

# بررسی عددی و تجربی رفتار هیدرودینامیکی گردابه نعل اسبی اطراف برجک

مجتبی دهقان منشادی<sup>۱\*</sup>، کاظم هجرانفر<sup>۲</sup>، امیر حمزه فرج‌الهی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ mdmanshadi@alum.sharif.edu

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف؛ khejranfar@sharif.edu

<sup>۳</sup> دانشجوی دکترا، مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ a\_h\_farajollahi@alum.sharif.edu

## چکیده

## اطلاعات مقاله

گردابه نعل اسبی در اطراف تلاقی برجک-بدنه زیردریایی ایجاد شده و تاثیر مهمی در یکنواختی جریان و یک پروانه زیردریایی دارد، و نمی‌توان اثر گردابه نعل اسبی را روی عملکرد هیدرودینامیکی زیردریایی نادیده گرفت. گردابه نعل اسبی نویز هیدرودینامیکی زیردریایی را افزایش می‌دهد و باعث غیر-یکنواختی جریان پروانه می‌شود. 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 این‌فوم، میدان جریان در اطراف یک مدل زیرسطحی استاندارد با استفاده از مولدهای ورتکس در زوایای حمله  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  بررسی شده‌است. استفاده از روش آزمایشگاهی در تونل باد و شبیه‌سازی عددی در مطالعه حاضر به بررسی فیزیک اثر مولدهای ورتکس روی ساختار گردابه‌های تشکیل شده در اطراف زیرسطحی کمک نمود. در این مطالعه، نتایج حاصل نشان می‌دهند که استفاده از مولدهای ورتکس باعث کاهش قدرت گردابه نعل اسبی، خط جدایش، اندازه ابعاد گردابه‌های عرضی و نیروی پسا می‌شود.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۷

کلمات کلیدی:

جسم زیرسطحی

مولد ورتکس

مرئی‌سازی جریان

این‌فوم

## Numerical and Experimental Investigation of Hydrodynamic Behavior of a Horseshoe Vortex around sail

Mojtaba Dehghan Manshadi<sup>1\*</sup>, Kazem Hejranfar<sup>2</sup>, Amir Hamzeh Farajollahi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Malek Ashtar University of Technology; mdmanshadi@alum.sharif.edu

<sup>2</sup> Prof., Aero. Eng., Sharif University of Technology; khejranfar@sharif.edu

<sup>3</sup> Ph.D Student, Aero. Eng., Malek Ashtar University of Technology; a\_h\_farajollahi@alum.sharif.edu

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received: 15 Feb. 2016

Accepted: 27 Nov. 2016

#### Keywords:

Submarine model

Vortex Generator

Flow Visualization

OpenFOAM

### ABSTRACT

The horseshoe vortex generated around the sail-body junction of a submarine has an important influence on the uniformity of the submarine wake at the propeller and hydrodynamic noise. The influence of the horseshoe vortex on the submarine performance is not negligible. 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 standard underwater model employing the vortex generator by using the oil flow visualization method and CFD method (OpenFOAM code) in  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  angles of attack. In this study, the application of experimental method in wind tunnel and CFD simulation which can help us to precisely study the structure of vortical flow field. The results show that Vortex Generators placed along the submarine do indeed significantly reduce strength of the horseshoe vortex, line separation, size of cross-flow vortices and drag force.

رفته و در قسمت انتهایی پاشنه زیردریایی وارد جریان پروانه شده و آشفتگی‌هایی در جریان پروانه ایجاد می‌کند.

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 [۲]. یک روش مرسوم جهت کاهش جدایش جریان استفاده از مولد ورتکس است. مفهوم مولدهای ورتکس در ابتدا توسط تیلور در سال ۱۹۴۷ بیان شد [۴]. او نشان داد که ورتیسیت‌های ایجاد شده در انتهای جریان توسط ردیفی از پلیت‌های کوچک، مومنتوم را در راستای جریان افزایش می‌دهند و بنابراین باعث تاخیر در پدیده جدایش می‌شوند.

پیرسی در سال ۱۹۶۱ مقاله کاملی را در زمینه تئوری استفاده از مولدهای ورتکس در جریان دوبعد ارائه نمود [۵]. بر اساس مطالعه پیرسی، اصطکاک لزجی و گرادیان فشار معکوس لایه مرزی را آهسته می‌کند و وقوع پدیده جدایش حتمی می‌شود. به طور 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 انرژی‌دهی لایه مرزی می‌شود که این امر سبب تاخیر 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 [۶]. 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 [۷].

سعیدی‌نژاد و همکاران مجموعه‌ای از آزمایش‌های مرئی سازی بر روی مدل زیرسطحی سابوف در زوایای حمله مختلف در یک تونل باد مادون صوت انجام داد [۸]. آنها برای بررسی فیزیک جریان آزمایشات مرئی سازی با 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 آزمایشات مرئی سازی با دود 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 اثر مولدهای ورتکس را روی جریان عرضی به صورت تجربی در تونل آب مورد مطالعه و بررسی قرار دادند [۶]. آنها برای کاهش جریان عرضی از یک سری مولد به شکل بال دلتا استفاده نمودند. در این آزمایش‌ها از تکنیک مرئی‌سازی بوسیله

افت انرژی زیاد در جریان سیال و ایجاد سر و صدا می‌تواند دلیلی بر وجود اصطکاک حاصل از آشفتگی باشد. جدایش لایه مرزی منجر به افزایش پسای فشاری روی سطح می‌شود، که این فشار تقریباً همان فشار کل را در بر می‌گیرد و باعث افزایش سر و صدا می‌شود. برای جلوگیری از جدایش لایه مرزی، محققان همواره در حال مطالعه و بررسی روش‌های موثر جهت کنترل آن هستند [۱]. کنترل لایه مرزی جریان می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد، از جمله این دلایل می‌توان به دستیابی به افزایش برآ، کاهش پسا، تاخیر و یا بهبود انتقال لایه مرزی از آرام به آشفتگی، جلوگیری و یا تاخیر در پدیده واماندگی، افزایش یا کاهش آشفتگی روی جسم اشاره نمود [۱]. به همین دلیل، تحقیقات و مطالعات زیادی در زمینه کاهش پسا در محیط‌های علمی و صنعتی صورت گرفته است. یکی از اجسامی که در زمینه کاهش پسای آن، مورد توجه بسیاری از محققین بوده، اجسام تقارن محوری هستند. هنگامی یک جسم تقارن محوری نسبت به جریان سیال زاویه می‌گیرد، لایه مرزی در سمت مخالف باد از روی بدنه جدا شده و یک میدان جریان سه بعدی گردابه‌ای در اطراف جسم ایجاد می‌شود. این جریان‌های گردابه‌ای یا حلقوی، بر جنبه‌های مختلف عملکردی زیردریایی اثر گذار بوده که در بیشتر موارد نامطلوب هستند [۲].

