

بررسی عددی اثر چیدمان مولدهای ورتکس بر جریان حول مدل زیرسطحی سابوف

امیر حمزه فرج‌الهی^{۱*}، مجتبی دهقان منشادی^۲، کاظم هجران‌فر^۳

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امام علی (ع)؛ a.farajollahi@sharif.edu

^۲ دانشیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ mdmanshadi@alum.sharif.edu

^۳ استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف؛ khejranfar@sharif.edu

چکیده

گردابه‌های اطراف زیردریایی نوین هیدرودینامیکی زیردریایی را افزایش می‌دهند و باعث غیر-یکنواختی جریان پروانه می‌شوند. یک روش مناسب برای کاهش اثرات جریان گردابه‌ای، استفاده از مولدهای ورتکس است. مولدهای ورتکس دارای چیدمان‌های مختلفی از جمله چرخش هم‌راستا و چرخش غیرهم‌راستا می‌باشند. در تحقیق حاضر به کمک شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار اپن‌فوم، میدان جریان در اطراف یک مدل زیرسطحی استاندارد با استفاده از چیدمان‌های مختلف مولدهای ورتکس در زوایای حمله $0 \leq \alpha \leq 30^\circ$ بررسی شده است. استفاده از شبیه‌سازی عددی در مطالعه حاضر به بررسی فیزیک اثر چیدمان‌های مولدهای ورتکس روی ساختار گردابه‌های تشکیل‌شده در اطراف زیردریایی کمک نمود. در این مطالعه، نتایج حاصل نشان می‌دهند که استفاده از مولدهای ورتکس با چیدمان چرخش غیرهم‌راستا باعث کاهش قدرت گردابه، خط جدایش، اندازه ابعاد گردابه‌های عرضی و نیروی پسا می‌شود. مقدار کاهش پسا برای مدل با مولد ورتکس غیرهم‌راستا در زاویه حمله 30° درجه حدود ۱۴ درصد و در زاویه جانبی 30° درجه حدود ۲۱ درصد می‌باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۰

کلمات کلیدی:

چیدمان مولد ورتکس

چرخش هم‌راستا

چرخش غیرهم‌راستا

اپن‌فوم

Numerical Investigation of Effect of Arrangement of Generators on Flow over a Suboff Submarine Model

Amir Hamzeh Farajollahi^{1*}, Mojtaba Dehghan Manshadi², Kazem Hejranfar³

¹ Assis. Prof., Mech. Eng., Imam Ali University; a.farajollahi@sharif.edu

² Assoc. Prof., Mech. Eng., Malek Ashtar University of Technology; mdmanshadi@alum.sharif.edu

³ Prof., Aero. Eng., Sharif University of Technology; khejran@sharif.edu

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 23 Aug. 2018

Accepted: 11 Nov. 2018

Keywords:

Arrangement of Vortex Generator

Counter-Rotating

Co-Rotating

OpenFOAM

ABSTRACT

The vortex generated around a submarine has an important influence on the uniformity of the submarine wake at the propeller and hydrodynamic noise. A suitable way to reduce the effects of this separated flow is to use vortex generators. Vortex generators have different arrangement such as counter-rotating and co-rotating. The main goal of the present study is to investigate the flow field around a standard underwater model employing the vortex generator with different arrangement by using the CFD method (OpenFOAM code) in $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ angles of attack. In this study, the application of CFD simulation which can help us to precisely study the structure of vortical flow field. The results show that counter-rotating vortex generators placed along the submarine do indeed significantly reduce strength of the vortex, line separation, size of cross-flow vortices and drag force. The amount of the drag reduction for the counter-rotating vortex generator is approximately 14% in $\alpha=30^\circ$ and approximately 21% in $\beta=30^\circ$.

