبعدی و با استفاده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ روی اجسام زیرسطحی مختلف در زاویه حمله صفر درجه انجام دادند [21]. آلین و همکارانش در سال 2005 مدل-های آشفتگی رینولدز پایین را جهت شبیه‌سازی جریان اطراف مدل زیرسطحی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند [22]. در تحقیقات ذکر شده فوق، بیشتر به کارایی مدل‌های آشفتگی مختلف روی مدل زیرسطحی پرداخته شده‌است. یاگدش و همکارانش در سال 2009 بصورت تجربی و عددی جریان اطراف مدل زیرسطحی را مورد مطالعه قرار دادند [23]. آن‌ها ضرایب برآ و پسا را برای زوایای حمله صفر درجه تا 15 درجه بدست آوردند. یاگدش و همکارانش در سال 2010 به شبیه‌سازی عددی رفتار جریان اطراف مدل زیرسطحی با استفاده از روش‌های LES و DES پرداختند [24]. در واقع آن‌ها عملکرد و کارایی LES و DES را حول مدل زیرسطحی مورد بررسی و مطالعه قرار دادند، که براساس مطالعه آن‌ها هر دو روش برای شبیه‌سازی جریان اطراف زیرسطحی مناسب و نتایج آن‌ها با نتایج تجربی تطابق خوبی را داشتند. ساکتیو و همکارانش در سال 2011 به‌صورت عددی جریان اطراف زیرسطحی سابوف را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند [25]. آن‌ها در این مطالعه از مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $k-\varepsilon$ غیرخطی را در زوایای حمله بالا استفاده نمودند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها با استفاده از مدل آشفتگی غیر-خطی $k-\varepsilon$ و مدل استاندارد $k-\varepsilon$ بخوبی با نتایج تجربی و عددی موجود هم‌خوانی داشت [25].

استفاده از مولدهای ورتکس روی یک مدل جهت درک بیشتر اثر مولدهای ورتکس روی رفتار جریان سه بعدی در اطراف مدل، این پژوهش را نسبت به کارهای گذشته متمایز می‌سازد. در واقع تاکنون هیچ‌گونه تحقیق عددی و تجربی در رابطه اثر مولدهای ورتکس روی زیردریایی سابوف صورت نگرفته و تنها تعداد محدودی مطالعه تجربی اثر مولدهای ورتکس را روی زیردریایی لوس‌آنجلس کلاس 688 انجام شده است. در این تحقیق، هم به‌صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز اپن فوم و هم به‌صورت تجربی با استفاده از روش مجسم‌سازی با روغن، اثر مولدهای ورتکس را روی زیرسطحی استاندارد سابوف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نرم‌افزار متن‌باز اپن فوم، یک جعبه ابزار برای دینامیک سیالات محاسباتی است که به‌وسیله آن می‌توان مسائل مختلف (جریان‌های تراکم‌ناپذیر، جریان‌های تراکم‌پذیر، جریان‌های چند فازی، واکنش‌های شیمیایی و غیره) را شبیه‌سازی کرد. این نرم‌افزار توسط مجموعه شبیه‌سازی باز[1] تحت مجوز عمومی گنو[2] (GNU) ایجاد شده که بصورت منبع‌باز موجود است. روش حل عددی به‌کار گرفته شده در این نرم‌افزار برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی روش حجم محدود[3] است [26].

2- معادلات اساسی حاکم

معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری‌شده برای جریان تراکم‌ناپذیر به‌صورت زیر بیان می‌شود (رابطه (1) بیان کننده قانون پیوستگی و رابطه (2) بیان کننده قانون مومنتوم است):

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t}+\frac{\partial U_j U_i}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial\left(-\overline{u_i' u_j'}\right)}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \tag{2}$$

در معادلات فوق، U_i سرعت متوسط در جهت iام، ρ چگالی و $\overline{u_i' u_j'}$ معرف تنش‌های رینولدزی (رابطه 6) است. معادله مومنتوم حاوی سه مولفه مجهول تنش رینولدزی است، لذا سیستم معادلات فوق کامل نیست و بایستی با استفاده از مدل آشفتگی مناسب تنش‌های رینولدزی محاسبه شوند. در این تحقیق، برای مدل‌سازی جریان آشفته غیرلزج و همچنین محاسبه تنش‌های رینولدزی از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استفاده شده‌است. این مدل دو معادله‌ای ویسکوزیته حالت آشفته را بصورت رابطه (3) مدل می‌کند:

$$\nu_t=c_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3}$$

در رابطه (3)، ویسکوزیته حالت آشفته براساس نرخ تولید و استهلاک آشفتگی بیان شده‌اند. مدل $k-\varepsilon$ که یکی از مدل‌های دو-معادله‌ای آشفتگی است، یکی از رایج‌ترین این مدل‌هاست .دو معادله‌ای بودن این مدل بدان معناست که شامل دو معادله انتقال اضافی برای نشان دادن خواص آشفتگی جریان است. این اجازه می‌دهد که یک مدل دو معادله‌ای اثراتی مانند انتقال گرما و انتشار انرژی متلاطم را به حساب آورد. اولین متغیر انتقال انرژی جنبشی آشفتگی، k است. متغیر دوم انتقال در این مورد استهلاک آشفتگی ε است. این متغیر است که مقیاس آشفتگی را تعیین می‌کند، در حالی که متغیر اول، انرژی در آشفتگی را تعیین می‌کند. معادلات انتقال برای انرژی سینماتیکی (k) (رابطه (4)) و نرخ استهلاک (ε) به‌صورت رابطه (5) تعریف می‌گردد:

$$\frac{Dk}{\partial t}=-\overline{u_i' u_j'}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\varepsilon+\frac{\partial}{\partial x_i}\left\{\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k}+\nu\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right\} \tag{4}$$

$$\frac{D\varepsilon}{\partial t}=-C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\overline{u_i' u_j'}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left\{\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}+\nu\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right\} \tag{5}$$

$$\overline{u_i' u_j'}=\nu_t S_{ij}-\frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{6}$$

1- OpenCFD Ltd
2- General Public Licence
3- Finite Volume

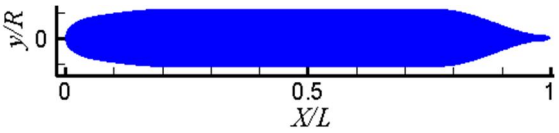
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.47.3]

3- تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش

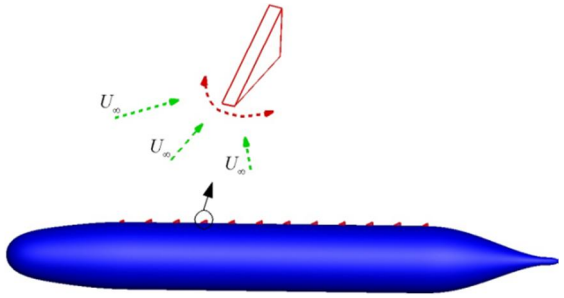
3-1- مدل

مدل زیر سطحی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، یک مدل زیرسطحی تقارن محوری استاندارد به نام سابوف[1] است. این مدل اولین بار توسط پژوهشکده دیوید تیلور طراحی شد [27] و مورد آزمایش‌های متفاوتی در تونل باد و حوضچه کشش قرار گرفته است [28، 29].

پروفیل شکل بدنه این مدل بصورت بدون بعد برحسب طول کلی مدل (L=0/229 m) و شعاع بیشینه (R=0/0134 m) در شکل 3 نشان داده شده است. این مدل بدون قسمت‌های جانبی از جنس آلومینیم با استفاده از روش CNC با دقت ±0/1mm ساخته شده است. پروفیل شکل مولدهای ورتکس هوشمند که بر روی سطح مدل بکار گرفته شده است در شکل 4 نشان داده شده است. مولد هوشمند همانطور که از شکل 4 مشخص است، به مولدی گفته می‌شود که همواره جهت آن به سمت جهت جریان ورودی به بدنه مدل باشد. در واقع مولد ورتکس هوشمند همواره نسبت به جربان ورودی به مدل تغییر کرده و جهت را به سمت جریان ورودی به مدل می‌کند. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده‌است مولد ورتکس هوشمند همواره جهت خود را با جهت جریان برخوردی به مدل تنظیم می‌نماید.



شکل3 پروفیل شکل مدل زیرسطحی سابوف به‌صورت بدون بعد

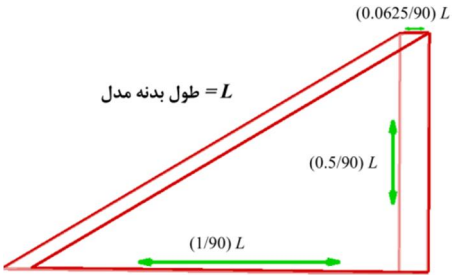


شکل4 پروفیل شکل مولد ورتکس هوشمند نصب شده بر روی زیرسطحی سابوف

3-2- مولد ورتکس

انواع مختلفی از مولدهای ورتکس وجود دارد. یکی از متداول‌ترین نوع مولدهای ورتکس، مولد ورتکس به شکل تیغ یک بال دلتا است. این نوع مولد ورتکس به دلیل سادگی در طراحی و شکل آن یکی از پرکاربردترین نوع مولدهای ورتکس می‌باشد. مولدهای ورتکسی که برای مطالعه تجربی استفاده شده است از جنس ورق آلومینیم می‌باشد. یکی از مهمترین نکات در استفاده از مولدهای ورتکس، اندازه و ابعاد آن است [8]. در این تحقیق برای مطالعه عددی و هم برای مطالعه تجربی از مولدهای ورتکس با ابعاد طول 1/90، ارتفاع 0/5/90 و عرض 90 /0/0625 استفاده شده است (شکل 5). با توجه به نتایج تجربی و عددی که جهت مطالعه ابعاد مولدهای ورتکس روی زیرسطحی سابوف صورت گرفت و با توجه به نتایج تجربی موجود [8]، ابعاد ذکر شده در بالا برای ادامه تست‌های آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی انتخاب شده است.

1- Suboff



شکل5 شکل و ابعاد مولد ورتکس نصف-بال دلتا شکل

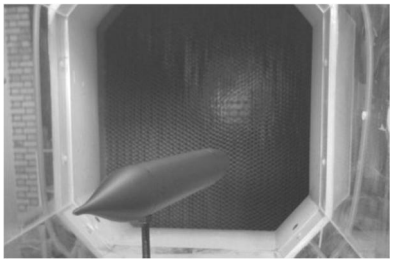
3-3- روش مرئی سازی توسط روغن و رنگدانه

مرئی‌سازی با روغن بر روی سطح مدل زیرسطحی سابوف انجام شده است. برای مشخص شدن خطوط میدان تنش برشی بر روی سطح مدل از مخلوط گازوئیل با رنگدانه‌های فلورسنت استفاده شده است. رنگدانه‌های فلورسنت با نسبت وزنی مناسب در گازوئیل حل شده‌اند. به منظور جلوگیری از لخته شدن رنگدانه‌ها و همچنین کنترل اندازه آن‌ها، چند قطره اسید اولئیک به این محلول اضافه شده است. به منظور عکس‌برداری مناسب از رنگ‌های فلورسنت از لامپ‌های مهتابی با رنگ آبی برای نورپردازی استفاده شده است. آزمایش-های مرئی سازی با روغن در یک تونل باد مادون صوت از نوع مدار باز با اتاق آزمون بسته انجام شده است. در شکل 6 نمایی از اتاق آزمون این تونل باد نشان داده شده که دارای ابعاد 350 x 350 mm² و با طول 700mm است. دیوارهای جانبی این تونل شفاف بوده و قابلیت عکس‌برداری از مدل بعد از انجام آزمایش‌ها وجود دارد. تمام آزمایش‌ها در سرعت جریان آزاد 5 m/s که معادل عدد رینولدز 150000 می‌باشد، انجام شده است. با توجه به ابعاد مدل، نسبت انسداد تونل باد در بیشترین زاویه کمتر از 5 % است که در این نسبت انسداد از تأثیر دیواره‌ها تونل باد بر روی ساختارهای جریان اطراف مدل می‌توان صرفنظر کرد [31،30]. تمامی اندازه‌گیری‌ها در یک سرعت و در زوایای حمله مختلف $0° \le \alpha \le 30°$ درجه انجام شده است.