زیردریایی یک وسیله نقلیه زیر آبی است که شامل یک بدنه اصلی و متعلقات مختلفی می‌باشد. میدان جریان در اطراف بدنه اصلی آن در زاویه صفر تقریباً بدون جدایش و ایجاد گردابه می‌باشد. اما وقتی سایر قسمت‌های جانبی بر روی بدنه آن نصب می‌شوند، شکل خطوط جریان بسیار تحت تاثیر شکل بدنه قرار گرفته و میدان جریان پیچیده‌ای در اطراف آن ایجاد می‌شود. از جمله این گردابه‌ها، گردابه نعل اسبی<sup>۱</sup> است که در محل اتصال برجک<sup>۲</sup> به بدنه زیردریایی بوجود می‌آید. برجک زیردریایی دارای شکل ایرفویل گونه است که مکانی برای ورود و خروج خدمه زیردریایی و محلی برای قرارگیری برخی از تجهیزات کنترلی و مخابراتی در زیردریایی فراهم می‌سازد. برجک از نظر هیدرودینامیکی تاثیر بسزایی در تعادل و پایداری زیردریایی دارد [۳]. حضور برجک در مقابل جریان باعث ایجاد گرادیان فشار مخالف می‌شود. در این حالت، در لایه مرزی روی بدنه در بالادست برجک، گردابه عرضی تشکیل می‌شود. این گردابه جهت حرکت به جلو مجبور به چرخش و دور زدن برجک می‌شود. در نتیجه گردابه‌ای موسوم به گردابه نعل اسبی در دو طرف برجک تشکیل می‌شود که در امتداد طول زیردریایی تا منطقه پاشنه و پروانه ادامه می‌یابد. اضافه شدن برجک به بدنه یک زیردریایی، با ایجاد گرادیان فشار و افزایش سطح خیس، باعث افزایش درگ شده و مقداری از انرژی هم صرف تولید گردابه خواهد شد. این گردابه بعد از تشکیل به سمت پایین دست برجک پیش

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. آلین و همکاران در سال ۲۰۱۰ به شبیه‌سازی عددی رفتار جریان اطراف مدل زیرسطحی با استفاده از روش‌های ال ای اس<sup>۳</sup> و دی ای اس<sup>۴</sup> پرداختند [۱۰]. در واقع آنها عملکرد و کارایی ال ای اس و دی ای اس 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 ۲۰۱۱ به صورت عددی جریان اطراف زیرسطحی سابوف را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند [۱۱]. آنها در این مطالعه از مدل‌های آشفته  $k - \epsilon$  استاندارد و  $k - \epsilon$  غیرخطی را در زوایای حمله بالا استفاده نمودند. نتایج شبیه‌سازی آنها با استفاده از مدل آشفته غیر-خطی  $k - \epsilon$  و مدل استاندارد  $k - \epsilon$  به خوبی با نتایج تجربی و عددی موجود هم‌خوانی داشت [۱۱].

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 است. در این تحقیق، هم به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز اپن‌فوم<sup>۵</sup> 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 می‌گیرد. نرم‌افزار متن‌باز اپن‌فوم، یک جعبه ابزار برای دینامیک سیالات محاسباتی است که به وسیله آن می‌توان مسائل مختلف (جریان‌های تراکم‌ناپذیر، جریان‌های تراکم‌پذیر، جریان‌های چند فاز، واکنش‌های شیمیایی و غیره) را شبیه‌سازی کرد. این نرم‌افزار توسط مجموعه شبیه‌سازی باز<sup>۶</sup> تحت مجوز عمومی گنو<sup>۷</sup> 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>۸</sup> است [۱۲].

## ۲- معادلات اساسی حاکم

معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده برای جریان تراکم‌ناپذیر به صورت زیر بیان می‌شود:

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

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

روغن استفاده شده است. مطالعه مرئی‌سازی نشان داد، هنگامی که مولدهای ورتکس روی سطح بدنه مدل زیرسطحی نصب شده بود، جدایش اولیه تا حد زیادی کاهش یافت. همچنین نتایج آنها نشان داد که در کنترل جدایش جریان، بدنه مدل زیرسطحی که مولدهای ورتکس روی آن نصب است بسیار موثرتر از حالتی است که مدل بدون مولد ورتکس باشد. منشادی و همکاران اثر مولدهای ورتکس را روی بدنه لخت و بدون ملحقات یک جسم تقارن محوری به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند [۹]. آنها برای بررسی فیزیک جریان روی بدنه با حضور مولدهای ورتکس آزمایشات مرئی‌سازی بوسیله روغن و رنگدانه را انجام دادند. همچنین، آنها برای بررسی سه‌بعدی اثر مولدهای ورتکس روی بدنه از نرم‌افزار متن‌باز اپن‌فوم استفاده نمودند. نتایج تجربی و عددی آنها نشان داد که مولدهای ورتکس بطور قابل توجهی قدرت گردابه عرضی و نیروی درگ را کاهش می‌دهد.

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

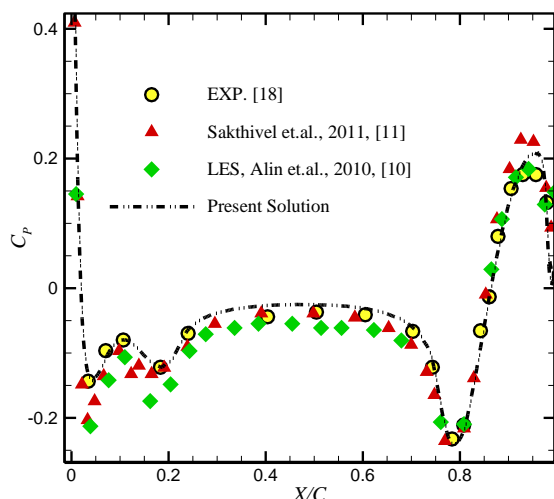
یکی دیگر از روش‌هایی که در این تحقیق از آن استفاده شده است، شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی جریان اطراف مدل زیرسطحی است. در زمینه شبیه‌سازی عددی رفتار جریان اطراف مدل زیرسطحی مطالعات بسیاری صورت گرفته ولی تا کنون هیچ‌گونه مطالعه عددی در زمینه اثر استفاده از مولدهای ورتکس روی رفتار هیدرودینامیکی جریان اطراف جسم زیرسطحی انجام نشده است. 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 آزمایشات 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