۱- مقدمه

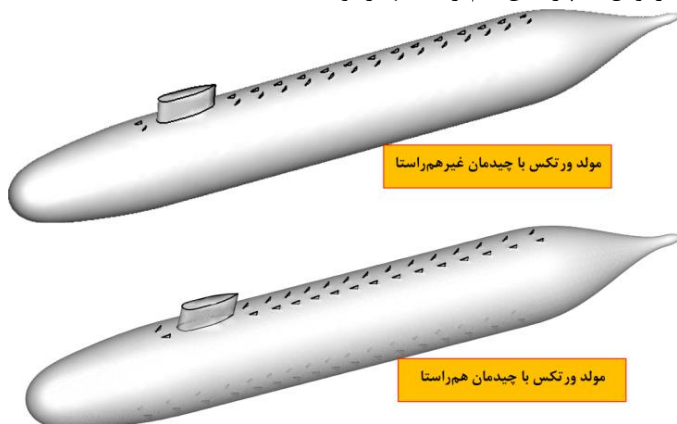
جدایش لایه مرزی (یعنی هنگامی که قسمتی از لایه مرزی نزدیک دیواره از سطح آن جدا شود) تحت گرادیان فشار معکوس رخ می‌دهد، جدایش جریان از لایه مرزی یک ناحیه آشفته‌ای را به وجود می‌آورد که این ناحیه آشفته میدان فشاری در لایه مرزی را ایجاد کرده و سبب جریان بازگشتی می‌شود که به نوبه خود سبب افزایش اصطکاک سطح و در نهایت ایجاد پسا می‌شود. بنابراین، 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. در واقع کنترل جریان^۱ روی یک جسم به مجموعه فرآیندها و مکانیسم‌هایی می‌گویند که جهت تغییر رفتار جریان در اطراف یا پایین دست جسم می‌باشد [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 آشفته، جلوگیری و یا تاخیر در پدیده واماندگی^۲، افزایش یا کاهش آشفستگی روی جسم و جلوگیری از برانگیختن واماندگی^۳ [۳-۱] اشاره نمود. در برخی منابع نیز هدف از کنترل جریان کاهش پسای آیرودینامیکی، افزایش برآ، افزایش اختلاط^۴ در جریان و یا کاهش سر و صدا^۵ بیان شده است [۴]. یکی از مشکلاتی که صنعت در طراحی یا بهینه‌سازی ایرفویل‌ها و هیدروفویل‌ها همواره با آن روبه‌رو است، پیدا کردن روشی برای کنترل لایه مرزی جهت کاهش پسا و افزایش برآ بوده است، زیرا جدایش لایه مرزی سبب کاهش شدید نیروی برآ و افزایش نیروی پسا و در نتیجه سبب کاهش عملکرد وسیله و مصرف بالای سوخت می‌شود. از این رو وجود راه حل موثری جهت کنترل لایه مرزی بسیار حائز اهمیت است. روش‌های کنترل لایه مرزی از قبیل آشفته‌کننده‌ها^۶، مولدهای ورتکس^۷، مکش یا دمش به لایه مرزی^۸ در دو دسته غیرفعال^۹ و فعال^{۱۰} تقسیم‌بندی می‌شوند [۲] و [۵-۷].

مولدهای ورتکس پره‌های باریک کوچکی هستند که عمود بر سطح مکشی بال‌ها یا تیغه‌های توربوماشین‌ها قرار می‌گیرند. این پره‌های به صورت ثابت در زاویه القایی کوچک نسبت به جریان هوا قرار می‌گیرند. در واقع مولدهای ورتکس با افزایش انتقال مومنتم^{۱۱} از جریان آزاد به داخل لایه مرزی سیال را حتی در زاویه حمله بالا به سطح بال چسبانده و مانع جدایش آن می‌شوند [۷]؛ مولدهای ورتکس همچنین می‌توانند جریان را در حالت ملایم و آرام حفظ نمایند. در زوایای حمله کوچک جریان روی ایرفویل ملایم و آرام و

به سطح آن چسبیده است. بعد از یک زاویه حمله خاص، که به زاویه واماندگی شناخته شده است، جریان دیگر قادر به تحمل گرادیان فشار مخالف ایجاد شده روی سطح مکشی ایرفویل را ندارد و موجب می‌شود جدایش لایه مرزی اتفاق افتد [۱۰]. این پدیده به عنوان پدیده واماندگی شناخته شده است که نتایج مضر، از جمله کاهش نیروی برآ، افزایش نیروی پسا، ایجاد سروصدای آیرودینامیکی، را به همراه دارد. یک وسیله پرنده نیاز دارد که در زاویه حمله بالایی در طول بلند شدن، نشست و سایر مانورها عمل نماید. بنابراین، کنترل جریان روی سطح ایرفویل در زاویه حمله بالا بسیار حائز اهمیت است. یکی از روش‌های کنترل لایه مرزی استفاده از مولدهای ورتکس است [۱۰].

لین و همکارانش انواع مختلفی از وسایل کنترل‌کننده جریان را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده نمودند که این وسایل در کنترل جدایش بسیار موثر هستند [۱۱]. می‌توان نتیجه گرفت که مولدهای ورتکس جهت کنترل جریان و جدایش آن با تولید ورتیسیت‌هایی در راستای جریان بسیار موثر هستند. مولدهای ورتکس که ورتیسیت‌هایی در راستای جریان به صورت چرخش غیر هم راستا^{۱۲} ایجاد می‌کنند بسیار موثرتر از آنهایی هستند که ورتیسیت‌ها را در راستای جریان به صورت چرخش هم راستا^{۱۳} تولید می‌کنند [۱۲]. تولید ورتیسیت‌ها به صورت چرخش غیر هم راستا یا چرخش هم راستا به نحوه چیدمان مولدهای ورتکس بر روی سطح بستگی دارد. ورتیسیت‌های هم راستا هنگامی که نوک پره‌های مولدهای ورتکس به سمت هم باشد به وجود می‌آیند و ورتیسیت‌ها غیر هم راستا زمانی که نوک پره‌ها از هم دور باشند ایجاد می‌شوند.

مولدهای ورتکس با چرخش غیرهم‌راستا علاوه بر افزایش انتقال مومنتم به سمت پایین، باعث تولید پسای کمتری نیز می‌شوند. در بعضی موارد، مشاهده شده است که عملکرد ایرفویل به‌تنهایی از ایرفویل با چرخش هم راستا بهتر بوده است [۱۲].



شکل ۱- چیدمان‌های مختلف مولد ورتکس نصب شده بر روی زیرسطحی سابوف.

