



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

مجتبی دهقان منشادی<sup>1\*</sup>، کاظم هجرانفر<sup>2</sup>، امیرحمزه فرج‌اللهی<sup>3</sup>

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

\*شاهین شهر، صندوق پستی 83145/115@mut-es.ac.ir

### 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

این فوم

### چکیده

بررسی میدان جریان اطراف اجسام تقارن محوری که تشکیل دهنده بدنه اصلی هواپیماها و زیرسطحی‌ها می‌باشد، مورد توجه محققین زیادی قرار دارد. زيردریایی‌ها 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، پسی 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 این فوم، میدان جریان در اطراف مدل زیرسطحی استاندارد سابوف با استفاده از مولدهای ورتکس در زوایای حمله  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  بررسی شده‌است. استفاده از روش مرئی‌سازی با روغن و شبیه‌سازی عددی در مطالعه حاضر به بررسی بیشتر فیزیک اثر مولدهای ورتکس روی ساختار گردابه‌های تشکیل شده 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<sup>1\*</sup>, Kazem Hejranfar<sup>2</sup>, AmirHamzh Farajollahi<sup>3</sup>

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 axisymmetric stream lined bodies which forms the main body of the airplanes 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  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  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.

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 می‌باشد. در شکل 1 شماتیکی از میدان پیچیده جریان اطراف یک جسم زیرسطحی نشان داده شده است [1]. مشاهده می‌شود که میدان جریان بوسیله جدایش گردابی احاطه شده است.

### 1- مقدمه

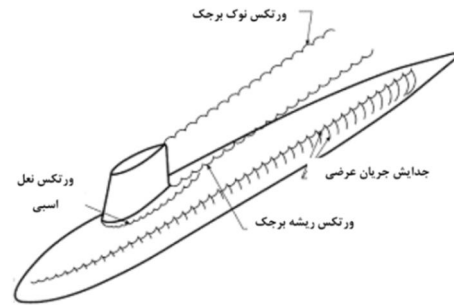
بررسی میدان جریان اطراف اجسام خط جریانی تقارن محوری، همیشه مورد توجه محققین زیادی قرار داشته است زیرا چنین اجسامی غالباً برای طراحی شکل بدنه اصلی وسایل متحرک در هوا یا آب مانند هواپیماها، زیردریایی‌ها، آژدرها و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. بررسی پایداری و کنترل پذیری

جدایش لایه مرزی از سطح شده و یک جفت گردابه متقارن در سمت مخالف جریان ایجاد می‌شود. بعلاوه 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 گردش، جریان عرضی<sup>1</sup> 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 ورتکس‌های 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. اسپنچوور 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.

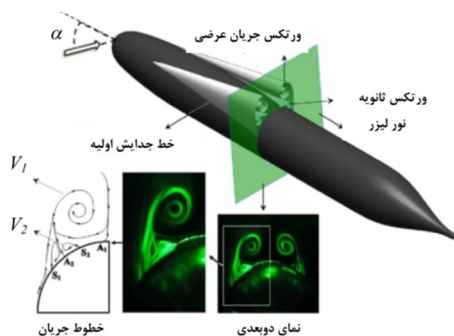
پیرسی در سال 1961 مقاله کاملی را در زمینه تئوری استفاده از مولدهای ورتکس در جریان دوبعد [8] ارائه نمود. بر اساس مطالعه پیرسی، اصطکاک لزجتی و گرادیان فشار معکوس لایه مرزی را آهسته می‌کند و وقوع پدیده جدایش حتمی می‌شود. بطور کلی، مولد ورتکس یک مکانیسمی را فراهم می‌کند که موجب می‌شود انرژی بالاتر سیالی 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



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 می‌گردد. 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 جلورندگی، 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 صفر تا 90 درجه زاویه دارد، تعیین کرده‌اند. 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 تشکیل شده 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

1- CrossFlow

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 پیش‌بینی رفتار ساختارها و گردابه‌های تشکیل شده در یک شبیه‌سازی عددی به حجم محاسبات بسیار زیادی نیاز است. همچنین جهت صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی 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 به‌سزایی 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<sup>1</sup> 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 بیضی‌گون کشیده به همراه ویک آن را مورد مطالعه قرار داده‌اند. بررسی دوبعدی ویک با استفاده از یک پراب هفت حفره<sup>2</sup> 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.

