

بررسی تجربی اثرات چیدمان مولدهای گردابه بر رفتار جریان گردابه‌ای اطراف یک جسم تقارن محور

امیر حمزه فرج‌الهی^۱

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه امام علی^(ع)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۰)

چکیده

اجسام تقارن محور، شبیه زیردریایی‌ها، در زوایای حمله بالا با جدایش سه‌بعدی لایه مرزی و ساختارهای جریان گردابه‌ای بزرگ در اطراف جسم مواجه می‌شوند که تاثیر بسزایی در نیروها و ممان‌های جسم دارد. این جریان گردابه‌ای روی نوپ، پسا و مانورپذیری جسم اثرگذار است. یک روش مناسب برای کاهش اثرات جریان جدا شده و گردابه‌ای استفاده از مولدهای گردابه است. مولدهای گردابه دارای چیدمان‌های مختلفی، از جمله چرخش هم‌راستا و چرخش غیرهم‌راستا، می‌باشند. در تحقیق حاضر، به کمک روش تجربی و با استفاده از پراب پنج حفره، میدان جریان در اطراف یک مدل زیردریایی استاندارد با استفاده از چیدمان‌های مختلف مولدهای گردابه در زوایای حمله $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ بررسی شده است. استفاده از پراب پنج حفره در مطالعه حاضر به بررسی فیزیک اثر چیدمان‌های مولدهای گردابه روی ساختار گردابه‌های تشکیل شده در اطراف جسم تقارن محور کمک نمود. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از مولدهای گردابه با چیدمان چرخش غیرهم‌راستا باعث کاهش قدرت گردابه، اندازه ابعاد گردابه‌های عرضی و نیروی پسا می‌شود.

واژه‌های کلیدی: چیدمان مولد گردابه، چرخش هم‌راستا، چرخش غیرهم‌راستا، پراب پنج حفره

Experimental Investigation of the Effects of Arrangement of Vortex Generators on Behavior of a Vortical Flow around an Axisymmetric Body

A. H. Farajollahi

Faculty of Mechanical Engineering Department

Imam Ali University

(Received: 24/September/2018 ; Accepted: 01/December/2018)

Abstract

Axisymmetric bodies, like submarines, at high angles of attack have been characterized by three-dimensional boundary layer separation and large vortical structures, which have an important effect on forces and moments. This vortical flow affects acoustics, drag, and maneuverability. A suitable way to reduce the effect of this separated and vortical flow is to use vortex generators, which have different arrangements, such as counter-rotating and co-rotating. The present study aimed to investigate flow field around a standard model employing vortex generators with different arrangements, using a five-hole probe at $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$. Application of five hole probe method can help to precisely study the structure of vortical flow field. The results show that counter-rotating vortex generators do indeed significantly reduce the strength of vortex, size of cross-flow vortices, and drag force.

Keywords: Arrangement of Vortex Generator, Co-Rotating, Counter-Rotating, Five-Hole Probe

فهرست علائم

| | |
|------------|---|
| P_0 | فشار کل (Pa) |
| P_∞ | فشار استاتیک (Pa) |
| q | فشار دینامیک (Pa) |
| Re | عدد رینولدز ($\rho UL\mu^{-1}$) |
| U | سرعت جریان آزاد (ms^{-1}) |
| L | طول بدنه مدل (m) |
| X | فاصله از نوک دماغه در امتداد بدنه مدل (m) |
| α | زاویه حمله (degree) |
| D | شعاع مدل (m) |

۱- مقدمه

بسیاری از تحقیقاتی که جهت کاهش پسای اجسام تقارن محور مانند زیرسطحی‌ها صورت گرفته است، به بهینه‌سازی و تغییر شکل بدنه آنها پرداخته‌اند، و تحقیقات محدودی در زمینه استفاده از وسایل جانبی جهت کاهش پسای صورت گرفته است. 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 پسای می‌شود [۱]. بنابراین، جدایش لایه مرزی منجر به افزایش پسای فشاری روی سطح می‌شود، که پسای فشاری تقریباً سهم بیشتری را نسبت به پسای اصطکاکی دارد 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. 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 پسای و افزایش برآ بوده است، زیرا جدایش لایه مرزی سبب کاهش شدید نیروی برآ و افزایش نیروی پسای و در نتیجه سبب کاهش عملکرد وسیله و مصرف بالای سوخت می‌شود. یکی از بهترین‌ها روش‌ها جهت کاهش پسای و کنترل جریان لایه مرزی استفاده از مولدهای گردابه است [۲]. در واقع مولدهای گردابه با افزایش انتقال مومنتم از جریان آزاد به داخل لایه مرزی سیال را حتی در زاویه حمله