زیرسطحی با استفاده از روش‌های ال ای اس^{۱۵} و دی ای اس^{۱۶} پرداختند [۱۶]. 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 [۱۷]. 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 $k - \varepsilon$ به خوبی با نتایج تجربی و عددی موجود هم‌خوانی داشت [۱۷].

استفاده از چیدمان مختلف مولدهای ورتکس روی یک مدل جهت درک بیشتر اثر چیدمان 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 با اثر چیدمان مولدهای ورتکس روی زیردریایی سابوف صورت نگرفته است. در این تحقیق، به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز اپن‌فوم^{۱۷}، اثر چیدمان‌های مختلف 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^{۱۸} تحت مجوز عمومی گنو^{۱۹} 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^{۲۰} است [۱۸].

۲- معادلات اساسی حاکم

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

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

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

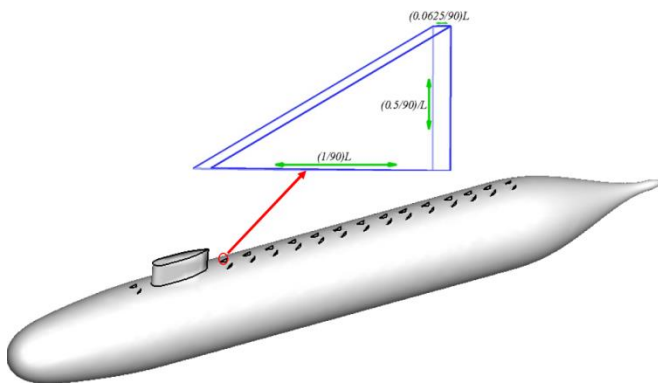
که در آن، U_i سرعت متوسط در جهت i ام، ρ چگالی و $\overline{u'_i u'_j}$ معرف تنش‌های رینولدزی است. معادله مومنتوم حاوی سه مولفه

آناند و همکارانش به بررسی عددی جریان آشفتته روی ایرفویل NACA 0012 با استفاده از مولدهای گردابه پرداختند [۱۲]. آنها با استفاده از نرم‌افزار فلونت در محدوده وسیعی از زوایای حمله و عدد رینولدز 550000 به مدل‌سازی اثر این مولدها بر مشخصه‌های جریان حول ایرفویل پرداختند. اضافه کردن مولدهای گردابه باعث افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا می‌شود. آنها اثر مولدهای گردابه را بر روی جریان سیال و نیروهای آیرودینامیکی عمل‌کننده بر ایرفویل مورد مطالعه قرار دادند؛ و همچنین چگونگی تاخیر در واماندگی با کمک این پره‌های کوچک^{۱۴} را مورد بررسی قرار دادند و گزارش نمودند.

منشادی و همکاران اثر مولدهای ورتکس یک ردیفه را روی بدنه لخت و بدون ملحقات یک جسم تقارن محوری به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند [۱۳ و ۱۴]. آنها برای بررسی فیزیک جریان روی بدنه با حضور مولدهای ورتکس آزمایشات مرئی سازی 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. همچنین منشادی و همکاران اثر مولدهای ورتکس یک ردیفه را روی گردابه‌های نعل اسبی ایجاد شده در محل اتصال برجک به بدنه یک جسم تقارن محوری به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه بررسی قرار دادند [۱۵]. نتایج تجربی و عددی آنها نشان داد که مولدهای ورتکس یک ردیفه بطور قابل توجهی قدرت گردابه نعل اسبی و در نتیجه نویز و نیروی درگ را کاهش می‌دهد.

شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی 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 چیدمان مختلف 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 آشفتته است، که در زوایای حمله بالا رفتار این جریان‌ها بسیار پیچیده می‌باشد. شبیه‌سازی عددی جریان اطراف زیرسطحی به نوع شبکه و مدل آشفتته مناسب وابسته است. آلین و همکاران در سال ۲۰۱۰ به شبیه‌سازی عددی رفتار جریان اطراف مدل

استفاده از مولدهای ورتکس، نوع چیدمان آنهاست، که به صورت چیدمان غیرهم‌راستا و چیدمان هم‌راستا می‌باشند (شکل ۲).



شکل ۲- ابعاد مولد ورتکس نصب شده بر روی زیرسطحی سابوف.

۴- بررسی و تحلیل نتایج

۴-۱- شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار اپن‌فوم

در این تحقیق به منظور بررسی کامل اثر چیدمان مختلف مولدهای ورتکس بر رفتار جریان در اطراف یک مدل زیرسطحی، از شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اپن‌فوم استفاده شده است. در این تحقیق از حلگر سسیمپل فوم^{۲۱} 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 پیرو^{۲۲} 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 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.