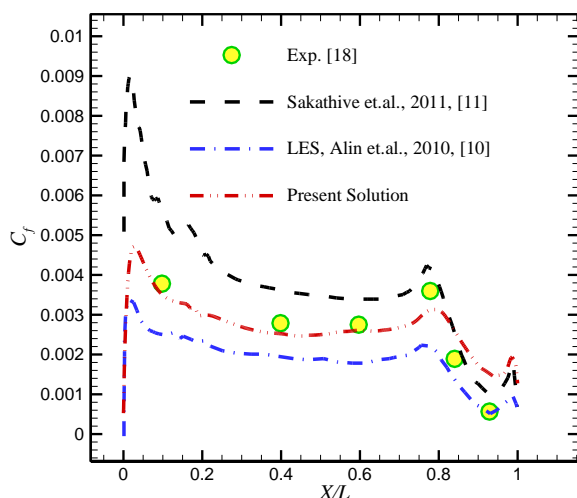
عددی جریان اطراف زیرسطحی در رینولدز و زوایای حمله مختلف می‌باشد. همچنین در شکل ۳ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بدنه حول بدنه مدل را نشان می‌دهد. نتایج شکل‌های بالا نشان می‌دهند که نتایج حاصل از نرم‌افزار اپن‌فوم (تغییرات ضریب فشار، ضریب اصطکاک سطح) با نتایج عددی [۱۰ و ۱۱] و نتایج تجربی [۱۸] موجود تطابق خوبی داشته و حتی در برخی از نواحی نتایج حل حاضر از هم‌خوانی بهتری برای نتایج تجربی موجود نسبت به نتایج عددی مراجع مختلف از خود نشان می‌دهد نرم‌افزار موجود در شبیه‌سازی عددی جریان اطراف زیرسطحی بسیار مناسب بوده و از دقت خوبی برخوردار است.

جدول ۱: مقایسه مقدار ضریب پسا برای مدل زیرسطحی سابوف در زاویه حمله صفر درجه با نتایج تجربی موجود [۲۶]

ضریب پسا	صفر درجه	درصد خطا
حل حاضر (بدون مولد ورتکس)	۰/۰۸۹۴	۳/۷۱٪
حل حاضر (با مولد ورتکس)	۰/۰۹۱۵	
تجربی [۱۸]	۰/۰۸۶۲	



شکل ۲: مقایسه تغییرات ضریب فشار روی بدنه زیرسطحی سابوف با نتایج موجود در رینولدز ۱۴ میلیون.



شکل ۳: مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک روی بدنه زیرسطحی سابوف با نتایج موجود در رینولدز ۱۴ میلیون.

فلورسنت از لامپ‌های مهتابی با رنگ آبی برای نورپردازی استفاده شده است. آزمایش‌های مرئی سازی با روغن در یک تونل باد مادون صوت از نوع مدار باز با اتاق آزمون بسته انجام شده است. اتاق آزمون این تونل باد دارای ابعاد  $350 \times 350 \text{ mm}^2$  و با طول  $700 \text{ mm}$  است. دیوارهای جانبی این تونل شفاف بوده و قابلیت عکس-برداری از مدل بعد از انجام آزمایش‌ها وجود دارد. تمام آزمایش‌ها در سرعت جریان آزاد  $5 \text{ m/s}$  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 تاثیر دیواره‌ها تونل باد بر روی ساختارهای جریان اطراف مدل می‌توان صرف نظر کرد [۱۶ و ۱۷]. تمامی اندازه‌گیری‌ها در یک سرعت و در زوایای مختلف  $0 \leq \alpha \leq 30^\circ$  درجه انجام شده است.

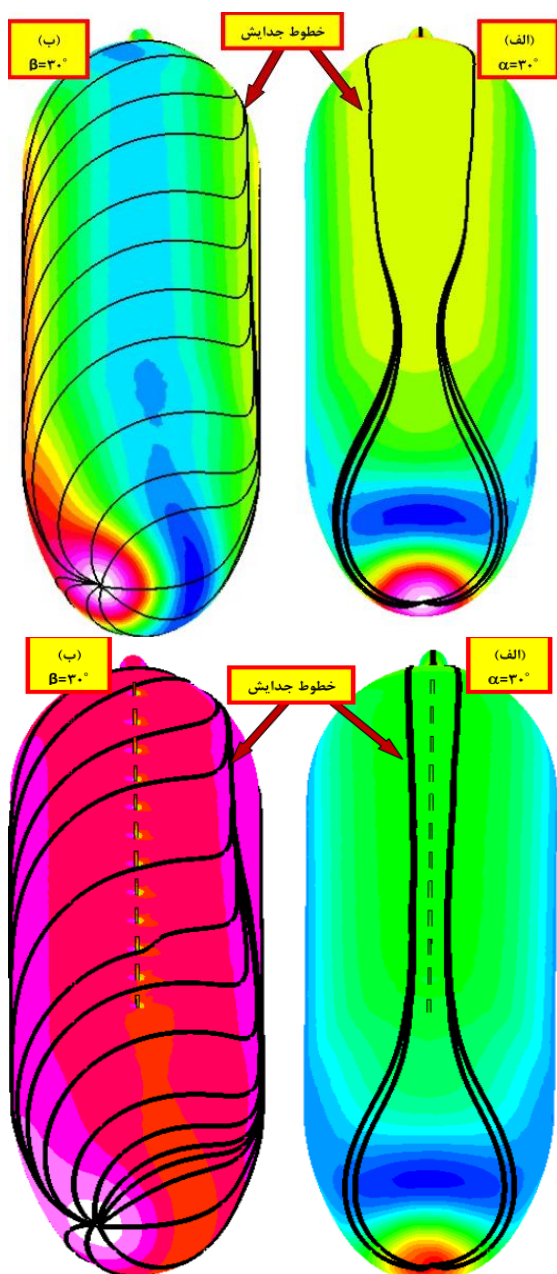
#### ۴- بررسی و تحلیل نتایج

##### ۴-۱- شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار اپن‌فوم

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 اپن‌فوم استفاده شده است. در این تحقیق از حلگر سسیمپل فوم<sup>۹</sup> استفاده شده که این حلگر برای جریان دائمی و غیرقابل تراکم آشفته کاربرد دارد. روش حل عددی مورد استفاده در حلگر با تکیه بر الگوریتم پیزو<sup>۱۰</sup> می‌باشد. در واقع به علت هزینه‌های انجام تست-های 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 اصطکاک 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.