4- بررسی و تحلیل نتایج

4-1- شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار اپن فوم

در این تحقیق به منظور بررسی کامل رفتار جریان اثر مولدهای ورتکس در اطراف یک مدل زیرسطحی، علاوه بر روش مجسم سازی جریان با روغن، از شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اپن فوم استفاده شده است. در این تحقیق از حلگر سیمپل فوم[2] استفاده شده که این حلگر برای جریان دائمی و



شکل6 نحوه قرار گیری مدل زیرسطحی در اتاق آزمون تونل باد برای انجام آزمایش-های مرئی سازی با روغن

2- simpleFoam

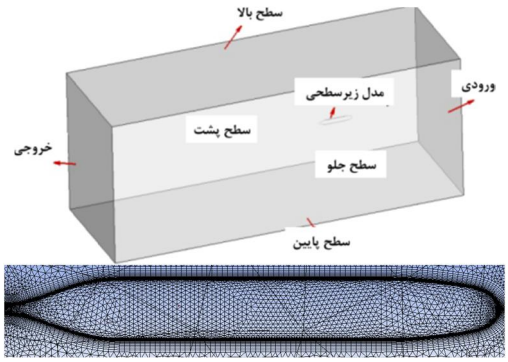
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.47.3]

غیرقابل تراکم آشفته کاربرد دارد. روش حل عددی مورد استفاده در حلگر سیمپل فوم با تکیه بر الگوریتم پیزو[1] می‌باشد. در واقع به علت هزینه‌های انجام تست‌های تجربی و محدودیت‌های این روش، برای بررسی بیشتر جریان اطراف مدل زیرسطحی از روش عددی استفاده شده است. با استفاده از روش عددی، ضریب فشار، ضریب اصطحکاک سطح، مقادیر نیروهای هیدرودینامیکی،ساختار و اثرات گردابه‌ها بر سطح مدل مانند مکان جدایش یا مکان اتصال مجدد سیال به سطح بر روی سطح بدنه مدل در زوایای مختلف تعیین شده است.

شکل 7 دامنه حل مورد بررسی در این تحقیق و همچنین نحوه شبکه-بندی اطراف مدل زیرسطحی را نشان می‌دهد.

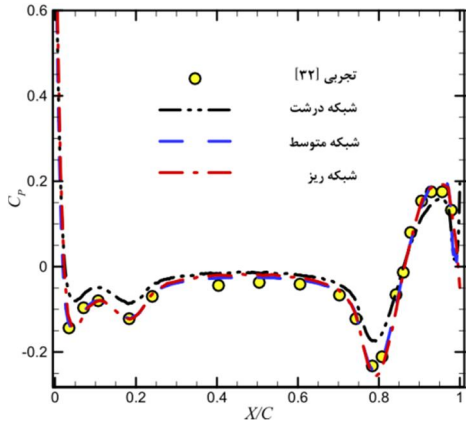
جهت بررسی استقلال حل از شبکه، در این تحقیق از سه نوع شبکه-بندی درشت (902072 المان)، متوسط (1562902 المان) و ریز (2016624) استفاده شده است. همان‌طور که در شکل‌های 8 و 9 و همچنین جدول 1 مشاهده می‌شود نتایج حاصل از شبکه متوسط و ریز به نتایج تجربی موجو بسیار شبیه بوده و دارای درصد خطای کمتری در اندازه‌گیری مقدار ضریب پسا می‌باشند. در این تحقیق، برای شبیه‌سازی جریان هیدرودینامیکی اطراف مدل زیرسطحی سابوف از شبکه متوسط استفاده شده است، زیرا نتایج آن با نتایج تجربی تطابقت خوبی داشته و درصد خطای کمی را دارد و همچنین دارای زمان اجرای برنامه کمتری نسبت به شبکه ریز بوده و موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه محاسباتی می‌شود.

علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، در شکل 8 تغییرات ضریب فشار روی سطح بدنه زیرسطحی سابوف در رینولدز 14 میلیون نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل نمایان است نتایج حاصل از نرم‌افزار اپن فوم با نتایج تجربی موجود بسیار مشابه بوده و با نتایج موجود مطابقت دارد. بررسی شکل‌های بالا نشان می‌دهد که نتایج حاصل از نرم‌افزار موجود به نتایج تجربی تطابق داشته که نشان دهنده دقت و صحت نرم‌افزار موجود در شبیه‌سازی عددی جریان اطراف زیرسطحی در رینولدز و زوایای حمله مختلف می‌باشد. همچنین در شکل 9 نمودار تغییرات ضریب اصطحکاک بدنه حول بدنه مدل را نشان می‌دهد. نتایج شکل‌های بالا نشان می‌دهند که نتایج حاصل از نرم-افزار اپن فوم (تغییرات ضریب فشار، ضریب اصطحکاک سطح) با نتایج تجربی [32] موجود تطابق خوبی داشته که نشان می‌دهد نرم‌افزار موجود در شبیه-سازی عددی جریان اطراف زیرسطحی بسیار مناسب بوده و از دقت خوبی برخوردار است.

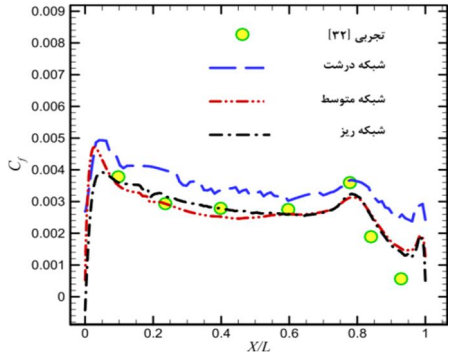


شکل 7 دامنه حل (بالا) و نحوه شبکه‌بندی مدل زیرسطحی سابوف (پایین)

1- PISO



شکل 8 مقایسه تغییرات ضریب فشار روی بدنه زیرسطحی سابوف با نتایج تجربی موجود در رینولدز 14 میلیون

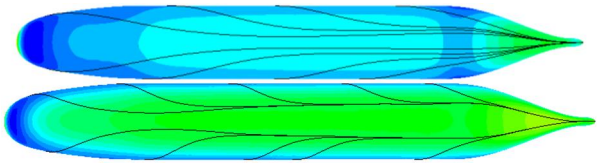


شکل 9 مقایسه تغییرات ضریب فشار روی بدنه زیرسطحی سابوف با نتایج تجربی موجود در رینولدز 14 میلیون