جهت بررسی استقلال حل از شبکه برای مدل با برجک، در این تحقیق از سه نوع شبه‌بندی درشت (۵۱۷۰۰۰ المان)، متوسط (شکل ۳). همان‌طور که شکل‌های (۴) و (۵) 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 شبکه 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 در زمان و هزینه محاسباتی می‌شود. همچنین در شکل ۴

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 شده است. این مدل دو معادله‌ای ویسکوزیته حالت آشفته را به صورت زیر مدل می‌کند:

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۳)$$

همان‌طور که نشان داده شد، 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) و نرخ استهلاک (ε) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

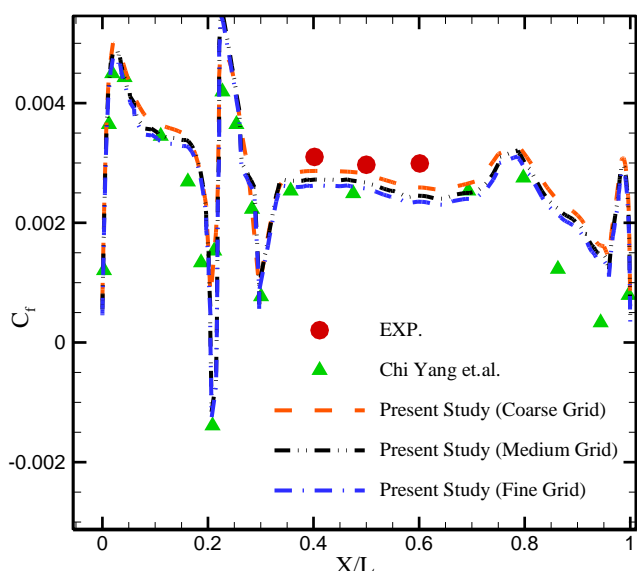
$$\frac{Dk}{Dt} = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} \quad (۴)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} \quad (۵)$$

$$\overline{u'_i u'_j} = v_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (۶)$$

۳- مولد ورتکس

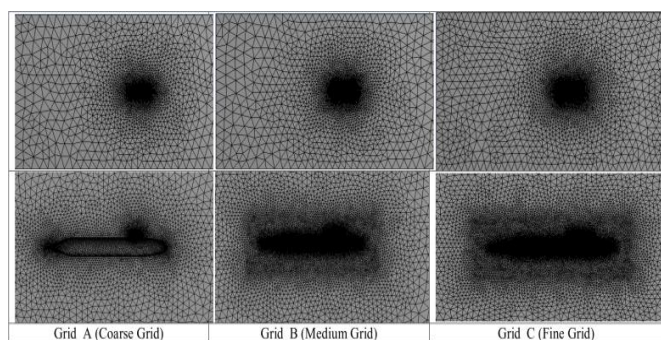
انواع مختلفی از مولدهای ورتکس وجود دارد. یکی از متداولترین نوع مولدهای ورتکس، مولد ورتکس به شکل تیغ یک بال دلتا است. به دلیل سادگی در طراحی و شکل آن یکی از پرکاربردترین نوع مولدهای ورتکس می‌باشد. یکی از مهمترین نکات در استفاده از مولدهای ورتکس، اندازه و ابعاد آن است [۱۳-۱۵]. در این تحقیق از مولدهای ورتکس با ابعاد طول ۱/۹۰، ارتفاع ۰/۵، و عرض ۹۰/۰۶۲۵/ استفاده شده است. یکی دیگر از نکات مهم در رابطه با



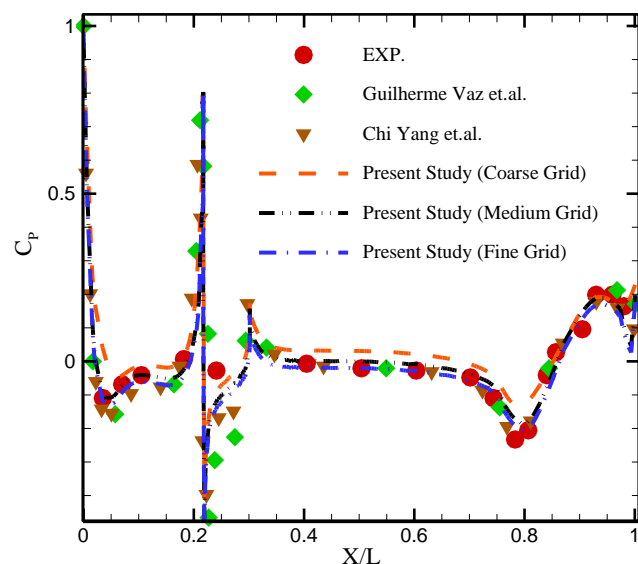
شکل ۵: مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک روی بدنه زیرسطحی سابوف با نتایج موجود در رینولدز ۱۴ میلیون.