##### ۴-۱-۱- نتایج برای بدنه بدون برجک

همان‌طور که در شکل‌های (۲) و (۳) و همچنین جدول ۱ مشاهده می‌شود نتایج مطالعه حاضر به نتایج تجربی موجود بسیار شبیه بوده و دارای درصد خطای کمتری در اندازه‌گیری مقدار ضریب پسا می‌باشد. علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، در شکل ۲ تغییرات ضریب فشار روی سطح بدنه زیرسطحی سابوف در رینولدز ۱۴ میلیون نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل نمایان است نتایج حاصل از نرم‌افزار اپن‌فوم با نتایج عددی و به‌خصوص نتایج تجربی موجود بسیار مشابه بوده و با نتایج موجود مطابقت دارد. بررسی شکل‌های بالا نشان می‌دهد که نتایج حاصل از نرم‌افزار موجود نسبت به نتایج عددی دیگر بیشتر به نتایج تجربی تطابق داشته که نشان دهنده دقت و صحت نرم‌افزار موجود در شبیه‌سازی

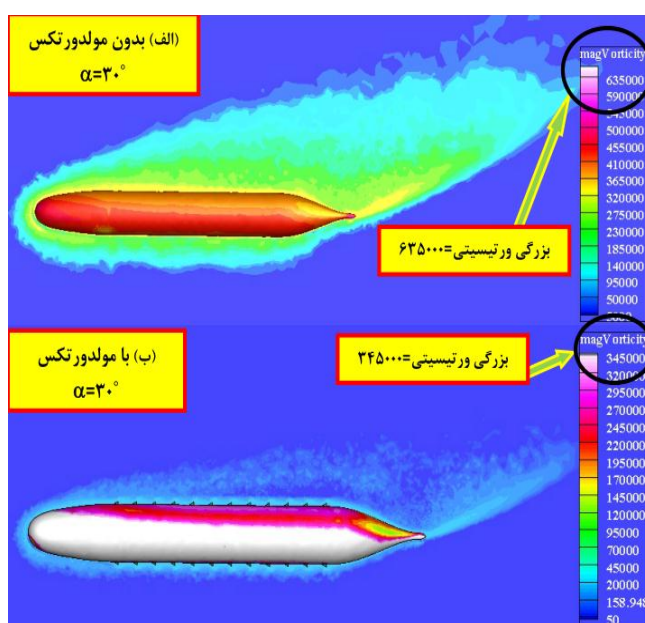


شکل ۵: خطوط تنش برشی بر روی بدنه زیرسطحی سابوف در زاویه حمله ۳۰ درجه (بدون مولد ورتکس (بالا) و با مولد ورتکس (پایین)).

#### ۴-۱-۲. نتایج برای بدنه با برجک

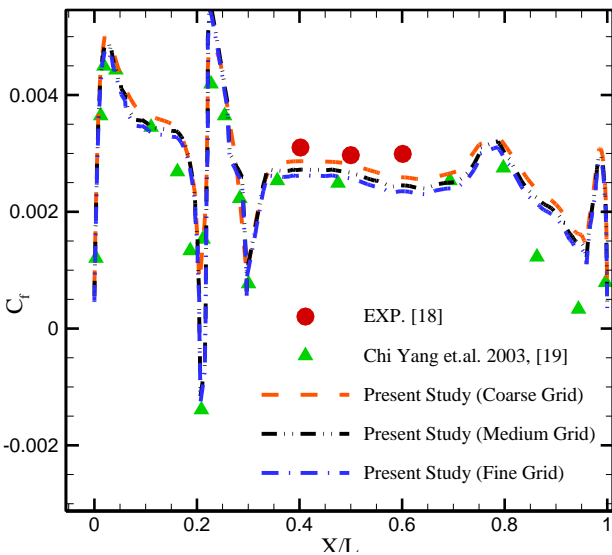
جهت بررسی استقلال حل از شبکه برای مدل با برجک، در این تحقیق از سه نوع شبه‌بندی درشت (۵۱۷۰۰۰ المان)، متوسط (۱۴۸۹۰۰۰ المان) و ریز (۲۰۵۰۰۰۰ المان) استفاده شده است (شکل ۶). همان‌طور که شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود نتایج حاصل از شبکه متوسط و ریز به نتایج تجربی و عددی موجود بسیار شبیه بوده و دارای انحراف کمتری نسبت به شبکه درشت هستند. در این تحقیق، برای شبیه‌سازی جریان هیدرودینامیکی اطراف مدل زیرسطحی سابوف با برجک از شبه متوسط استفاده شده است. زیرا نتایج آن با نتایج تجربی و عددی معتبر موجود تطابقت خوبی داشته و درصد خطای کمی را دارد و همچنین دارای زمان اجرای کمتری نسبت به شبکه ریز بوده و موجب صرفه‌جویی

شکل ۴ مقایسه جریان گردابه‌ای اطراف بدنه مدل زیرسطحی سابوف برای دو حالت مختلف (مدل بدون مولد ورتکس (بالا) و مدل با مولد ورتکس (پایین)) در زاویه حمله ۳۰ درجه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مشاهده می‌گردد که استفاده از مولد ورتکس سبب کاهش قدرت ورتیسسته (قدرت ورتیسسته برای مدل بدون مولد ورتکس برابر با ۶۳۵۰۰۰ و برای مدل با مولد ورتکس برابر با ۳۴۵۰۰۰ می‌باشد) و جریان گردابه‌ای در اطراف مدل می‌شود و همچنین از رشد جریان گردابه‌ای و در نتیجه جدایش بیشتر جریان اطراف مدل جلوگیری می‌کند. در واقع، استفاده از مولد ورتکس موجب می‌گردد که جریان آرامتری به سمت پایین دست مدل یا قسمت پاشنه مدل که محل قرارگیری پروانه است، روانه گردد.



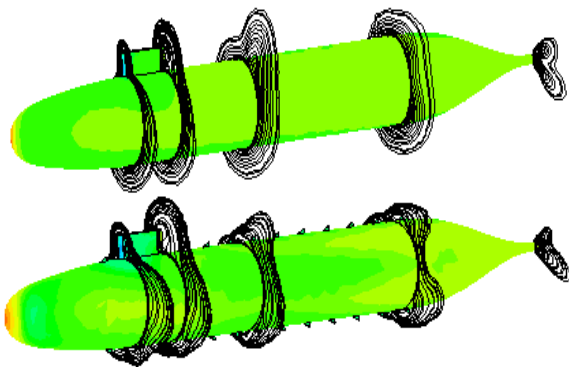
شکل ۴: مقایسه جریان گردابه‌ای و ورتیسسته اطراف بدنه زیرسطحی سابوف در زاویه حمله ۳۰ درجه (بدون مولد ورتکس (بالا) و با مولد ورتکس (پایین)).