جدول 1 مقایسه مقدار ضریب پسا برای مدل زیرسطحی سابوف در زاویه حمله صفر درجه با نتایج تجربی موجود [33]

ضریب پسا	صفر درجه	درصد خطا
حل حاضر (شبکه درشت)	0/0904	%4/87
حل حاضر (شبکه متوسط)	0/0894	%3/71
حل حاضر (شبکه ریز)	0/0889	%3/13
تجربی [30]	0/0862	

در شکل 10 خطوط تنش برشی بر روی بدنه زیرسطحی سابوف در زوایای حمله مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش زاویه حمله خطوط برشی روی سطح از خط مرکزی فاصله گرفته و خط جدایش روی سطح تشکیل یافته و رشد می‌کند. با افزایش زاویه حمله خط جدایش بزرگتر شده و خط جدایش از خط مرکزی انحراف بیشتری پیدا کرده که همان‌طور که در نتایج تجربی ذکر گردید، نشان دهنده افزایش گردابه‌های روی سطح می‌باشد.



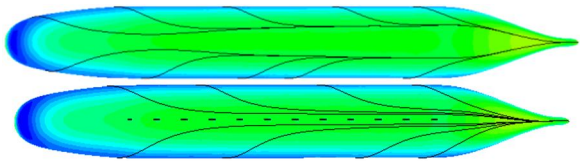
شکل 10 خطوط تنش برشی بر روی بدنه زیرسطحی سابوف در زوایای حمله مختلف (زاویه حمله 15 درجه (بالا) و زاویه حمله 30 درجه (پایین))

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.47.3]

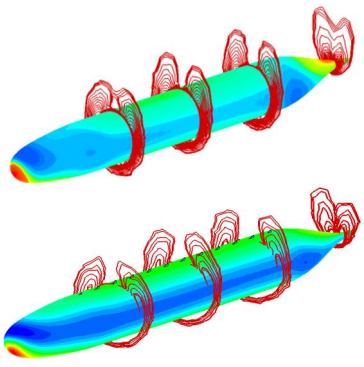
شکل 11 مقایسه خطوط تنش برشی را بر روی بدنه مدل زیرسطحی سابوف برای دو حالت مختلف با استفاده از مولدهای ورتکس و بدون استفاده از مولدهای ورتکس در زاویه حمله 30 درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل بالا نمایان است، استفاده از مولدهای ورتکس سبب شده که خطوط تنش برشی به خط مرکزی نزدیک شده و در نتیجه موجب کاهش خط جدایش روی سطح می‌شوند. در واقع استفاده از مولد ورتکس سبب جلوگیری از رشد گردابه‌ها روی سطح شده و موجب خورد شدن و شکسته شدن گردابه‌های بزرگ می‌شوند، که این امر با انرژی دهی به لایه مرزی صورت می‌گیرد. یعنی مولدهای ورتکس با انرژی دادن به لایه مرزی از رشد گردابه جلوگیری می‌کنند که در نهایت موجب کاهش جدایش و درگ می‌شود.

شکل 12 نیز گردابه‌های اطراف مدل زیرسطحی را در زاویه حمله 30 درجه و رینولدز چهارده میلیون را برای دو حالت مختلف با مولد ورتکس و بدون مولد ورتکس را نشان می‌دهد. همان‌طور که در بالا اشاره شد، مولدهای ورتکس با انرژی دهی به لایه مرزی از رشد گردابه‌ها جلوگیری می‌کند. در واقع انرژی دهی به لایه مرزی موجب خورد کردن گردابه‌های بزرگ روی سطح شده که در نهایت جدایش روی سطح تقریباً از بین رفته و اندازه گردابه روی سطح در مقایسه با مدل بدون استفاده از مولد ورتکس کوچکتر می‌شود.

شکل 13 نیز مانند شکل 11 گردابه‌های اطراف مدل زیرسطحی را در زاویه حمله 30 درجه نشان می‌دهد. علاوه بر این، اندازه مقدار بزرگی گردابه نیز در کنار شکل ایجاد شده است. با توجه به اندازه گردابه‌ها و مقدار بزرگی و قدرت آن‌ها مشاهده می‌شود که برای حالتی که از مولد ورتکس استفاده نشده است اندازه گردابه‌ها بزرگتر شده و هم مقدار بزرگی و قدرت گردابه‌ها بیشتر شده است. یعنی مولدهای ورتکس باعث کاهش اندازه گردابه‌ها و همچنین قدرت گردابه‌ها را به‌ویژه در قسمت پاشنه مدل که محل قرارگیری پروانه زیرسطحی است را به‌طرز قابل ملاحظه‌ای کم کرده و گردابه‌ها را کنترل می‌کند (برای مثال با توجه به شکل، اندازه بزرگی گردابه در مقطع X/L=1.0 برای حالتی که از مولد ورتکس استفاده نشده 116000 است ولی



شکل 11 خطوط تنش برشی بر روی بدنه زیرسطحی سابوف در زاویه حمله 30 درجه (بدون مولد ورتکس(بالا) و با مولد ورتکس (پایین))



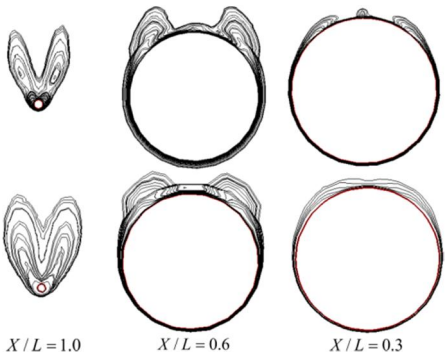
شکل 12 گردابه‌های ایجاد شده بر روی بدنه زیرسطحی سابوف در مقاطع مختلف و در زاویه حمله 30 درجه (بدون مولد ورتکس (بالا) و با مولد ورتکس (پایین))

برای مدل با مولد ورتکس 980 می‌باشد). علاوه بر این، همانطور که از شکل 13 نمایان است با حرکت از قسمت نوک زیرسطحی به قسمت انتها و پاشنه مدل گردابه‌ها رشد پیدا کرده و اندازه آن‌ها بزرگ‌تر می‌شود.