بالا به سطح بال چسبانده و مانع جدایش آن می‌شوند [۳]؛ مولدهای گردابه همچنین می‌توانند جریان را در حالت چسبیده به سطح حفظ نمایند. در زوایای حمله کوچک جریان روی ایرفویل به سطح آن تقریباً 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 [۴]. این پدیده به عنوان پدیده واماندگی شناخته شده است که نتایج مضر، از جمله کاهش نیروی برآ، افزایش نیروی پسای و ایجاد سر و صدای 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 گردابه است [۴].

شان و همکارانش مطالعات خود را بر روی ایرفویل NACA 0012 در زاویه حمله $\alpha = 6^\circ$ با استفاده از مولدهای گردابه فعال و منفعل جهت کنترل جریان مورد آزمایش قرار دادند [۵]. مولدهای گردابه منفعل طول چرخش را تقریباً به اندازه ۸۰٪ کم می‌کنند. از طرفی مولدهای گردابه فعال ورتیسیت‌ای قوی را در راستای جریان تولید می‌کنند که برای کنترل جریان لازم است.

هین و همکارانش اثر مولدهای گردابه نصب شده در لبه حمله روی ایرفویل OA209 را به صورت عددی و تجربی مورد آزمایش قرار دادند. با توجه به آزمایش آنها تحت شرایط واماندگی عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل افزایش یافت. علاوه بر این، بر اساس مطالعه آنها استفاده از مولدهای گردابه سبب کاهش نوسانات آیرودینامیکی حاصل از پدیده واماندگی می‌شود [۴].

دلنرو و همکارانش نیز اثر مولدهای گردابه سه‌گوش را بر روی ایرفویل در شرایط جریان آشفته و عدد رینولدز پایین مورد مطالعه و بررسی قرار دادند [۶]. آنها مولدهای گردابه را در مکان‌های متفاوتی از لبه حمله قرار دادند و اثر آن را بر نیروهای آیرودینامیکی مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج ارائه شده، استفاده از مولدهای گردابه سبب افزایش مقدار نیروی برآ و در نتیجه نیروی حداکثر برآ

چرخش هم‌راستا بهتر بوده است [۱۳]. می‌توان نتیجه گرفت که مولدهای گردابه جهت کنترل جریان و جدایش آن با تولید ورتیسیتتهایی در راستای جریان بسیار موثر هستند. مولدهای گردابه که ورتیسیتتهایی در راستای جریان به صورت چرخش غیرهم‌راستا ایجاد می‌کنند بسیار موثرتر از آنهایی هستند که ورتیسیتتهای را در راستای جریان به صورت چرخش هم‌راستا تولید می‌کنند [۱۲]. تولید ورتیسیتتهای به صورت چرخش غیرهم‌راستا یا چرخش هم‌راستا به نحوه چیدمان مولدهای گردابه بر روی سطح بستگی دارد. ورتیسیتتهای هم‌راستا هنگامی که نوک پره‌های مولدهای گردابه به سمت هم باشد به وجود می‌آیند و ورتیسیتتهای غیرهم‌راستا زمانی که نوک پره‌ها از هم دور باشند ایجاد می‌شوند.