شکل ۵ 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 ۳۰ 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 ۸: مقایسه تغییرات ضریب اصطحاک روی بدنه زیرسطحی سابوف با نتایج موجود در رینولدز ۱۴ میلیون.

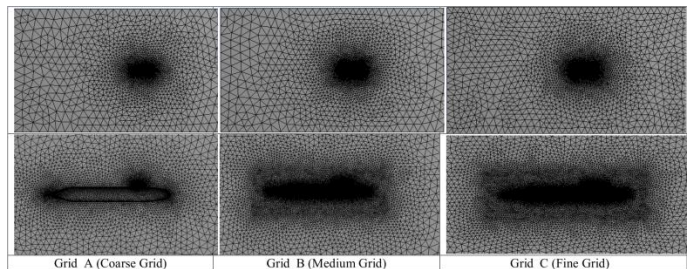
شکل ۹ نیز گردابه‌های اطراف مدل زیرسطحی را در زاویه حمله ۳۰ درجه و رینولدز چهارده میلیون را برای دو حالت مختلف با مولد ورتکس و بدون مولد ورتکس را نشان می‌دهد. همان‌طور که در بالا اشاره شد، مولدهای ورتکس با انرژی دهی به لایه مرزی از رشد گردابه‌ها جلوگیری می‌کند. در واقع انرژی دهی به لایه مرزی موجب خورد 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.



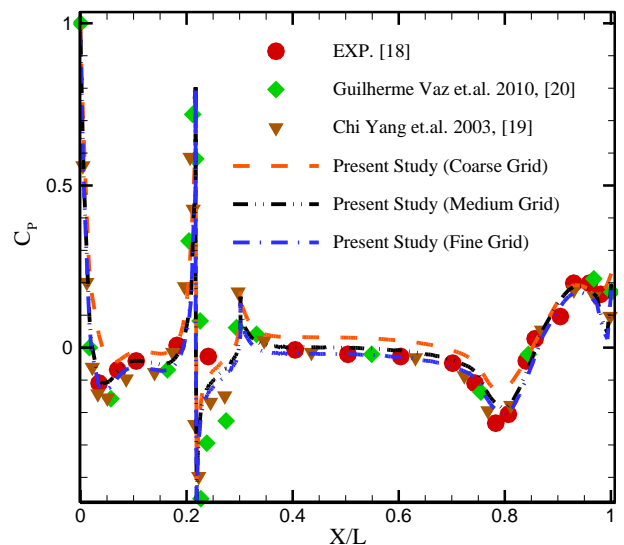
شکل ۹: کانتور فشار روی سطح مدل و گردابه‌های ایجاد شده بر روی بدنه زیرسطحی سابوف در مقاطع مختلف و در زاویه حمله ۳۰ درجه (بدون مولد ورتکس (بالا) و با مولد ورتکس (پایین)).

شکل ۱۰ خطوط جریان اطراف مدل زیرسطحی برای دو حالت بدنه با مولد ورتکس و بدنه بدون مولد ورتکس را در زاویه حمله ۳۰ درجه نشان می‌دهد. با توجه به خطوط جریان و همچنین جریان گردابه‌ای و چرخشی در جریان عرضی حول بدنه زیرسطحی مشاهده می‌شود که نصب مولد ورتکس روی بدنه زیرسطحی باعث کاهش اندازه چرخش و همچنین موجب کاهش جریان گردابه‌ای و در نتیجه کاهش گردابه نعل اسبی در اطراف بدنه زیرسطحی می‌شود. یعنی در واقع حضور مولد ورتکس موجب کاهش و یا حتی

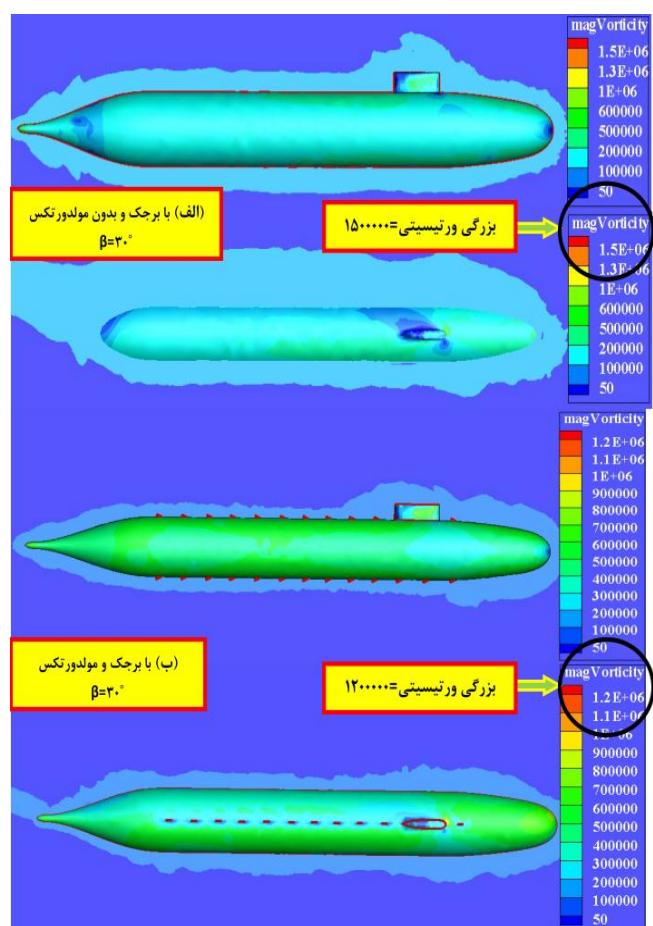
در زمان و هزینه محاسباتی می‌شود. علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، در شکل ۷ تغییرات ضریب فشار روی سطح بدنه زیرسطحی سابوف با برجک نصب شده روی آن در رینولدز ۱۴ میلیون نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل نمایان است شیب تند در مقطع  $X/L \approx 0.2$  به وجود آمده، ناشی از حضور برجک بر روی بدنه می‌باشد. همانند نتایج ذکر شده در بالا، نتایج حاصل از نرم‌افزار این فوم با نتایج عددی و نتایج تجربی موجود بسیار مشابه بوده و با نتایج موجود مطابقت دارد. بررسی شکل‌های بالا نشان می‌دهد که نتایج حاصل از نرم‌افزار موجود نشان دهنده دقت و صحت نرم‌افزار موجود در شبیه‌سازی عددی جریان اطراف زیرسطحی در رینولدز و زوایای حمله مختلف می‌باشد. همچنین در شکل ۸ نمودار تغییرات ضریب اصطحاک بدنه حول بدنه مدل را نشان می‌دهد. نتایج شکل‌های بالا نشان می‌دهند که نتایج حاصل از نرم‌افزار این فوم (تغییرات ضریب فشار، ضریب اصطحاک سطح) با نتایج عددی [۱۹ و ۲۰] و نتایج تجربی [۱۸] موجود تطابق خوبی داشته و نرم‌افزار موجود در شبیه‌سازی عددی جریان اطراف زیرسطحی بسیار مناسب بوده و از دقت خوبی برخوردار است.