شکل‌های ۶ و ۷ گردابه‌های اطراف مدل زیرسطحی را در زوایای حمله و جانبی ۳۰ درجه و رینولدز چهارده میلیون را برای سه حالت مختلف با مولد ورتکس با دو چیدمان مختلف (چیدمان هم-راستا و غیرهم‌راستا) و بدون مولد ورتکس را نشان می‌دهد. در شکل ۸ تیز خطوط جریان اطراف مدل زیرسطحی را در زاویه حمله ۳۰ درجه و عدد رینولدز چهارده میلیون نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های زیر و جدول ۱ مشاهده می‌گردد که بیشترین میزان کاهش درگ برای مدل با مولدهای ورتکس غیرهم‌راستا (۱۴ درصد در زاویه حمله ۳۰ درجه و ۲۱ درصد در زاویه جانبی ۳۰ درجه موجب کاهش درگ می‌شود) می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد، مولدهای ورتکس غیرهم‌راستا 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 و از رشد جریان گردابه‌ای جلوگیری کرده 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. همچنین در واقع، استفاده از مولد ورتکس غیرهم‌راستا موجب می‌گردد که جریان آرامتری به سمت پایین دست مدل یا قسمت پاشنه مدل که محل قرارگیری پروانه است، روانه گردد. علاوه بر این مشاهده می‌گردد مولد ورتکس با چیدمان هم‌راستا باعث افزایش جریان گردابه‌ای اطراف مدل و همچنین افزایش ضریب درگ شده است.

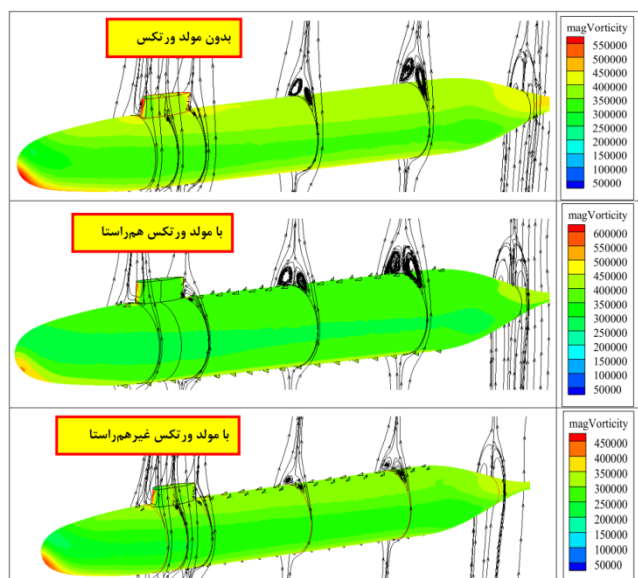
تغییرات ضریب فشار روی سطح بدنه زیرسطحی سابوف با برچک نصب شده روی آن در رینولدز ۱۴ میلیون نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل نمایان است شیب تندی در مقطع $X/L \approx 0.2$ به وجود آمده، ناشی از حضور برچک بر روی بدنه می‌باشد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از نرم‌افزار این‌فوم با نتایج عددی و نتایج تجربی موجود بسیار مشابه بوده و با نتایج موجود مطابقت دارد. همچنین در شکل ۵ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بدنه حول بدنه مدل را نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که نتایج حاصل از نرم‌افزار این‌فوم (تغییرات ضریب فشار، ضریب اصطکاک سطح) با نتایج عددی [۲۰ و ۲۱] و نتایج تجربی [۱۹] موجود تطابق خوبی داشته و نرم‌افزار موجود در شبیه‌سازی عددی جریان اطراف زیرسطحی بسیار مناسب بوده و از دقت خوبی برخوردار است.



شکل ۳: نمای دور و نزدیکی از سه شبکه‌بندی محاسباتی مورد استفاده در این تحقیق (شبکه‌بندی درشت، متوسط و ریز)



شکل ۴: مقایسه تغییرات ضریب فشار روی بدنه زیرسطحی سابوف با نتایج موجود در رینولدز ۱۴ میلیون.



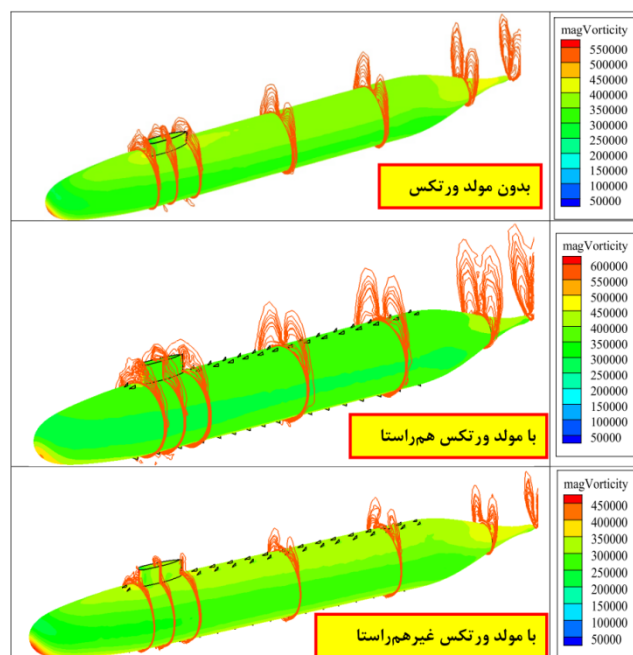
شکل ۸: کانتور فشار روی سطح مدل و خطوط جریان ایجاد شده بر روی بدنه زیرسطحی سابوف در مقاطع مختلف و در زاویه حمله ۳۰ درجه (بدون مولد ورتکس (بالا)، با مولد ورتکس همراستا (وسط) و با مولد ورتکس غیرهمراستا (پایین)).