در جدول 2 مقدار ضریب پسا برای مدل زیرسطحی سابوف را در رینولدز چهارده میلیون نشان می‌دهد. نتایج ضرایب پسا نشان می‌دهد که استفاده از مولدهای ورتکس در زوایای حمله بالا باعث کاهش ضریب پسا شده و در زاویه حمله صفر درجه به دلیل افزایش پسای اصطحکاکی سطح مقدار ضریب پسا افزایش یافته است. در واقع کاهش پسا برای مدلی که مولد ورتکس روی آن نصب شده است به خاطر اثر مولدهای ورتکس در کاهش مقدار ناحیه جدایش و کاهش اندازه گردابه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از مولد ورتکس سبب کاهش پسا شده و در واقع کاهش ضریب پسا و همچنین ناحیه جدایش روی سطح و گردابه‌ها موجب افزایش کارایی و راندمان زیرسطحی می‌باشد. علاوه بر این، استفاده از مولدهای ورتکس سبب افزایش راندمان پروانه زیرسطحی و کاهش نویز پروانه نیز می‌گردد. این امر به این دلیل است که جریان گردابه‌ای و جریان جدا شده‌ی کمتری به داخل جریان پروانه وارد می‌شود، در نتیجه سبب افزایش راندمان و کارایی پروانه زیرسطحی می‌گردد.

4-2- نتایج روش مرئی سازی توسط روغن و رنگدانه

در این تحقیق به منظور بررسی کامل رفتار جریان اثر مولدهای ورتکس در اطراف یک مدل زیرسطحی، از روش مجسم‌سازی جریان با روغن استفاده شده است. با استفاده از روش آشکارسازی روغن، ساختار و اثرات گردابه‌ها بر سطح مدل مانند مکان جدایش یا مکان اتصال مجدد سیال به سطح بوسیله جریان روغن و رنگدانه بر روی سطح بدنه مدل در زوایای مختلف تعیین شده است. نتایج کمی مکان جدایش و مکان اتصال مجدد سیال به سطح با استفاده از تحلیل نتایج مرئی سازی با روغن استخراج شده‌اند. میزان عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌های انجام شده با توجه به دقت نحوه تعیین مکان جدایش حدود 3 درصد است.



شکل 13 گردابه‌های ایجاد شده و همچنین اندازه بزرگی گردابه‌ها بر روی بدنه زیرسطحی سابوف در مقاطع مختلف و در زوایه حمله 30 درجه (بدون مولد ورتکس (بالا) و با مولد ورتکس (پایین)).

جدول 2 مقایسه مقدار ضریب پسا برای مدل با مولد ورتکس و بدون مولد ورتکس با نتایج تجربی موجود [33]

ضریب پسا	صفر درجه	سی درجه
حل حاضر (بدون مولد ورتکس)	0/0894	0/5488
حل حاضر (با مولد ورتکس)	0/0915	0/5024
تجربی [30]	0/0862	

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.47.3]

وقتی که وسائل متحرک زیرسطحی با بدنه خط جریانی شکل همانند زیردریایی‌ها، اژدرها و غیره، نسبت به جریان آزاد زاویه می‌گیرند، مولفه‌های جریان سیال برخوردکننده با جسم به دو قسمت تقسیم می‌شود:

1) مولفه‌ای از جریان که در امتداد محور جسم و جریان محوری نام دارد.

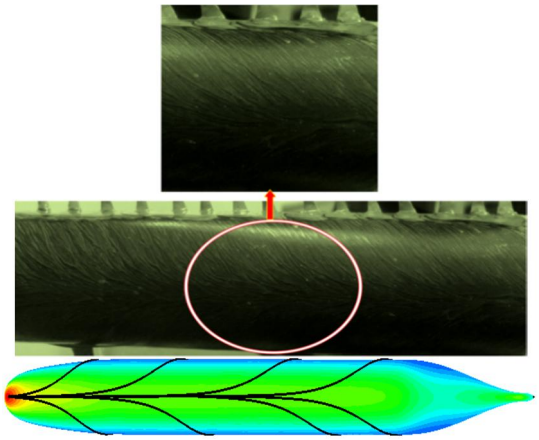
2) مولفه‌ای که عمود بر محور مدل بوده و جریان عرضی نامیده می‌شود.

با افزایش زاویه مدل نسبت به جریان، گرادیان فشار معکوس عرضی بین سمت موافق و مخالف جریان، باعث جدایش لایه مرزی در سمت مخالف جریان می‌شود. لایه مرزی جدا شده با جریان طولی برخورد کرده و تشکیل گردابه‌هایی را در سمت مخالف باد می‌دهد. یک جفت گردابه متقارن (با چرخش مخالف) در سمت مخالف جریان ایجاد می‌شوند که در زوایای زیاد از مدل ریزش می‌کنند.

آزمایش‌های مرئی سازی با روغن و رنگدانه در زوایای حمله 0 درجه الی 30 درجه بر روی مدل مورد مطالعه زیرسطحی استاندارد سابوف انجام شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از مرئی سازی‌های انجام شده، در زوایای حمله صفر تا 5 درجه، لایه مرزی جریان قسمت‌های دماغه و مسطح بدنه را بدون جدایش پشت سر می‌گذارد و به رشد خود ادامه می‌دهد و نهایتاً در قسمت انتهایی دم از سطح جدا می‌شود. نتایج دیگر محققین [34] نیز تأییدکننده این مطلب است. در زوایایی بیشتر از 10 درجه لایه مرزی‌های تشکیل شده بر روی سطح جسم با جریان عرضی برخورد کرده و از روی بدنه جدا شده و تشکیل گردابه‌هایی را در پشت مدل می‌دهد. در زوایای حمله کم، ناحیه جدا شده کاملا کوچک بوده و در انتهای مدل قرار دارد ولی با افزایش زاویه جریان، ناحیه جدا شده قسمت زیادی از سطح جسم را فرا گرفته و به سمت جلوی مدل پیش می‌رود.