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

استفاده از چیدمان مختلف مولدهای گردابه روی یک مدل جهت درک بیشتر اثر چیدمان مولدهای گردابه 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 گردابه روی اجسام تقارن محور به‌ویژه جسم تقارن محور سابوف صورت نگرفته است. در این تحقیق، به صورت تجربی و با استفاده از پراب پنج حفره^۱، اثر چیدمان‌های مختلف مولدهای گردابه را روی زیرسطحی استاندارد سابوف مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مولد گردابه

انواع مختلفی از مولدهای گردابه وجود دارد. یکی از متداولترین نوع مولدهای گردابه، مولد گردابه به شکل تیغ یک بال دلتا است. به دلیل سادگی در طراحی و شکل آن یکی از پرکاربردترین نوع مولدهای گردابه می‌باشد. یکی از مهمترین نکات در استفاده از مولدهای گردابه، اندازه و ابعاد آن است [۸-۹]. در این تحقیق از مولدهای گردابه با ابعاد

می‌شود، اما مولدهای گردابه اثر چندانی بر روی نیروی پسا نداشته و در بعضی شرایط تقریباً بی‌اثر بوده‌اند، که علت این امر را می‌توان به نحوه چیدمان مولدهای گردابه بر روی ایرفویل ذکر کرد؛ زیرا این چیدمان باعث تداخل بین ورتیسیتتهای ایجاد شده توسط مولدهای گردابه با همدیگر و همچنین تداخل با لایه مرزی شده که باعث افزایش شدت آشفتگی می‌شود [۶]. همچنین ون در براگ 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 [۷].

منشادی و همکاران اثر مولدهای گردابه یک ردیفه را روی بدنه پایه و بدون ملحقیات یک جسم تقارن محور به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند [۸-۹]. آنها برای بررسی فیزیک جریان روی بدنه با حضور مولدهای گردابه تک ردیفه آزمایش‌های آشکارسازی به‌وسیله روغن و رنگدانه را انجام دادند. همچنین، آنها برای بررسی سه‌بعدی اثر مولدهای گردابه روی بدنه از نرم‌افزار متن‌باز اپن‌فوم استفاده نمودند. نتایج تجربی و عددی آنها نشان داد که مولدهای گردابه به‌طور قابل توجهی قدرت گردابه عرضی و نیروی پسا را کاهش می‌دهد. همچنین منشادی و همکاران اثر مولدهای گردابه یک ردیفه را روی گردابه‌های تعل اسبی ایجاد شده در محل اتصال برجک به بدنه یک جسم تقارن محور به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه بررسی قرار دادند [۱۰]. نتایج تجربی و عددی آنها نشان داد که مولدهای گردابه یک ردیفه به‌طور قابل توجهی قدرت گردابه نعل اسبی و در نتیجه نویز و نیروی پسا را کاهش می‌دهد.

اکاتریناریس اثر چیدمان مولدهای گردابه را بر روی عملکرد ایرفویل‌ها و بال‌ها مورد آزمایش قرار دادند، که مشاهده نمودند اضافه کردن مولدهای گردابه باعث افزایش نیروی لیفت و کاهش پسا می‌شود؛ در واقع با توجه به نتایج چیدمان مولدهای گردابه به صورت چرخش غیرهم‌راستا بسیار موثرتر از چرخش هم‌راستا است [۱۱]. همچنین کاموکاری و همکارانش اثر مولدهای گردابه را روی ایرفویل در شرایط جریان آشفتنه بررسی نمودند [۱۲]، که آنها نیز مشاهده نمودند مولدهای گردابه چرخش غیرهم‌راستا علاوه بر، افزایش انتقال مومنتم به سمت لایه مرزی، باعث تولید پسای کمتری نیز می‌شوند. در بعضی موارد، مشاهده شده است که عملکرد ایرفویل به‌تنهایی از ایرفویل با

اثر شناوری طولی در امتداد اتاق آزمون را از بین می‌برد. ضریب انسداد مدل بعلاوه پایه نگهدارنده آن در اتاق آزمون تونل باد برابر ۴/۹٪ است. این مقدار کمتر از مقدار استاندارد (۵٪) بوده و لذا قابل اطمینان است. تمامی آزمایش‌های این تحقیق در سرعت ۱۶ m/s انجام می‌شود. شدت اغتشاش‌های اتاق آزمون در این سرعت حدود ۰/۲۵ درصد می‌باشد [۱۴].