جدول ۱: مقایسه مقدار ضریب پسا برای مدل زیرسطحی سابوف در زوایای حمله و جانبی ۳۰ درجه

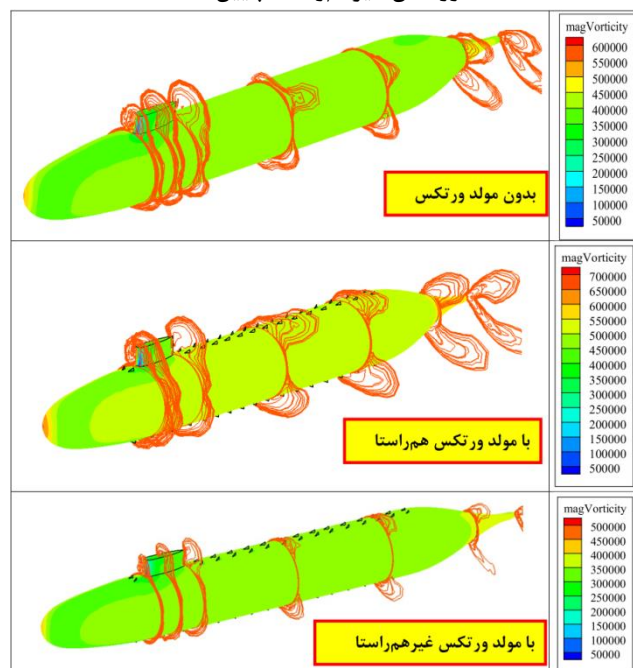
%DR ₀	$\beta=30^\circ$	%DR	$\alpha=30^\circ$	ضریب پسا
۰	۰/۷۷۴۶	۰	۰/۷۲۸۵	حل حاضر (بدون مولد ورتکس)
٪۲۱	۰/۶۱۱۷	٪۱۴	۰/۶۳۰۷	حل حاضر (با مولد ورتکس غیرهمراستا)
-٪۲	۰/۷۸۳۲	-٪۴	۰/۷۵۴۳	حل حاضر (با مولد ورتکس همراستا)

شکل ۹ خطوط جریان اطراف مدل زیرسطحی برای سه حالت بدنه با مولد ورتکس با دو چیدمان مختلف (همراستا و غیرهمراستا) و بدنه بدون مولد ورتکس را در زاویه جانبی 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 غیرهمراستا 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 غیرهمراستا موجب کاهش و یا حتی حذف گردابه نعل اسبی در محل اتصال برجک به بدنه زیرسطحی می‌شود. یعنی مولدهای ورتکس غیرهمراستا با انرژی دادن به لایه مرزی از رشد گردابه جلوگیری می‌کنند که در نهایت موجب کاهش جدایش و درگ می‌شود.

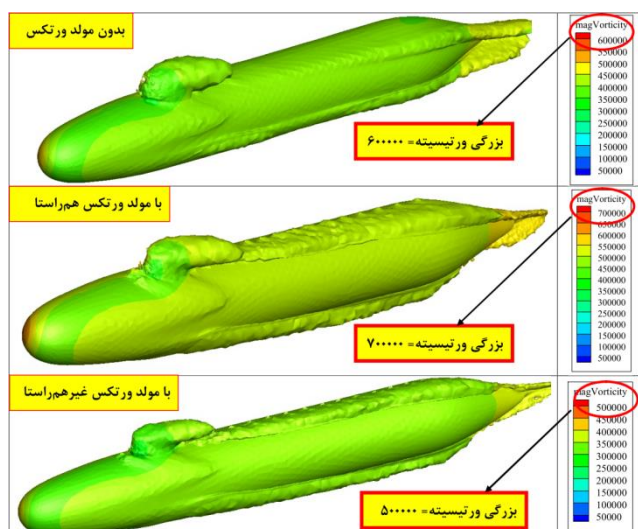
شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه جریان گردابه‌ای اطراف بدنه مدل زیرسطحی سابوف با برجک برای سه حالت مختلف (مدل بدون مولد ورتکس (بالا)، مدل با مولد ورتکس همراستا (وسط) و مدل با



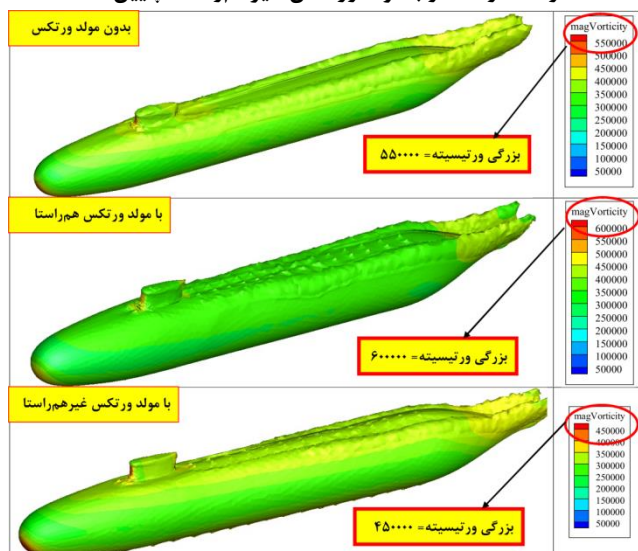
شکل ۶: کانتور فشار روی سطح مدل و گردابه‌های ایجاد شده بر روی بدنه زیرسطحی سابوف در مقاطع مختلف و در زاویه حمله ۳۰ درجه (بدون مولد ورتکس (بالا)، با مولد ورتکس همراستا (وسط) و با مولد ورتکس غیرهمراستا (پایین)).