شکل ۶: نمای دور و نزدیکی از سه شبکه‌بندی محاسباتی مورد استفاده در این تحقیق (شبکه‌بندی درشت، متوسط و ریز)



شکل ۷: مقایسه تغییرات ضریب فشار روی بدنه زیرسطحی سابوف با نتایج موجود در رینولدز ۱۴ میلیون.



شکل ۱۱: مقایسه جریان گردابه‌ای و ورتیسیت‌ها اطراف مدل سابوف در زاویه جانبی ۳۰ درجه (بدون مولد ورتکس (بالا) و با مولد ورتکس (پایین)).

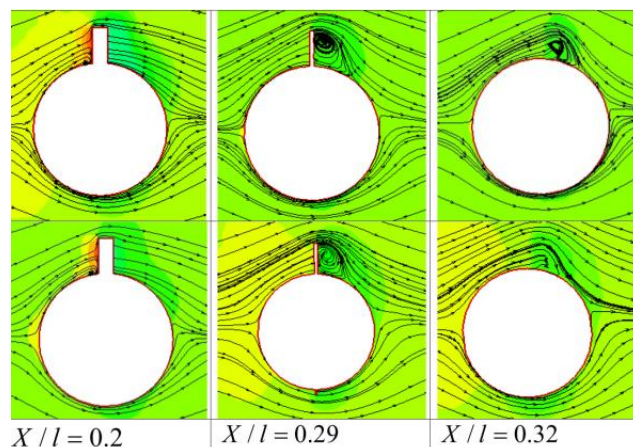
#### ۴-۲. نتایج روش مرئی سازی توسط روغن و رنگدانه

در این تحقیق به منظور بررسی کامل رفتار جریان اثر مولدهای ورتکس در اطراف یک مدل زیرسطحی، از روش مجسم سازی جریان با روغن استفاده شده است. با استفاده از روش آشکار سازی 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 ۳ درصد است.

آزمایش‌های مرئی سازی با روغن و رنگدانه در زوایای حمله ۰ درجه الی ۳۰ 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 ۵ 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 [۲۱] نیز تایید کننده

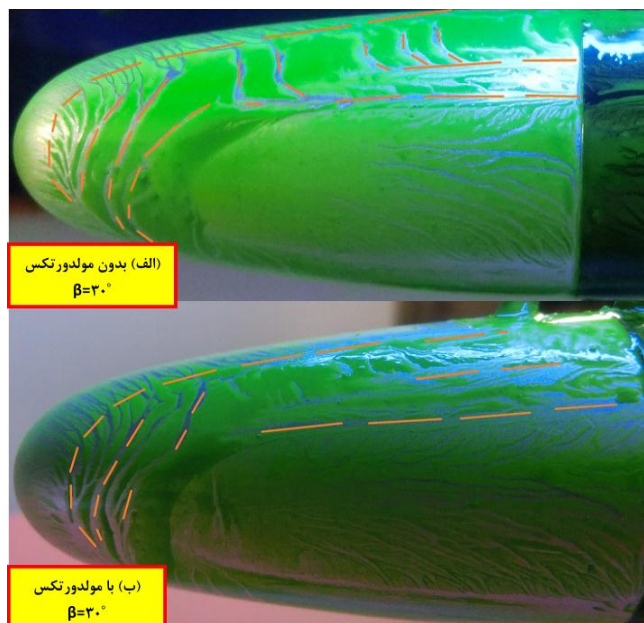
حذف گردابه نعل اسبی در محل اتصال برجک به بدنه زیر سطحی می‌شود.

شکل ۱۱ مقایسه جریان گردابه‌ای اطراف بدنه مدل زیرسطحی سابوف با برجک برای دو حالت مختلف (مدل بدون مولد ورتکس (بالا) و مدل با مولد ورتکس (پایین)) در زاویه حمله ۳۰ درجه و در دو نمای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در بالا اشاره گردید، استفاده از مولد ورتکس سبب کاهش قدرت ورتیسیت‌ها (قدرت ورتیسیت‌ها برای مدل بدون مولد ورتکس برابر با ۱۵۰۰۰۰۰ و برای مدل با مولد ورتکس برابر با ۱۲۰۰۰۰۰ می‌باشد) و جریان گردابه‌ای در اطراف مدل می‌شود و همچنین از رشد جریان گردابه‌ای و در نتیجه جدایش بیشتر جریان اطراف مدل جلوگیری می‌کند. در واقع، مولدهای ورتکس با ترکیب جریان لایه مرزی با جریان بیرون لایه مرزی که انرژی بیشتری را داراست، از جدایش بیشتر لایه مرزی و رشد گردابه‌ها در اطراف مدل جلوگیری می‌کند و در نتیجه جریان آرامتری به سمت پروانه، روانه می‌شود.

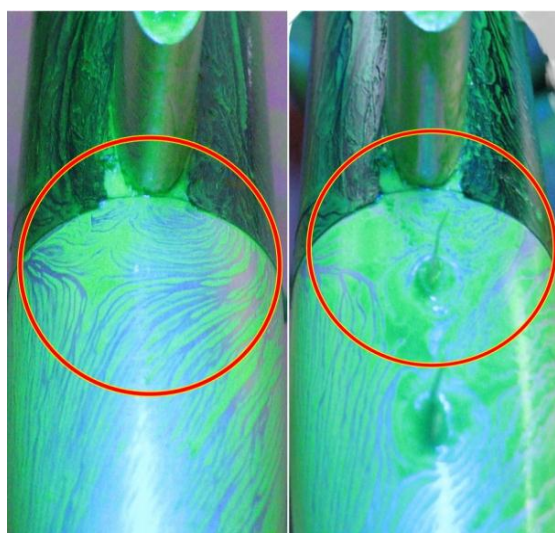


شکل ۱۰: کانتور فشار اطراف مدل در مقاطع مختلف و خطوط جریان در اطراف بدنه زیرسطحی سابوف در مقاطع مختلف در نزدیک محدوده اتصال برجک به بدنه و در زاویه حمله ۳۰ درجه (بدون مولد ورتکس (بالا) و با مولد ورتکس (پایین)).