جیمز و همکارانش [17] میدان جریان پایین‌دست یک مدل زیردریایی، در اعداد رینولدز (بر اساس طول مدل)  $1/0 \times 10^6$  الی  $67 \times 10^6$  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 ویک‌نگهدارنده روی جریان اطراف بدنه زیردریایی می‌باشد.

لیو و همکارانش [18] بصورت عددی و تجربی گردابه نعل‌اسبی 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 نعل‌اسبی 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 شکل‌گیری و رشد گردابه‌های 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 یا 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 مرئی‌سازی بوسیله روغن استفاده شده است. زمانیکه آزمایش‌های مرئی‌سازی 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<sup>3</sup> 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 تیتانیوم بر

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

صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز این فوم و هم به صورت 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 این فوم، یک جعبه ابزار برای دینامیک سیالات محاسباتی است که به وسیله آن می‌توان مسائل مختلف (جریان‌های تراکم‌ناپذیر، جریان‌های تراکم‌پذیر، جریان‌های چند فازی، واکنش‌های شیمیایی و غیره) را شبیه‌سازی کرد. این نرم‌افزار توسط مجموعه شبیه‌سازی باز<sup>1</sup> تحت مجوز عمومی گنو<sup>2</sup> (GNU) ایجاد شده که به صورت منبع‌باز موجود است. روش حل عددی به کار گرفته شده در این نرم‌افزار برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی روش حجم محدود<sup>3</sup> است [26].

## 2- معادلات اساسی حاکم

معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده برای جریان تراکم‌ناپذیر به صورت زیر بیان می‌شود (رابطه 1) بیان‌کننده قانون پیوستگی و رابطه (2) بیان‌کننده قانون مومنوم است:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_j U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (-\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

در معادلات فوق،  $U_i$  سرعت متوسط در جهت  $i$ ام،  $\rho$  چگالی و  $\overline{u'_i u'_j}$  معرف تنش‌های رینولدزی (رابطه 6) است. معادله مومنوم 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 آشفتنه غیرلزج و همچنین محاسبه تنش‌های رینولدزی از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استفاده شده است. این مدل دو معادله‌ای ویسکوزیته حالت آشفتنه را به صورت رابطه (3) مدل می‌کند:

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

در رابطه (3)، ویسکوزیته حالت آشفتنه 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  $\varepsilon$  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 ( $\varepsilon$ ) به صورت رابطه (5) تعریف می‌گردد:

$$\frac{Dk}{Dt} = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left( \frac{v_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} \quad (4)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left( \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} \quad (5)$$

$$\overline{u'_i u'_j} = v_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (6)$$

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 شده است، 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 هیدرودینامیکی جریان اطراف جسم زیرسطحی انجام نشده است. در واقع، شبیه‌سازی سه بعدی 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 به خود اختصاص می‌دهد و همچنین نیازمند تجهیزات و لوازم آزمایشگاهی مجهز می‌باشد. بیشتر جریان کاربردی روی بدنه زیرسطحی‌ها، جریان‌های انتقالی و جریان‌های آشفتنه است، که در زوایای حمله بالا رفتار این جریان‌ها بسیار پیچیده می‌باشد. شبیه‌سازی عددی جریان اطراف زیرسطحی به نوع شبکه و مدل آشفتنه مناسب وابسته است. سارکر و همکارانش در سال 1997 شبیه‌سازی عددی خود را به صورت دوبعدی و با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  روی اجسام زیرسطحی مختلف در زاویه حمله صفر درجه انجام دادند [21]. آلبین و همکارانش در سال 2005 مدل‌های 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 شده است. یگدش و همکارانش در سال 2009 به صورت 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. یگدش 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 به صورت 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 به-

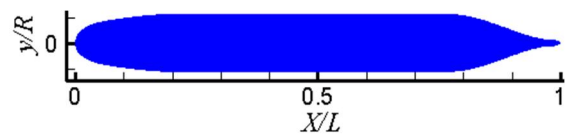
1- OpenCFD Ltd  
2- General Public Licence  
3- Finite Volume