شکل ۷: کانتور فشار روی سطح مدل و گردابه‌های ایجاد شده بر روی بدنه زیرسطحی سابوف در مقاطع مختلف و در زاویه جانبی ۳۰ درجه (بدون مولد ورتکس (بالا)، با مولد ورتکس همراستا (وسط) و با مولد ورتکس غیرهمراستا (پایین)).



شکل ۱۰: مقایسه جریان گردابه‌ای و ورتیسیتة اطراف مدل سابوف در زوایه جانبی ۳۰ درجه (بدون مولد ورتکس (بالا)، با مولد ورتکس هم-راستا (وسط) و با مولد ورتکس غیرهم‌راستا (پایین)).

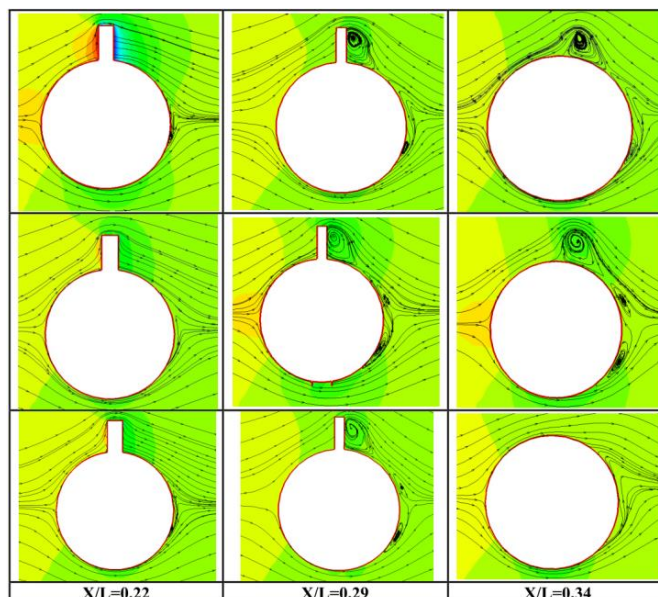


شکل ۱۱: مقایسه جریان گردابه‌ای و ورتیسیتة اطراف مدل سابوف در زوایه حمله ۳۰ درجه (بدون مولد ورتکس (بالا)، با مولد ورتکس هم-راستا (وسط) و با مولد ورتکس غیرهم‌راستا (پایین)).

۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، به منظور بررسی فیزیک میدان جریان اطراف بدنه یک مدل زیرسطحی استاندارد با استفاده از چیدمان مختلف مولدهای ورتکس به صورت عددی با استفاده از شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار اپن‌فوم استفاده شده است. نتایج عددی میدان تنش برشی روی سطح مدل، گردابه‌های اطراف آن و همچنین جدایش جریان اطراف مدل و مقدار نیروی پسا را نشان می‌دهد. نتایج کیفی و کمی اندازه‌گیری شده از جریان اطراف و روی سطح مدل زیرسطحی مورد نظر به طور خلاصه به صورت زیر بیان می‌کند:

مولد ورتکس غیرهم‌راستا (پایین)) در زوایای جانبی و حمله ۳۰ درجه را نشان می‌دهند. همان‌طور که در بالا اشاره گردید، استفاده از مولد ورتکس سبب کاهش قدرت ورتیسیتة (قدرت ورتیسیتة برای مدل بدون مولد ورتکس و زاویه حمله و جانبی به ترتیب برابر با ۵۵۰۰۰۰ و ۶۰۰۰۰۰ و برای مدل با مولد ورتکس غیرهم-راستا به ترتیب برابر با ۵۰۰۰۰۰ و ۴۵۰۰۰۰ می‌باشد.) و جریان گردابه‌ای در اطراف مدل می‌شود و همچنین از رشد جریان گردابه-ای 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. اما همان‌طور که اشاره گردید مدل با مولد ورتکس هم‌راستا به دلیل اینکه گردابه‌های ایجاد شده توسط هر ردیف موجب رشد گردابه ردیف بعدی می‌شوند، باعث افزایش قدرت گردابه می‌شود.



شکل ۹: کانتور فشار اطراف مدل در مقاطع مختلف و خطوط جریان اطراف بدنه زیرسطحی سابوف در زوایه جانبی ۳۰ درجه (بدون مولد ورتکس (بالا)، با مولد ورتکس هم‌راستا (وسط) و با مولد ورتکس غیرهم-راستا (پایین)).

3- van der Burg J.W., Maseland J.E.J., and Brandsma F.J., (2004), *Low Speed Maximum Lift and Flow Control*, Aerospace Science and Technology, 8, 389-400.

4- Yarusevych S., Sullivan P.E., and Kawall J.G., (2005), *Airfoil Boundary Layer Separation and Control at Low Reynolds Numbers*, Experiments in Fluids, 38, 545-547.

