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

امیر حمزه فرجالهی (*، مجتبی دهقانمنشادی ۲، کاظم هجران فر ۳

ا 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

اطلاعات مقاله	چکیدہ
<i>تاریخچه مقاله:</i> تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۰	گردابههای اطراف زیردریایی نویز 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 غیرهم- راستا میباشند. در تحقیق حاضر به کمک شبیهسازی عددی با نرمافزار اپن فوم، میدان جریان در اطراف
<i>کلمات کلیدی:</i> چیدمان مولد ورتکس چرخش همراستا چرخش غیرهم _ل راستا اپنفوم	یک مدل زیرسطحی استاندارد با استفاده از چیدمانهای مختلف مولدهای ورتکس در زوایای حمله ۳۰ ⁰ ≥ه≥ ⁰ بررسی شدهاست. استفاده از شبیهسازی عددی در مطالعه حاضر به بررسی فیزیک اثر چیدمان- های 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 گرادبههای عرضی و نیروی پسا میشود. مقدار کاهش پسا برای مدل با مولد ورتکس غیرهمراستا در زاویه حمله ۳۰ درجه حدود ۱۴ درصد و در زاویه

Numerical Investigation of Effect of Arrangement of Generators on Flow over a Suboff Submrine 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 $0^{\circ} \le \alpha \le 30^{\circ}$ 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 می-دهد، جدایش جریان از لایه مرزی یک ناحیه آشفتهای را بهوجود می آورد که این ناحیه آشفته میدان فشاری در لایه مرزی را ایجاد کرده و سبب جریان بازگشتی می شود که به نوبه خود سبب افزایش اصطکاک سطح و در نهایت ایجاد پسا می شود. بنابراین، جدایش لایه مرزی منجر به افزایش پسای فشاری روی سطح میشود، که این فشار تقریبا همان فشار کل را در بر می گیرد و باعث افزایش سر و صدا می شود. برای جلوگیری از جدایش لایه مرزی، محققان همواره در حال مطالعه و بررسی روشهای موثر جهت کنترل آن هستند. در واقع کنترل جریان (روی یک جسم به مجموعه فرآیندها و مکانیسمهایی می گویند که جهت تغییر رفتار جریان در اطراف یا پاییندست جسم میباشد [1]. کنترل لایه مرزی جریان مى تواند دلايل مختلفى داشته باشد، از جمله اين دلايل مى توان 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 آشفتگی روی جسم و جلوگیری از برانگیختن واماندگی [1-٣] 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 شدهاست [۴]. یکی از مشکلاتی که صنعت در طراحی یا بهینه سازی ایرفویل ها و هیدروفویل ها 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 می شود. از این رو وجود راه حل موثری جهت کنترل لایه مرزی بسیار حائز اهمیت است. روش های کنترل لایه مرزی از قبیل آشفته کننده ها، مولدهای ورتکس^۷، مکش یا دمـش بـه لایـه مـرزی^۸ در دو دسـته غیرفعال ۲ و فعال ۲ تقسیم بندی می شوند [۲] و [۷-۵].

یرو می رکس پرههای باریک کوچکی هستند که عمود بر سطح مکشی بالها یا تیغههای توربوماشینها قرار می گیرند. این پرههای بهصورت ثابت در زاویه القایی کوچک نسبت به جریان هوا قرار می-گیرند. 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 می شوند [۷]؛ مولدهای ورتکس همچنین می توانند جریان را در حالت ملایم و آرام حفظ

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 می شود جدایش لایه مرزی اتفاق افتد [۱۰]. این پدیده به عنوان پدیده واماندگی شناخته شده است که نتایج مضری، 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، نشستن و سایر مانورها عمل نماید. بنابراین، کنترل جریان روی سطح ایرفویل در زاویه حمله بالا بسیار حائز اهمیت است. یکی از روش های کنترل لایه مرزی استفاده از مولدهای ورتکس است [۱].