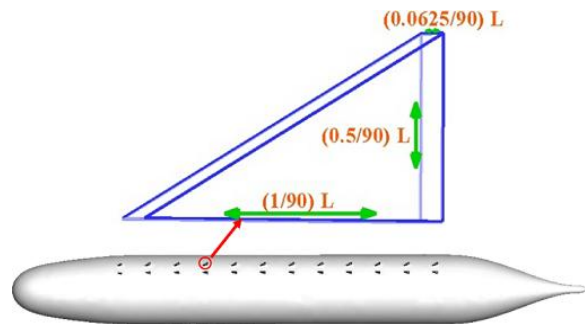
شکل (۳): نمای از تونل باد دانشگاه یزد.

جهت استفاده از پراب پنج حفره احتیاج به اندازه‌گیری پنج کانال فشار است. به این منظور از یک دستگاه مبدل فشار ۱۵ کاناله استفاده می‌شود. حسگرهای فشار این دستگاه قادر به اندازه‌گیری حداکثر فشار دیفرانسیلی $\pm 1,270 \text{ Pa}$ با دقت $\pm 3 \text{ Pa}$ می‌باشند. داده‌های اندازه‌گیری شده به صورت مستقیم از طریق یک کارت مبدل ولتاژ آنالوگ به دیجیتال ۱۲ بیتی وارد رایانه و سپس نرم‌افزار شده و محاسبات لازم روی آنها انجام می‌شود. با توجه به روابط پراب پنج حفره مقادیر عدم قطعیت نسبی برای فشار و سرعت متوسط به ترتیب برابر ۰/۱۶ و ۸/۷ به دست آمده است.

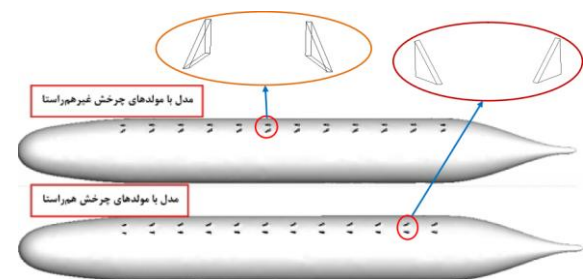
۳-۱- معرفی پراب پنج حفره و کالیبراسیون آن

پراب‌های چند حفره یکی از وسایل آزمایشگاهی برای تعیین مشخصه‌های جریان می‌باشند. استفاده از پراب‌های چند حفره از دهه دوم قرن ۲۰ شروع شد و تا اکنون نیز ادامه دارد. از این پراب‌ها نه تنها در محیط آزمایشگاه بلکه در هواپیماها و بالگردها نیز استفاده می‌شود. پراب‌های چند حفره به منظور تعیین مولفه‌های سرعت جریان، جهت

طول $\frac{1}{90}$ ، ارتفاع $\frac{0.5}{90}$ و عرض $\frac{0.0625}{90}$ استفاده شده است (شکل ۱). یکی دیگر از نکات مهم در رابطه با استفاده از مولدهای گردابه، نوع چیدمان آنهاست، که به صورت چیدمان غیرهم‌راستا و چیدمان هم‌راستا می‌باشند (شکل ۲).



شکل (۱): ابعاد مولد گردابه نصب شده بر روی زیرسطحی سابوف.



شکل (۲): چیدمان‌های مختلف مولد گردابه نصب شده بر روی زیرسطحی سابوف.

۳-۲ تونل باد و دستگاه فشارسنج

تمامی آزمایش‌های این تحقیق در تونل باد مدار باز دانشگاه یزد انجام شده‌اند (شکل ۳). این تونل باد دارای حداکثر توان فن ۳۲kW و حداکثر سرعت ۳۰ m/s در داخل اتاق آزمون می‌باشد. اتاق آزمون این تونل باد دارای سطح مقطع $457 \times 457 \text{ mm}$ و طول آن 1200 mm بوده و دارای چهار پنجره از جنس شیشه پلکسی شفاف با ابعاد $572 \times 267 \text{ mm}$ است. برای جلوگیری از تداخل لایه مرزی‌های ایجاد شده توسط دیواره‌های جانبی، بین دو دیوار گوشه‌هایی با زاویه ۴۵ درجه نصب شده است. اندازه این گوشه‌ها در امتداد اتاق آزمون کوچک می‌شود و این باعث بزرگ شدن سطح مقطع اتاق آزمون شده و تا حدودی