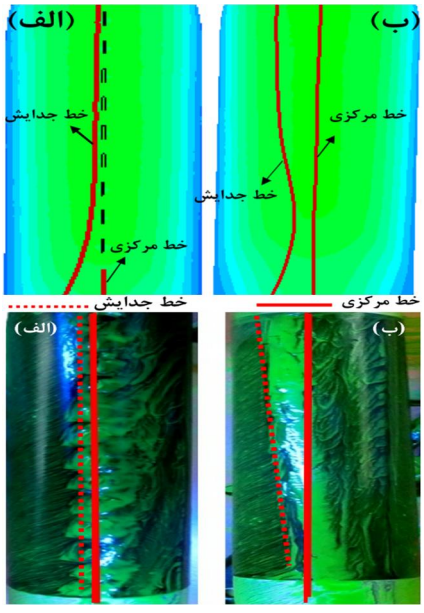
در شکل 14 ساختار جریان بر روی سطح مدل زیرسطحی سابوف با وجود مولدهای ورتکس نصب شده روی آن در سمت مقابل جریان در زاویه حمله 30 درجه نشان داده شده است. این شکل از نتایج مرئی سازی با روغن و رنگدانه بر روی سطح مدل بدست آمده است. هنگامی که مدل نسبت به جریان زاویه می‌گیرد، در سمت مؤافق باد در امتداد طولی مدل (قسمت میانی) سرعت جریان هنگام برخورد با جسم به صفر رسیده و خط سکون ایجاد می‌شود. همانگونه که در شکل 14 مشاهده می‌شود حرکت خطوط جریان، با رسیدن به مکان جدایش متوقف می‌شوند. در این مکان لایه نازکی از روغن روی هم انباشته می‌شود. این لایه نازک روغن به‌صورت یک خط در امتداد بدنه زیرسطحی در این شکل قابل مشاهده است. از آنجایی که این مدل کاملاً تقارن محوری است ساختار جریان در نیمه بالایی و پایینی مدل یکسان است. به همین دلیل در این قسمت تنها ساختار جریان در نیمه بالایی مدل بررسی می‌گردد.

در شکل 15 نمای بالایی از ساختار جریان در اطراف مدل زیرسطحی سابوف را برای دو حالت متفاوت با مولد ورتکس (الف) و بدون مولد ورتکس (ب) در زاویه حمله 30 درجه نشان داده شده است. با توجه به نتایج عددی و تجربی شکل 15، مشاهده می‌شود که مولدهای ورتکس بکار برده شده بر روی مدل زیرسطحی باعث نزدیک شدن خطوط تنش برشی به خط مرکزی شده و از رشد آن و در واقع رشد لایه مرزی و رشد گردابه‌های جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، شکل فوق قابلیت نرم‌افزار بکار برده شده را در شبیه‌سازی و همچنین پیش‌بینی رفتار و الگوی جریان اطراف مدل زیرسطحی را نشان می‌دهد که بسیار به نتایج تجربی تست روغن و رنگدانه شبیه است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، لایه‌های مرزی که به سمت نیمه بالایی و



شکل 14 ساختار جریان بر روی مدل زیرسطحی سابوف در سمت موافق باد در زاویه حمله 30 درجه.

پایینی مدل حرکت می‌کنند، در اثر گرادیان فشار نامطلوب که در عرض مدل (در اثر انحنای سطح مدل) وجود دارد، از سطح جدا می‌شوند و باعث تشکیل گردابه عرضی می‌شود. جایی که جریان از روی مدل جدا می‌شود، روغن در آن محل جمع می‌شود. مکان جدایش اولیه با فاصله گرفتن از نوک دماغه، از سمت مخالف باد به سمت موافق باد حرکت می‌کند. با توجه به شکل، خط جدایش برای حالتی که از مولدهای ورتکس استفاده شده است تقریباً نسبت به خط مرکزی ثابت بوده و مقدار خط جدایش در این حالت نسبت به حالتی که بدنه لخت (بدون مولد ورتکس) بکار رفته، کمتر شده است. در واقع حضور مولدهای ورتکس روی مدل زیرسطحی باعث ایجاد ورتیسیته‌های کوچکی روی سطح شده که این امر باعث جلوگیری از رشد جریان گردابه‌ای در اطراف زیرسطحی می‌شود. در واقع، مولدهای ورتکس با انرژی‌دهی و آشفته کردن جریان لایه مرزی و ایجاد ورتیسیته‌های کوچک در امتداد بدنه از رشد و بزرگ شدن جدایش عرضی جلوگیری می‌کنند، در نتیجه برای مدلی که از مولد ورتکس استفاده شده مقدار جدایش عرضی کاهش می‌یابد.



شکل 15 مقایسه نتایج عددی و تجربی مکان جدایش جریانبر روی مدل زیرسطحی سابوف برای دو حالت بدنه با مولد ورتکس (الف) و بدنه لخت (بدون مولد ورتکس) (ب) در زاویه حمله 30 درجه.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.47.3]

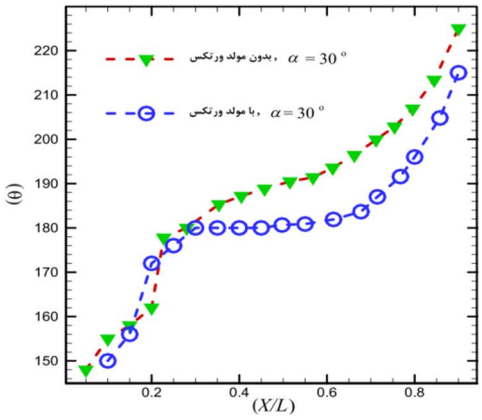
در شکل 16 نحوه تغییرات مکان جدایش اولیه روی سطح مدل زیرسطحی سابوف در دو حالت متفاوت با مولد ورتکس و بدون مولد ورتکس نشان داده شده است. در این منحنی محور افقی (X/L) فاصله بدون بعد از ابتدای دماغه مدل در امتداد مدل بوده و محور عمودی نشان دهنده موقعیت زاویه جانبی روی بدنه مدل می‌باشد که (θ) مبدا آن در محل خط سکون (مرکز مدل در سمت موافق باد) قرار دارد. موقعیت مکان جدایش در این شکل نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از دماغه مدل به سمت پاشنه، جدایش روی سطح مدل از سمت مخالف جریان به سمت موافق جریان حرکت کرده و باعث می‌شود که ناحیه بیشتری از سطح مدل دچار جدایش شود. با افزایش زاویه حمله، شروع جدایش در موقعیت‌های نزدیکتری به دماغه اتفاق می‌افتد. اما در یک موقعیت مکانی X ثابت، با افزایش زاویه حمله مکان جدایش به سمت مخالف جریان حرکت می‌کند (مقادیر θ افزایش می‌یابند). همچنین شکل 9 به‌خوبی نشان می‌دهد مدلی که مولدهای ورتکس روی آن نصب شده مقدار انحراف خط جدایش روی سطح مدل به سمت موافق جریان کمتر حرکت کرده و مقدار جدایش کمتری ایجاد کرده است.

5- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، به منظور بررسی فیزیک میدان جریان اطراف بدنه یک مدل زیرسطحی استاندارد بصورت تجربی با استفاده از روش مرئی سازی جریان توسط روغن و رنگدانه بر روی سطح مدل در داخل تونل باد و همچنین بصورت شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اپن فوم استفاده شده است. نتایج مرئی سازی با استفاده از روغن و رنگدانه بر روی سطح مدل، میدان تنش برشی روی سطح مدل را آشکار می‌سازد. نتایج عددی نیز میدان تنش برشی روی سطح مدل، گردابه‌های اطراف آن و همچنین جدایش جریان اطراف مدل را نشان می‌دهد. نتایج کیفی و کمی اندازه‌گیری شده رفتار مکان جدایش اولیه و مکان چسبیدن دوباره جریان روی سطح مدل زیرسطحی مورد نظر به‌طور خلاصه به‌صورت زیر بیان می‌کند:

1) در زوایای حمله $0° \geq \alpha \geq 10°$ در قسمت دماغه و میانی بدنه مدل زیرسطحی هیچ جدایش جریانی به چشم نمی‌خورد. اما در قسمت پاشنه مدل به علت شیب منحنی زیاد بدنه، جدایش در زوایای حمله 5 و 10 درجه رخ می‌دهد.

2) در زوایای حمله $10° \geq \alpha \geq 30°$ با حرکت از دماغه مدل به‌سمت پاشنه آن، مقدار جدایش اولیه در اثر استفاده از مولد ورتکس کاهش می‌یابد، به عبارت



شکل 16 مکان جدایش جریان بر روی بدنه زیرسطحی سابوف برای دو حالت با مولد ورتکس و بدون مولد ورتکس در زاویه حمله 30 درجه.

دیگر استفاده از مولد ورتکس باعث کاهش جدایش عرضی روی سطح شده و در نتیجه ناحیه کمتری از سطح زیرسطحی در منطقه گردابه پشت قرار می‌گیرد.

3) در زوایای حمله $10° \geq \alpha \geq 30°$، مولدهای ورتکس تقریباً بطور کامل جدایش ثانویه را روی سطح مدل حذف کرده‌اند.

4) در تمام زوایای حمله، استفاده از مولد ورتکس باعث کاهش اندازه گردابه روی سطح زیرسطحی شده است.

5) با حرکت از قسمت میانی مدل تا انتهای آن، استفاده از مولد ورتکس سبب کاهش اندازه جدایش اولیه و اندازه گردابه روی سطح بدنه زیرسطحی شده است.

6) در زوایای حمله زیاد شروع مکان جدایش از قسمت دماغه زیرسطحی قرار دارد اما با کاهش زاویه حمله شروع مکان جدایش اولیه به قسمت میانی بدنه زیرسطحی منتقل می‌شود. همچنین با افزایش زاویه حمله، مکان زاویه عرضی جدایش نیز افزایش می‌یابد.

7) در زوایای حمله زیاد مولدهای ورتکس باعث کاهش جدایش جریان روی سطح مدل می‌شود.

8) مولدهای ورتکس باعث کاهش پسا و همچنین جریان گردابه‌ای اطراف مدل در زوایای حمله زیاد می‌شوند.

6- فهرست علائم

L	طول کلی مدل(m)
r	شعاع منحنی مدل(m)
R	شعاع بیشینه منحنی مدل(m)
Re	عدد رینولدز($\rho UL\mu^{-1}$)
U	سرعت سیال(m/s)
X	فاصله از نوک دماغه در امتداد بدنه مدل(m)
C_P	ضریب فشار
C_f	ضریب اصطحکاک

علایم یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
α	زاویه حمله (درجه)
θ	زاویه پیرامونی روی سطح مدل(درجه)

7- مراجع

[1] K., Sreenivas, D., Hyams, and D., Mitchell, "Physics based simulation of Reynolds number effects in vortex intensive incompressible flows", *NATO Research and Technology Organisation*. Rue Ancelle, France, 61-69, 2003.

[2] D.M., Bushnellt, and C.D., Donaldson, "*Control of Submersible Vortex Flows*", NASA Technical Memorandum no. 102693, 1990.

[3] A., Saeidi Nezhad, A. A., Dehghan, M., Dehghan Manshadi, "Nose Shape Effect on the Visualized Flow Field Around an Axisymmetric Body of Revolution at Incidence" *Journal of Visualization*., DOI 10.1007/s12650-014-0226-1, 2014.

[4] L. E., Ericsson, and J. P., Reding, "Vortex-Induced Asymmetric Loads in 2-D and 3-D Flows" *AIAA 18th Aerospace Sciences Meeting,* 14-16 January, 1980.

[5] D.I.A., Poll, "On the Effect of Boundary Layer Transition on a Cylindrical Afterbody at Incidence in Low-Speed Flow", *Aero J.*, pp. 315-327, 1985.

[6] H.D., Taylor, "*The Elimination of Diffuser Separation by Vortex Generators*", United Aircraft Corporation Report No. R-4012-3, 1947.

[7] G.B., Schubauer, and W.G., Spangenberg, "Forced Mixing in boundary layers", *Journal of Fluid Mechanics* 8, 10-32, 1960.