### 3- تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش

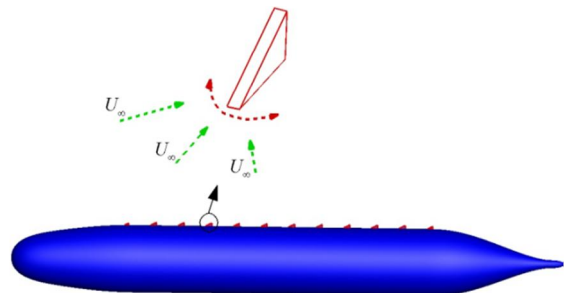
#### 3-1- مدل

مدل زیر سطحی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، یک مدل زیرسطحی تقارن محوری استاندارد به نام سابوف<sup>1</sup> است. این مدل اولین بار توسط پژوهشگر 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  $\pm 0/1$  mm 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 جریان ورودی به مدل تغییر کرده و جهت را به سمت جریان ورودی به مدل می‌کند. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است مولد ورتکس هوشمند همواره جهت خود را با جهت جریان برخوردی به مدل تنظیم می‌نماید.



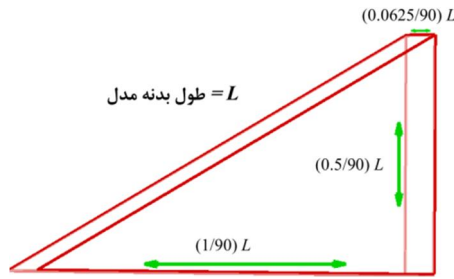
شکل 3 پروفیل شکل مدل زیرسطحی سابوف به صورت بدون بعد



شکل 4 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  $0/0625/90$  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.



شکل 5 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. آزمایش‌های مرئی‌سازی 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  $350 \times 350$  mm<sup>2</sup> 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 [30, 31]. تمامی اندازه‌گیری‌ها در یک سرعت و در زوایای حمله مختلف  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  درجه انجام شده است.

#### 4- بررسی و تحلیل نتایج

##### 4-1- شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار این 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 این فوم استفاده شده است. در این تحقیق از حلگر سیمپل فوم<sup>2</sup> استفاده شده که این حلگر برای جریان دائمی و

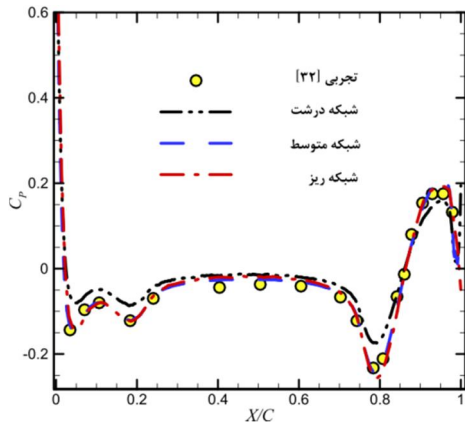


شکل 6 نحوه قرار گیری مدل زیرسطحی در اتاق آزمون تونل باد برای انجام آزمایش‌های مرئی‌سازی با روغن

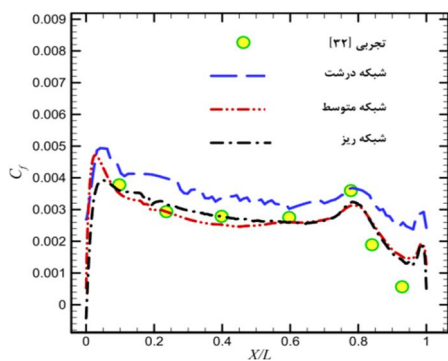
2- simpleFoam

1- Suboff





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

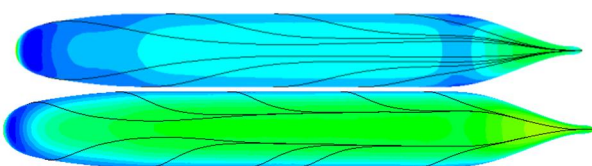


شکل 9 مقایسه تغییرات ضریب فشار روی بدنه زیرسطحی سابوف با نتایج تجربی موجود در رینولدز 14 میلیون

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 (شبكة درشت)	0/0904	4/87%
حل حاضر (شبكة متوسط)	0/0894	3/71%
حل حاضر (شبكة 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.