لین و همکارانش انواع مختلفی از وسایل کنترل کننده جریان را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده نمودند که این وسایل در کنترل جدایش بسیار موثر هستند [۱۱]. می توان نتیجه گرفت که مولدهای ورتکس جهت کنترل جریان و جدایش آن با تولید ورتیسیتههایی در راستای جریان بسیار موثر هستند. مولدهای ورتکس که ورتیسیتههایی در راستای جریان به صورت چرخش غیر ورتکس که ورتیسیتههایی در راستای جریان به صورت چرخش غیر ورتیسیتهها را در راستای جریان به صورت چرخش هم راستا^{۱۱} تولید می کنند [۱۲]. تولید ورتیسیتهها به صورت چرخش غیر هم راستا یا چرخش هم راستا به نحوه چیدمان مولدهای ورتکس بر روی سطح بستگی دارد. ورتسیستههای هم راستا هنگامی که نوک پرههای مولدهای ورتکس به سمت هم باشد به وجود می آیند و ورتیسیتهها غیر هم راستا زمانی که نوک پرهها از هم دور باشند

مولدهای ورتکس با چرخش غیرهمراستا علاوه بر افزایش انتقال مومنتوم بهسمت پایین، باعث تولید پسای کمتری نیز می شوند. 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 ور تکس نصب شده بر روی زیرسطحی سابوف.

آناند و همکارانش به بررسی عددی جریان آشفته روی ایرفویل NACA 0012 با استفاده از مولدهای گردابه پرداختند [۱۲]. آنها با استفاده از نرمافزار فلوئنت در محدوده وسیعی از زوایای حمله و عدد رینولدز ۵۵۰۰۰۰ 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 عمل کننده 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 بهصورت 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 اینفوم استفاده نمودند. نتایج تجربی و عددی آنها عرضی و نیروی درگ را کاهش میدهد. همچنین منشادی و ممکاران اثر مولدهای ورتکس بطور قابل توجهی قدرت گردابه 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 سهیعدی جریان اطراف مدل زیرسطحی است. در زمینه شبیهسازی عددی رفتار جریان اطراف مدل زیرسطحی مطالعات بسياري صورت گرفته ولي تاكنون هيچ گونه مطالعه عددي در زمینه اثر استفاده از چیدمان مختلف مولدهای ورتکس روی رفتار هیدردینامیکی جریان اطراف جسم زیرسطحی انجام نشده-است. در واقع، شبیهسازی سهبعدی جریان اطراف اجسام تقارن محوری بهنوبه خود سبب کاهش هزینههای سنگین تجربی می شود. 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 می دهد، و همچنین نیازمند تجهیزات و لوازم آزمایشگاهی مجهز میباشد. بیشتر جریان کاربردی روی بدنه زیرسطحیها، جریانهای انتقالی و جریانهای آشفته است، که در زوایای حمله بالا رفتار این جریانها بسیار پیچیده می باشد. شبیه سازی عددی جریان اطراف زیر سطحی 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 روش های ال ای اس^{۱۵} و دی ای اس^{۱۹} 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 شبیه سازی 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 مدل های آشفتگی 8 - 8 استاندارد و 8 - 8نیرخطی را در زوایای حمله بالا استفاده نمودند. نتایج شبیه سازی آنها با استفاده از مدل آشفتگی غیر – خطی 8 - 8 و مدل استاندارد آنها با استفاده از مدل آشفتگی غیر – خطی 8 - 8 و مدل استاندارد آنها .

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 اینفوم^{۱۷}، اثر چیدمانهای مختلف مولدهای ورتکس را روی زیرسطحی استاندارد سابوف مورد مطالعه و بررسی قرار می-گیرد. نرمافزار متنباز اینفوم، یک جعبه ابزار برای دینامیک سيالات محاسباتي است كه بهوسيله آن ميتوان مسائل مختلف (جریان های تراکمناپذیر، جریان های تراکم پذیر، جریان های چند فازی، واکنشهای شیمیایی و غیره) را شبیهسازی کرد. این نرمافزار توسط مجموعه شبیه سازی باز^{۱۸} تحت مجوز عمومی گنو^{۱۹} ایجاد شده که بهصورت 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 متوسط گیریشده برای جریان تراکمناپـذیر بهصورت زیر بیان میشود:

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

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

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

مجهول تنش رینولدزی است، لـذا سیسـتم معـادلات فـوق کامـل نیست و بایستی با اسـتفاده از مـدل آشـفتگی مناسـب تـنشهـای رینولدزی محاسبه شوند. در این تحقیق، برای مـدلسـازی جریـان آشفته غیرلزج و همچنین محاسـبه تـنشهـای رینولـدزی از مـدل آشـفتگی $- \varepsilon$ اسـتفاده شـدهاسـت. ایـن مـدل دو معادلـهای ویسکوزیته حالت آشفته را به صورت زیر مدل میکند:

$$v_t = c_\mu \, \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{(Y)}$$

همان طور که نشان داده شد، ویسکوزیته حالت آشفته براساس نرخ تولید و استهلاک آشفتگی بیان شدهاند. مدل $\varepsilon - k - k$ که یکی از مدلهای دو-معادلهای آشفتگی است، یکی از رایج ترین این مدل-هاست. 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 این اجازه میدهد که یک مدل دو معادلهای اثراتی مانند انتقال این اجازه میدهد که یک مدل دو معادلهای اثراتی مانند انتقال این اجازه میدهد که یک مدل دو معادلهای اثراتی مانند انتقال این اجازه میدهد که یک مدل دو معادلهای اثراتی مانند انتقال تورد اولین متغیر انتقال انرژی جنبشی 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:

$$\frac{Dk}{\partial t} = -\overline{u_i'u_j'} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon
+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\frac{v_i}{\sigma_k} + v \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\}$$
(*)
$$D\varepsilon = c_i \cdot \varepsilon \cdot \overline{t_i} \cdot \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon \cdot \varepsilon^2$$

$$\frac{\partial t}{\partial t} = -C_{\varepsilon 1} \frac{1}{k} u_i' u_j' \frac{1}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{1}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\frac{v_i}{\sigma_{\varepsilon}} + v \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\}$$
(Δ)

$$\overline{u_i'u_j'} = v_t S_{ij} - \frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{9}$$

۳- مولد ور تکس

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 [10–1۳]. در این تحقیق از مولدهای ورتکس با ابعاد طول ۱/۹۰، ارتفاع ۵۹/۹۰ و عرض ۹۰ /۰٫۶۲۵ استفاده شده است. یکی دیگر از نکات مهم در رابطه با

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



شکل ۲- ابعاد مولد ور تکس نصب شده بر روی زیر سطحی 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 شبیه-سازی 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 پیزو^{۲۲} میباشد. در واقع به علت هزینههای انجام تستهای تجربی و محدودیتهای این روش برای بررسی بیشتر جریان اطراف مدل زیرسطحی از 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 (۱۴۸۹۰۰۰۰ المان) و ریز (۲۰۵۰۰۰۰ المان) استفاده شده است (شکل ۳). همان طور که شکلهای (۴) و (۵) مشاهده می شود 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 شبیه سازی جریان هیدرودینامیکی اطراف مدل زیر سطحی 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 صرفه جویی در زمان و هزینه محاسباتی می شود. همچنین در شکل ۴

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 تندی در مقطع $X/L \approx 0.2$ بهوجود آمده، ناشی از حضور برجک بر روی بدنه می-باشد. با توجه به شکل مشاهده میشود که نتایج حاصل از نرمافزار اپن فوم 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 اپن فوم (تغییرات ضریب فشار، ضریب اصطکاک سطح) با نتایج عددی [۲۰ و ۲۱] و نتایج تجربی [۱۹] موجود تطابق خوبی داشته و نرمافزار موجود در شبیه سازی عددی جریان اطراف زیر سطحی بسیار مناسب بوده و از شبیه سازی عددی جریان اطراف زیر سطحی 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 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 می گردد 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 می شود) می باشد. همان طور 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 تقریبا از بین رفته و اندازه گردابه روی سطح در مقایسه با مدل بدون استفاده از مولد ورتکس کوچکتر می شود. همچنین در واقع، استفاده از مولد ورتکس غیرهمراستا موجب می گردد که جریان آرامتری به سمت پایین دست مدل یا قسمت پاشنه مدل که محل قرارگیری پروانه است، روانه گردد. علاوه بر این مشاهده می گردد مولد ورتکس با چیدمان همراستا باعث افزایش جریان گردابهای اطراف مدل و همچنین افزایش ضریب درگ شده است.