اندازه‌گیری به دست آیند. این روابط به صورت ضرایب بی‌بعد استخراج می‌شوند که با توجه به زاویه جریان می‌توان از آنها استفاده کرد. بعد از فرایند کالیبراسیون، اندازه‌گیری پنج فشار مربوط به پنج حفره پراب جهت تعیین زاویه جریان باید انجام شود. برای کالیبراسیون از جریان هوای یک تونل باد مدار باز استفاده شده است. با استفاده از توری و لانه زنبوری در این تونل باد از یکنواخت بودن جریان آن اطمینان حاصل شده است. در این تحقیق جهت کالیبره نمودن پراب پنج حفره، از موارد زیر استفاده شده است: (۱) مکانیزم زاویه‌دهنده پراب، (۲) جریان مستقیم ایجاد شده در اتاق آزمون تونل باد، (۳) دستگاه اندازه‌گیری فشار، (۴) نرم افزار اخذ داده‌ها. در شکل ۵ تجهیزات کالیبراسیون پراب پنج حفره مشخص شده است. شکل (۵-الف) پراب پنج حفره، (۵-ب) دستگاه اندازه‌گیری فشار (مبدل فشار ۱۵ کاناله) و (۵-ج) مکانیزم زاویه‌دهنده پراب نشان داده شده است.

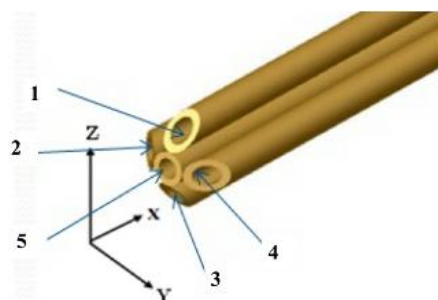


شکل (۵): تجهیزات مورد استفاده در کالیبراسیون پراب پنج حفره.

به جریان مقادیر فشارهای پراب اخذ شده و با استفاده از فشار استاتیک و کل به‌دست‌آمده از یک پراب پیتوت اعداد بدون بعد حاکم بدست می‌آیند. این عمل برای زوایای مختلف پیچ و یاو تکرار می‌شود. در نهایت منحنی کالیبراسیون حاکم بر پراب بر اساس چهار پارامتر پیچ و یاو و ضرایب بدون بعد به‌دست خواهد آمد. برای این‌که بتوان زوایای پیچ و یاو را به فشارهای خوانده شده توسط سوراخ‌های مختلف ربط داد، نیاز است تا ضرایب بدون بعد فشار تعریف شوند. برای تعریف ضرایب بدون بعد فشار چند روش وجود دارد. در این تحقیق از روابط ارائه‌شده توسط

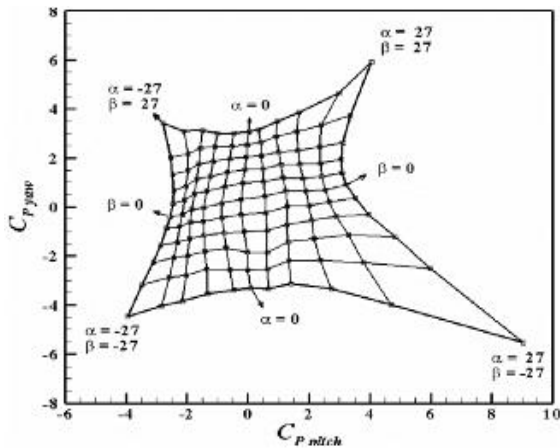
جریان و فشار کل مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این پراب می‌توان جهت بررسی میدان‌های گردابه‌های سه‌بعدی استفاده کرد. با توجه به مزایای پراب پنج حفره نسبت به روش‌های اندازه‌گیری دیگر، در تحقیق حاضر از یک پراب پنج حفره جهت بررسی میدان گردابه‌ای سه‌بعدی استفاده شده است.