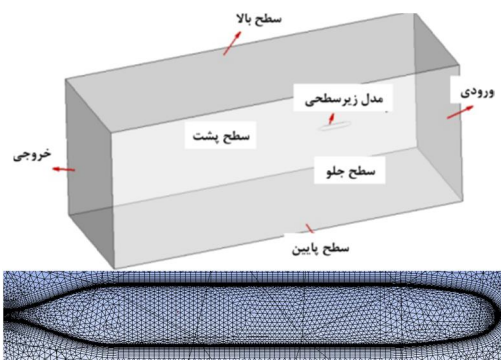
شکل 10 خطوط تنش برشی بر روی بدنه زیرسطحی سابوف در زوایای حمله مختلف (زاویه حمله 15 درجه (بالا) و زاویه حمله 30 درجه (پایین))

غیرقابل تراکم آشفته کاربرد دارد. روش حل عددی مورد استفاده در حلگر سیمیل فوم با تکیه بر الگوریتم پیرو<sup>1</sup> 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 آلمان)، متوسط (1562902 آلمان) 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 این فوم با نتایج تجربی موجود بسیار مشابه بوده و با نتایج موجود تطابقت 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 مدل را نشان می‌دهد. نتایج شکل‌های بالا نشان می‌دهند که نتایج حاصل از نرم افزار این 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.



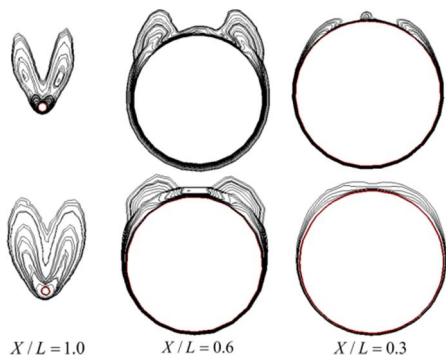
شکل 7 دامنه حل (بالا) و نحوه شبکه‌بندی مدل زیرسطحی سابوف (پایین)

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

#### 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.

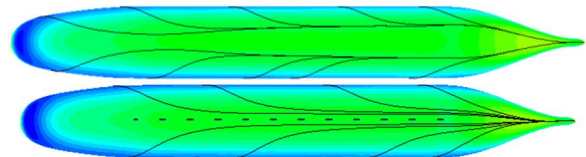


شکل 13 گردابه‌های ایجاد شده و همچنین اندازه بزرگی گردابه‌ها بر روی بدنه زیرسطحی سابوف در مقاطع مختلف و در زاویه حمله 30 درجه (بدون مولد ورتکس (بالا) و با مولد ورتکس (پایین)).

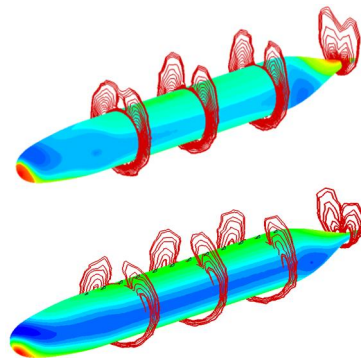
جدول 2 مقایسه مقدار ضریب پسا برای مدل با مولد ورتکس و بدون مولد ورتکس با نتایج تجربی موجود [33]

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

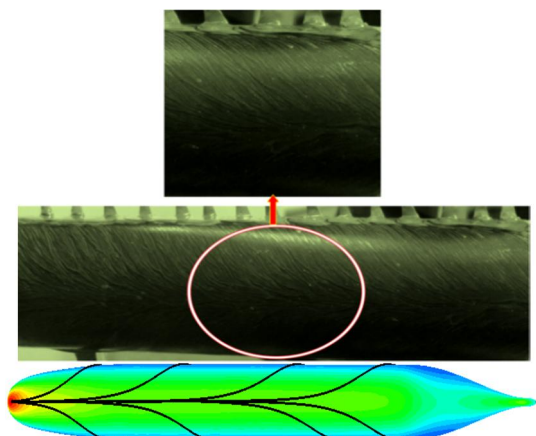
شکل 12 نیز گردابه‌های اطراف مدل زیرسطحی را در زاویه حمله 30 درجه و رینولدز چهارده میلیون را برای دو حالت مختلف با مولد ورتکس و بدون مولد ورتکس را نشان می‌دهد. همان‌طور که در بالا اشاره شد، مولدهای ورتکس با انرژی دهی به لایه مرزی از رشد گردابه‌ها جلوگیری می‌کند. در واقع انرژی دهی به لایه مرزی موجب خورد 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))