[8] H.H., Pearcey, "*Shock-Induced Separation and its Prevention by Design and Boundary Layer Control*," Boundary Layer and Flow Control, Its

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.47.3]

Principal and Applications, Vol. 2, edited by G.V. Lachman, Pergamon Press, Oxford, England, pp. 1166-1344, 1961.
[9] T.G.,Wetzel, and R.L., Simpson, "*The Effect of Vortex Generators on Crossflow Separation on a Submarine in a Turning Maneuver*", Report VPI-AOE- 186, distributed by DTIC for Defense Advanced Research Projects Agency1992(a).
[10] T.G.,Wetzel, and R.L., Simpson, "The Effect of Vortex Generators on Crossflow Separation on a Submarine in a Turning Maneuver", *Proceedings of the Fifth Submarine Technology Symposiumn,* Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University, Laurel, Maryland. pp. 185-198, 1992(b).
[11] T.G.,Wetzel, and R.L., Simpson, "The Effect of Vortex Generating Fins and Jets on CrossFlow Separation on a Suhmarine in a Turning Maneuver" *31st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit,* Reno, Nevada, AIAA 93-0862, 1993.
[12] J.J., Gorski, "Marine Vortices and Their Computation" *RTO Applied Vehicle Technology Panel (AVT) Symposium,* Leon, Norway, 7-11 May, 2001.
[13] D.L., Paster, ''Importance of Hydrodynamic Considerations for Underwater Vehicle Design" *IEEE,* CH2363-0/86/0000, pp. 1413-1422, 1986.
[14] J.B., Barlow,W.H.,Rae, and A., Pope ''*Low-Speed Wind Tunnel Testing*," Third Ed., John Wiley and Sons, pp. 627-630, 1999.
[15] M., Mackay, "*Flow Visualization Experiments with Submarine Models in a Wind Tunnel*" Report DREA TM 88/204, Defense R&D Canada-Atlantic, 1988.
[16] J.A., DeMoss, and R.L., Simpson, "A Study of the Boundary Layer Development and Skin Friction on a bare-body NNEMO model," VPI-AOE-306, Department of Aerospace and Ocean Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2008.
[17] J. M., Jimenez, M. Hultmark, and A.J., Smits, "The intermediate wake of a body of revolution at high Reynolds numbers", *J. Fluid Mech*., vol. 659, pp. 516–539, 2010.
[18] Z.h., Liu, Y., Xiong, Z., Wang, S. Wang,And C., TU, "Numerical Simulation and Experimental Study of the New Method of Horseshoe Vortex Control", *Journal of Hydrodynamics,* 22(4):572-581, 2010.
[19] A., Saeidi Nezhad, A.A., Dehghan, M., Dehghan Manshadi, M., Kazemi Esfeh, "Experimental Investigtion of the Vortex Structure on a Submmersible Model" *Modares Mechanical Engineering*,, Vol. 13, pp. 98-109, 2012.(In Persian)
[20] S., Farokhi,R.,Taghavi, and R., Barrett, "Pressure Drag Reduction Concepts for Maneuvering Submarines" *10th European Drag Reduction Working Meeting,* 24 March, 1997.
[21] T., Sarkar, P.G., Sayer, and S.M., Fraser, "Flow simulation past axisymmetric bodies using four different turbulence models," *Applied Mathematical Modelling,* Vol.21, pp.783-792, 1997.
[22] N., Alin, R.E., Bensow, C., Fureby, T., Huuva, and U., Svennberg, "Current capabilities of DES and LES for submarines at straight course," *Journal of Ship Research,* vol.54, No. 3, pp. 184-196, 2010.
[23]P., Jagadeesh, K., Murali, and V.G., Idichandy, "Experimental investigation of hydrodynamic force coefficients over AUV hull form," *Ocean Engineering,* Vol. 36, pp. 113–118, 2009.
[24] P., Jagadeesh, and K., Murali, "Application of low-Re turbulence models for flow simulations past underwater vehicle hull forms," *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering,* Vol.1, 41-54, 2005.
[25] R., Sakthive, S., Vengadesan, and S.K., Bhattacharyya, "Application of Non-Linear κ-ε Turbulene Model in Flow Simulation over Uuderwater Axisymmetric Hull at Higher Angle of Attack," *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering,* December, DOI: 10.3329/jname.v8i2.6984, 2011.
[26] The open source CFD toolbox, OPenFOAM, [Online], Accessed 8 September 2013; http://www.openfoam.com.
[27]N. C., Groves,T.T., Huang andM.S., Chang "*Geometric Characteristics of DARPA SUBOFF Models (DTRC Model Nos. 5470 And 5471)*" Report DTRC/SHD-1298-01, March 1989.
[28]T., Huang,H.L., Liu, N., Groves, T., Forlini, J., Blanton, and S., Gowing, "Measurements of Flows Over an Axisymmetric Body With Various Appendages in a Wind Tunnel: the DARPA SUBOFF Experimental Program" *Nineteenth Symposium on Naval Hydrodynamics*. Seoul, Korea.1992.
[29] R.F., Roddy, "*Investigation of the Stability and Control Characteristics of Several Configurations of the DARPA Suboff Model (DTRC model 5470) from captive-model experiments*" David Taylor Research Center, Ship Hydromechanics Department, DTRC/SHD-1298-08, September, 1990.
[30] D.K., Pantelatos, and D.S., Mathioulakis, "Experimental Flow Study Over a Blunt-Nosed Axisymmetric Body at Incidence" *Journal of Fluids and Structures,* Vol. 19, pp. 1103-1115, 2004.
[31]M., Kazemi Esfeh., A. A., Dehghan, M., Dehghan Manshadi, "Experimental Investigtion of Upstream Structures Influence on the Ventilation Performance of One-Sided Wind-Catchers" *Modares Mechanical Engineering*,, Vol. 13, pp. 49-60, 2012.(In Persian)
[32] H.L., Liu, and T.T., Huang, "*Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data*," Naval Surface Warfare Center Carderock Division (NSWCCD), West Bethesda, MD, report CRDKNSWC/HD-1298-11, 1998.
[33] M., Jimenez, M., Hultmark, and A.J., Smits, "The Intermediate Wake of a Body of Revolution at High Reynolds Numbers" *Journal of Fluid Mechanics,* Vol. 659, pp. 516-539, 2010.
[34] G.S. West, and C.J., Apelt, "The Effects of Tunnel Blockage and Aspect Ratio on the Mean Flow Past a Circular Cylinder with Reynolds Numbers Between 104 and 105" *Journal of Fluid Mechanics,* Vol, 114, 361–377, 1982.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.47.3]