5- Echávez G., and McCann E., (2002), *An Experimental Study on the Free Surface Vertical Vortex*, Experiments in Fluids, 33414-41.

6- Maughmer M. D., Swan T.S. and Willits S.M., (2001), *The Design and Testing of a Winglet Airfoil for Low-Speed Aircraft*, 39th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA 2001-2478.

7- Gursul I., Vardaki E., Margaris P., and Wang Z., (2006), *Control of Wing Vortices*, First ActiveFlow Control Conference, Berlin, Germany, September 27-29.

8- Anderson, J.D., (2001), *Fundamentals of Aerodynamics*, Thirded, McGraw-Hill publications.

9- Gad-el-Hak M., and Brushnell, D.M., (1991), "Separation control: Review", Journal of Fluids Engineering, 113, 5-30.

10- Heine B., Mulleners K., Gardner A. and Mai H., (2009), *On the Effects of Leading Edge Vortex Generators on an OA209 Airfoil*, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), Bunsenstrabe 10, 37073 Gottingen.

11- Lin J.C., Selby G.V., and Howard F.G., (1991), *Exploratory Study of Vortex Generating Devices for Turbulent Flow Separation Control*, AIAA paper 91-0042.

12- Anand U., Sudhakar Y., Thilepanragu R., Gopinathan V.T. and Rajasekar R., (2010), *Passive Flow Control Over NACA0012 Aerofoil Using Vortex Generators*, Proceedings of the 37th National 4th International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power, December 16-18, IIT Madras, Chennai, India. FMFP10-FP-12

13- 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)

14- Dehghan Manshadi, M., Hejranfar, k., and Farajollahi, A.H., (2017), *Effect of Vortex Generators on Hydrodynamic Behavior of an Underwater Axisymmetric Hull at High Angles of Attack*, Journal of Visualization, DOI 10.1007/s12650-016-0412-4.

15- Dehghan Manshadi, M., Hejranfar, k., and Farajollahi, A.H., (2017), *Numerical and Experimental Investigation of Hydrodynamic Behavior of a Horseshoe Vortex around sail*, Journal of Marine Engineering. 2017; 12 (24): pp. 1-11. (In Persian)

(۱) در زوایای حمله $10^0 \geq \alpha \geq 30^0$ ، مولدهای ورتکس غیرهم-راستا تقریباً بطور کامل جدایش ثانویه را روی سطح مدل حذف کرده‌اند.

(۲) مولدهای ورتکس با چیدمان غیرهم‌راستا باعث کاهش پسا و همچنین جریان گردابه‌ای اطراف مدل در زوایای حمله زیاد می-شوند.

(۳) حضور برجک بر روی مدل سبب ایجاد گردابه نعل اسبی روی بدنه در محل اتصال برجک به بدنه می‌شود.

(۴) حضور مولدهای ورتکس غیرهم‌راستا سبب کاهش گردابه اطراف برجک یا همان گردابه نعل اسبی می‌شوند.

(۵) استفاده از مولدهای ورتکس غیرهم‌راستا موجب کاهش گردابه-های عرضی اطراف بدنه مدل می‌شوند.

(۶) مولدهای ورتکس هم‌راستا به دلیل افزایش جریان گردابه‌ای اطراف مدل باعث افزایش نیروی پسا نیز می‌شوند.

(۷) بهترین چیدمان برای کاهش نیروی پسا و جریان گردابه‌ای اطراف زیرسطحی سابوف با برجک، چیدمان غیرهم‌راستا است.

کلید واژگان

- 1- Flow Control
- 2- Stall
- 3- Provoke stall
- 4- Flow mixing
- 5- Reduce noise
- 6- Turbulators
- 7- Vortex generators
- 8- Boundary layer suction and blowing
- 9- Passive device
- 10- Active device
- 11- Momentum transfer
- 12- Counter-rotating
- 13- Co-rotating
- 14- Small vanes
- 15- Large Eddy Simulation
- 16- Detached Eddy Simulation
- 17- OpenFOAM
- 18- OpenCFD Ltd
- 19- General Public License (GNU)
- 20- Finite Volume
- 21- SimpleFoam
- 22- PISO

۶- مراجع

1- Juan S. Delnero, Julio and Maranon Di Leo, (2008), *Vortex Generator Efficiency on Low Reynolds number Airfoils in Turbulent Flow*, BBAA VI international colloquium on: Bluff Bodies aerodynamics & applications, Milano, Italy, July, 20-24.

2- Lachmann G.V., (1961), *Boundary Layer and Flow Control*, 1-2, Pergamon Press, Oxford Great Britain, 1961.

Surface Warfare Center Carderock Division (NSWCCD), West Bethesda, MD, report CRDKNSWC/HD-1298-11.

20- 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.

21- Vaz, G., Toxopeus, S., and Holmes, S., (2010), *Calculation of Manoeuvring Forces on Submrines 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.

16- 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.

17- Sakthive, R., Vengadesan, S., and Bhattacharyya, S.K., (2011), *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.

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

19- Liu, H.L., and Huang, T.T., (1998), *Summary of DARPA Suboff Experimental Program Data*, Naval