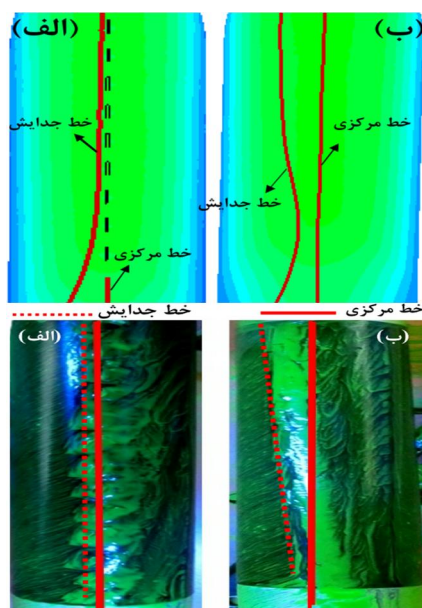


شکل 12 گردابه‌های ایجاد شده بر روی بدنه زیرسطحی سابوف در مقاطع مختلف و در زاویه حمله 30 درجه (بدون مولد ورتکس (بالا) و با مولد ورتکس (پایین))



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 ورتیسیتته‌های 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 ورتیسیتته‌های 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 جریان بر روی مدل زیرسطحی سابوف برای دو حالت بدنه با مولد ورتکس (الف) و بدنه لخت (بدون مولد ورتکس) (ب) در زاویه حمله 30 درجه.

وقتی که وسایل 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 کاملاً 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 موافق 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 به صورت 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 الگور 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



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 می-گیرد.

(3) در زوایای حمله  $10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ ، 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 ( $\rho U L \mu^{-1}$ )
$U$	سرعت سیال (m/s)
$X$	فاصله از نوک دماغه در امتداد بدنه مدل (m)
$C_p$	ضریب فشار
$C_f$	ضریب اصطحاک

#### علائم یونانی

$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\alpha$	زاویه حمله (درجه)
$\theta$	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 Anelle, France, 61-69, 2003.
- [2] D.M., Bushnell, 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

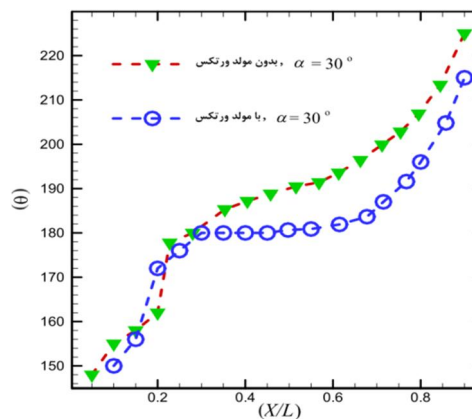
در شکل 16 نحوه تغییرات مکان جدایش اولیه روی سطح مدل زیرسطحی سابوف در دو حالت متفاوت با مولد ورتکس و بدون مولد ورتکس نشان داده شده است. در این منحنی محور افقی ( $X/L$ ) فاصله بدون بعد از ابتدای دماغه مدل در امتداد مدل بوده و محور عمودی نشان دهنده موقعیت زاویه جانبی روی بدنه مدل می‌باشد که ( $\theta$ ) می‌داند 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  $\theta$  افزایش می-یابند). همچنین شکل 9 به خوبی 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  $0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$  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  $10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  با حرکت از دماغه مدل به سمت 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.

- [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  $k-\epsilon$  Turbulence Model in Flow Simulation over Underwater 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 and M.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 Investigation 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 (NSWCDD), 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.
- 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 Agency 1992(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 Symposium*, 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 Submarine 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 Investigation of the Vortex Structure on a Submersible 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.