اصول عملکردی این پراب‌ها بر اساس توزیع فشار بر روی سطح جلویی یک جسم مدور بوده که در جریان سیال قرار داده شده است. توزیع فشار بر روی سطح دارای یک مقدار ماکزیمم در نقطه سکون جریان بوده و مقدار فشار با حرکت به سمت پایین‌دست بر روی سطح مدل کاهش می‌یابد. برای اجسام گرد فشار ماکزیمم، همان فشار کل p_0 است که از مجموع فشار استاتیک (p_∞) و فشار دینامیکی (q) دور از جسم به دست می‌آید و کمترین میزان فشار در نواحی که شیب جسم موازی با راستای جریان آزاد قرار گیرد، اتفاق می‌افتد. با توجه به این نکته می‌توان با اندازه‌گیری فشار نقاط مختلف بر روی سطح یک جسم مدور، زاویه جریان نسبت به جسم را تعیین کرد. پرابی که برای مطالعه تجربی حاضر در نظر گرفته شده از پنج لوله فلزی با قطر خارجی ۱ mm تشکیل شده است. شماتیکی از این پراب در شکل (۴) نشان داده شده است. این لوله‌ها با زاویه ۴۵ درجه قطع شده و در کنار همدیگر قرار داده شده‌اند.



شکل (۴): شماتیک پراب پنج حفره مورد استفاده به‌همراه شماره‌گذاری سوراخ‌های آن.

یک پراب پنج حفره قبل از استفاده باید کالیبره شود. کالیبراسیون به این معناست که روابط بین فشارهای اندازه‌گیری شده توسط پراب و زوایای جریان در مکان



شکل (۶): منحنی کالیبراسیون پراب پنج حفره.

۲-۳- روند آزمایش

روند کلی انجام آزمایش به این صورت است که پس از کالیبره نمودن پراب پنج حفره مورد استفاده، پراب مزبور را در تونل باد قرار داده و با عبور جریان از روی مدل با جابه جا نمودن پراب پنج حفره در سرتاسر نقاط در صفحه‌ای عمود بر جریان مقادیر فشار توسط هر سوراخ پراب به کمک ترانس‌دیوسر فشار خوانده و ثبت می‌شود.

۴- بررسی و تحلیل نتایج

بررسی تجربی رفتار گردابه‌ای اطراف اجسام تقارن محور با استفاده از پراب پنج حفره، دید مناسبی را نسبت به نحوه شکل‌گیری و اندازه گردابه‌های تشکیل شده را در اطراف این اجسام در زوایای حمله مختلف نشان می‌دهد. در ادامه به بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج پرداخته شده است.

۴-۱- نتایج حاصل از پراب پنج حفره

در این تحقیق به منظور بررسی کامل اثر چیدمان مختلف مولدهای گردابه بر رفتار جریان در اطراف یک مدل تقارن محور (زیرسطحی سابوف)، از روش تجربی با استفاده از پراب پنج حفره استفاده شده است. با استفاده از پراب‌های چند حفره مشخصه‌های جریان تعیین شده است. در این مرحله برای بررسی گردابه‌های عرضی، ابتدا مدل بدون مولد گردابه در زاویه حمله ۱۵ درجه و ۲۰ درجه در تونل باد قرار گرفته، و در مقاطع مورد نظر اندازه‌گیری فشار و سرعت صورت گرفته است. سپس مولدهای گردابه چند ردیفه با چیدمان‌های مختلف (چرخش غیرمراستا و چرخش

تراستر و یوکوم [۱۵] استفاده شده است. ضرایب بدون بعد فشار به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شوند.