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



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



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

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

%DR	β=30°	%DR	α=30°	ضريب پسا	
			. /	حل حاضر (بدون مولد	
	•/•••/	·	- / / / //۵	ورتكس)	
۲ ۲ ۱/	7.51	•/۶۱۱۷	/14 •/88•1	./57.V	حل حاضر (با مولد
				/. 1 1	ورتكس غيرهمراستا)
- / Y	•/VATT	_'/¥	•/٧٨۴٣	حل حاضر (با مولد	
	, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	7.1	-/.1	ورتكس 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 جاتبی ۳۰ درجه نشان میدهد. با توجه به خطوط جریان و همچنین جریان گردابهای و چرخشی در جریان عرضی حول یدنه زیرسطحی مشاهده می-شود که نصب مولد ورتکس غیرهمراستا روی بدنه زیرسطحی باعث کاهش اندازه چرخش و همچنین موجب کاهش جریان گردابهای و در نتیجه در واقع حضور مولد ورتکس غیرهمراستا موجب کاهش و یا حتی حذف گردابه نعل اسبی در اطراف بدنه زیرسطحی میشود. یعنی میشود. یعنی مولدهای ورتکس غیرهمراستا موجب کاهش و یا حتی میشود. یعنی مولدهای ورتکس غیرهمراستا با انرژی دادن به لایه مرزی از رشد گردابه جلوگیری میکنند که در نهایت موجب کاهش

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

مولد ورتکس غیرهمراستا (پایین)) در زوایای جانبی و حمله ۳۰ درجه را نشان می دهند. همان طور که در بالا اشاره گردید، استفاده از مولد ورتکس سبب کاهش قدرت ورتیسیته (قدرت ورتیسیته برای مدل بدون مولد ورتکس ور زاویه حمله و جانبی به ترتیب برابر با ۵۵۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰۰ و برای مدل با مولد ورتکس غیرهم-راستا به ترتیب برابر با ۵۰۰۰۰۰ و محک می باشد.) و جریان گردابهای در اطراف مدل میشود و همچنین از رشد جریان گردابه-ای و در نتیجه جدایش بیشتر جریان اطراف مدل جلوگیری می-کند. در واقع، مولدهای ورتکس با ترکیب جریان لایه مرزی با بیشتر لایه مرزی و رشد گردابهها در اطراف مدل جلوگیری می کند بریان بیرون لایه مرزی که انرژی بیشتری را داراست، از جدایش و در نتیجه جریان آرامتری به سمت پروانه، روانه میشود. اما همان طور 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 جاتبی ۳۰ درجه (بدون مولد ور تکس (بالا)، با مولد ور تکس همراستا (وسط) و با مولد ور تکس غیرهم-راستا (پایین)).



شکل ۱۰: مقایسه جریان گردابهای و ورتیسیته 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 ورتیسیته 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 بهصورت 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 اندازه گیری شده از جریان اطراف و روی سطح مدل زیرسطحی مورد نظر به طور خلاصه به صورت زیر بیان میکند: 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 Vórtices*, First ActiveFlow Control Conference, Berlín, 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 fur 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., Thileepanragu 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)) در زوایای حمله $1 \cdot 0 \leq \alpha \leq 0^{-n}$ ، مولدهای ورتکس غیرهم-راستا تقریبا 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 می شود.

۴) حضور مولدهای ورتکس غیره_مراستا 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 می شوند.

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

کليد 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

8- 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