زیرسطحی می‌شود. در واقع، مولدهای ورتکس با انرژی‌دهی و آشفته کردن جریان لایه مرزی و ایجاد ورتیسسته‌های 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 ۱۲: مقایسه خطوط جدایش جریان بر روی مدل زیرسطحی سابوف برای دو حالت بدنه بدون مولد ورتکس (بالا) و بدنه با مولد ورتکس (پایین) در زاویه حمله ۳۰ درجه.



این مطلب است. در زوایایی بیشتر از ۱۰ 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.

شکل ۱۲ نمای جانبی از ساختار جریان در دماغه بدنه زیردریایی را نشان می‌دهد. مکانی که در آن تجمع روغن وجود داشته باشد، مکان جدایش می‌باشد. همان‌طور که از شکل مشخص است، دماغه مدل بدون مولد ورتکس دارای ناحیه جدایش بزرگتر و بیشتری است. در شکل ۱۲ 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 ۳۰ درجه نشان داده شده است. همان‌طور که در بالا ذکر شد، وجود مولد ورتکس بر روی بدنه زیرسطحی سبب کاهش گردابه نعل اسبی شده است. شکل ۱۳ مقایسه نتایج تست روغن و رنگدانه با نتایج عددی برای دو حالت بدنه با مولد ورتکس و بدنه بدون استفاده از مولد ورتکس را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مشاهده می‌گردد که در قسمت پاشنه مدلی که از مولد استفاده شده است جریان گردابه‌ای تقریباً قدرت کمتری داشته و ناحیه جدایش در اطراف پاشنه کم شده و جریان آرامتری به داخل پروانه حرکت می‌کند. علاوه بر این، همانند شکل ۱۴ نیز در این شکل مشاهده می‌شود که مولدهای ورتکس سبب کاهش و از بین بردن گردابه نعل اسبی شده و در نتیجه خط جدایش در اطراف بدنه را کاهش داده است. با توجه به نتایج عددی و تجربی شکل ۱۴، مشاهده می‌شود که مولدهای ورتکس بکار برده شده بر روی مدل زیرسطحی از رشد لایه مرزی و رشد گردابه‌ها جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، شکل بالا 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 شکل مشاهده می‌شود، لایه‌های مرزی که به سمت نیمه بالایی و 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. با توجه به شکل، خط جدایش برای حالتی که از مولدهای ورتکس استفاده شده است تقریباً نسبت به خط مرکزی نزدیک 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 ورتیسسته‌های کوچکی روی سطح شده که این امر باعث جلوگیری از رشد جریان گردابه‌ای در اطراف

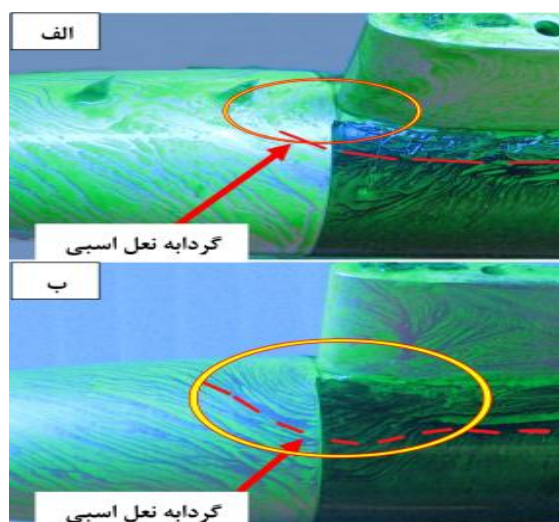
## ۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، به منظور بررسی فیزیک میدان جریان اطراف بدنه یک مدل زیرسطحی استاندارد به صورت تجربی با استفاده از روش مرئی سازی جریان توسط روغن و رنگدانه بر روی سطح مدل در داخل تونل باد و همچنین به صورت شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار این 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:

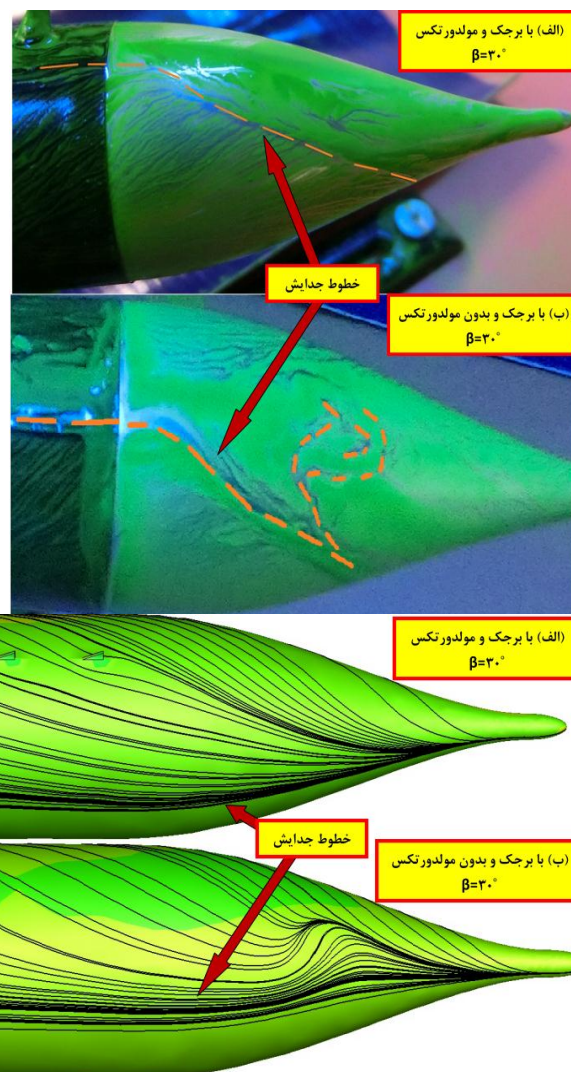
- (۱) در زوایای حمله  $0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$  در قسمت دماغه و میانی بدنه مدل زیرسطحی هیچ جدایش جریانی به چشم نمی‌خورد. اما در قسمت پاشنه مدل به علت شیب منحنی زیاد بدنه، جدایش در زوایای حمله ۵ و ۱۰ درجه رخ می‌دهد.
- (۲) در زوایای حمله  $10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  با حرکت از دماغه مدل به سمت پاشنه آن، مقدار جدایش اولیه در اثر استفاده از مولد ورتکس کاهش می‌یابد، به عبارت 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.
- (۳) در زوایای حمله  $10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ ، مولدهای ورتکس تقریباً بطور کامل جدایش ثانویه را روی سطح مدل حذف کرده‌اند.
- (۴) در تمام زوایای حمله، استفاده از مولد ورتکس باعث کاهش اندازه گردابه روی سطح زیرسطحی شده است.
- (۵) مولدهای ورتکس باعث کاهش پسا و همچنین جریان گردابه‌ای اطراف مدل در زوایای حمله زیاد می‌شوند.
- (۶) حضور برجک بر روی مدل سبب ایجاد گردابه نعل اسبی روی بدنه در محل اتصال برجک به بدنه می‌شود.
- (۷) حضور مولدهای ورتکس سبب کاهش گردابه اطراف برجک یا همان گردابه نعل اسبی می‌شوند.
- (۸) استفاده از مولدهای ورتکس موجب کاهش گردابه‌های عرضی اطراف بدنه مدل می‌شوند.

## کلید واژگان

- 1- Horseshoe Vortex
- 2- Sail
- 3- Large Eddy Simulation
- 4- Detached Eddy Simulation
- 5- OpenFOAM



شکل ۱۳: مکان گردابه نعل اسبی جریان بر روی مدل زیرسطحی سابوف برای دو حالت بدنه با مولد ورتکس (در شکل بالا راست و در شکل پایین الف می‌باشد) و بدنه بدون مولد ورتکس (در شکل بالا چپ و در شکل پایین ب می‌باشد) در زاویه حمله ۳۰ درجه.



شکل ۱۴: مقایسه نتایج عددی و تجربی خط جدایش جریان و خطوط تنش برشی بر روی مدل زیرسطحی سابوف برای دو حالت بدنه با مولد ورتکس (الف) و بدنه بدون مولد ورتکس (ب) در زاویه حمله ۳۰ درجه به همراه کانتور فشار اطراف مدل در نتایج عددی.

12- The open source CFD toolbox, OpenFOAM, [Online] <http://www.openfoam.com>.

13- Groves, N.C., Huang, T.T., and Chang, M.S., (1989), *Geometric Characteristics of DARPA SUBOFF Models (DTRC Model Nos. 5470 And 5471)*, Report DTRC/SHD-1298-01, March.

14- Huang, T., Liu, H.L., Groves, N., Forlini, T., Blanton, J., and Gowing, S., (1992), *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.

15- Roddy, R.F., (1990), *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.

16- Pantelatos, D.K., and Mathioulakis, D.S., (2004), *Experimental Flow Study over a Blunt-Nosed Axisymmetric Body at Incidence*, Journal of Fluids and Structures, Vol. 19, pp. 1103-1115.

17- Kazemi Esfeh., M., Dehghan, A.A., and Dehghan Manshadi, M., (2012), *Experimental Investigation of Upstream Structures Influence on the Ventilation Performance of One-Sided Wind-Catchers*, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, pp. 49-60. (In Persian).

18- Liu, H.L., and Huang, T.T., (1998), *Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data*, Naval Surface Warfare Center Carderock Division (NSWCCD), West Bethesda, MD, report CRDKNSWC/HD-1298-11.

19- Yang, C., and Lohner, R., (2003), *Prediction of Flows over an Axisymmetric Body with Appendages*, The 8th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, September 22-25, 2003, Busan, Korea.

20- Vaz, G., Toxopeus, S., and Holmes, S., (2010), *Calculation of Manoeuvring Forces on Submarines Using Two Viscous-Flow Solvers*, Proceedings of the ASME 2010, 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2010, June 6-11, Shanghai, China.

21- Jimenez, M. Hultmark, M. and Smits, A.J., (2010), *The Intermediate Wake of a Body of Revolution at High Reynolds Numbers*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 659, pp. 516-539.

6- OpenCFD Ltd  
7- General Public License (GNU)  
8- Finite Volume  
9- SimpleFoam  
10- PISO

## ۶- مراجع

1- Juan, S., Fidler, J.E. and Smith, C.A., (1978), *Methods for Prediction Submersible Hydrodynamic Characteristics*, Nielsen Engineering & Research, Inc..

2- Bushnell, D.M., and Donaldson, C.D., (1990), "Control of Submersible Vortex Flows" NASA Technical Memorandum no. 102693.

3- Zhi-hua, L., Ying, X., Zhan-zhi, W., Song, W., (2010), *Numerical Simulation and Experimental Study of the New Method of Horseshoe Vortex Control*, 2010, 22(4):572-581, DOI: 10.1016/s1001-6058(09)60090-1.

4- Taylor, H.D., (1947), *The Elimination of Diffuser Separation by Vortex Generators*, United Aircraft Corporation, Report No. R-4012-3.

5- Pearcey, H.H., (1961), *Shock-Induced Separation and its Prevention by Design and Boundary Layer Control. Boundary Layer and Flow Control, Its Principal and Applications*, Vol. 2, edited by G.V. Lachman, Pergamon Press, Oxford, England, pp. 1166-1344.

6- Wetzel, T.G., and Simpson, R.L., (1992(a)) *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.

7- Barlow, J. B., Rae, W.H., and Pope, A., (1999), *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, Third Ed., John Wiley and Sons, pp. 627-630.

8- Saeidi Nezhad, A., Dehghan, A.A., Dehghan Manshadi, M., and Kazemi Esfeh, M., (2012), *Experimental Investigation of the Vortex Structure on a Submersible Model*, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, pp. 98-109. (In Persian)

9- Dehghan Manshadi, M., Hejranfar, k., and Farajollahi, A.H., (2015), *Numerical and Experimental Investigation of Effect of Vortex Generators on Flow over Suboff Bare Hull Model*, Modares Mechanical Engineering, Vol. 9, pp. 1-11. (In Persian)

10- Alin, N., Bensow, R.E., Fureby, C., Huuva, T., and Svennberg, U., (2010), *Current Capabilities of DES and LES for Submarines at Straight Course*, Journal of Ship Research, vol.54, No. 3, pp. 184-196.

11- Sakthive, R., Vengadesan, S., and Bhattacharyya, S.K., (2011), *Application of Non-Linear  $\kappa$ - $\epsilon$  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.