$$C_{P_{\alpha}} = \frac{P_1 - P_3}{P_5 - \bar{P}}$$

$$C_{P_{\beta}} = \frac{P_2 - P_4}{P_5 - \bar{P}}$$

$$C_{P_{total}} = \frac{P_5 - P_{total}}{P_5 - \bar{P}} \quad (1)$$

$$C_{P_{static}} = \frac{\bar{P} - P_{static}}{P_5 - \bar{P}}$$

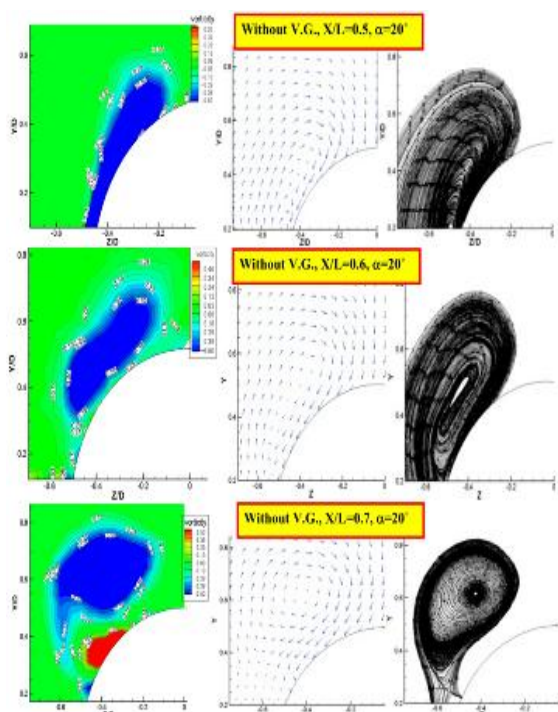
$$\bar{P} = \frac{(P_1 + P_2 + P_3 + P_4)}{4}$$

در این روابط پارامترهای $C_{P_{\beta}}$ و $C_{P_{\alpha}}$ به ترتیب ضرایب فشار بی‌بعد به ترتیب برای زاویه جریان در راستای قائم (پیچ) و راستای افقی (یاو) هستند که به واسطه آنها می‌توان زوایای پراب را در مرحله کالیبراسیون و زوایای جریان را در مرحله بازیابی پارامترهای جریان به فشارهای سوراخ‌های پراب پنج حفره ارتباط داد. همچنین پارامترهای $C_{P_{total}}$ و $C_{P_{static}}$ به ترتیب ضرایب فشار بی‌بعد سکون و استاتیک هستند که به واسطه این ضرایب می‌توان فشارهای سکون و استاتیک را در هر نقطه به‌دست آورد سپس با استفاده از دو فشار مذکور و به کمک رابطه (۲) مقدار سرعت را در هر نقطه به‌دست آورد.

$$|V| = \sqrt{\frac{2(P_{tot} - P_{stat})}{\rho}} \quad (2)$$

به‌طور کلی، فرآیند کالیبراسیون پراب پنج حفره به این صورت است که ابتدا پراب پنج حفره درون تونل باد مدار باز بر روی دستگاه زاویه دهنده پراب نصب شده و سوراخ‌های فشار پراب پنج حفره به دستگاه مبدل الکترونیکی فشار متصل می‌شوند. پس از آن با قرار دادن پراب در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف فشارها در هر موقعیت اندازه‌گیری شده و به کمک روابط ذکر شده در (۱) فشارها به ضرایب فشار بی‌بعد در هر نقطه تبدیل می‌شوند. پس از انجام فرآیند کالیبراسیون و به‌دست آوردن ضرایب بی‌بعد به شکلی که گفته شد ضرایب کالیبراسیون در یک منحنی به عنوان نتیجه رسم می‌شوند. منحنی حاصل به منحنی کالیبراسیون معروف است. در شکل (۶) نمودار کالیبراسیون به‌دست آمده از فرآیند کالیبراسیون پراب پنج حفره در سرعت جریان ورودی ۱۶ m/s نشان داده شده است.

درجه نشان داده شده است. همان‌طور که اشاره شد با افزایش زاویه حمله ورتیسیتته و گردابه اطراف مدل رشد یافته و بزرگتر می‌شود که با توجه به شکل می‌توان مشاهده نمود که در دو حالت مختلف بدنه مدل اندازه گردابه‌ها افزایش یافته است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که بدنه مدلی که مولد گردابه با چیدمان چرخش غیرهم‌راستا روی آن نصب شده است مقدار اندازه گردابه و ورتیسیتته کمتر شده و ناحیه جدایش کمتری را اطراف بدنه ایجاد می‌کند. این امر نشان می‌دهد که مولد گردابه با چیدمان چرخش غیرهم‌راستا در کنترل لایه مرزی و کاهش گردابه‌های اطراف بدنه و همچنین در کاهش جدایش بسیار موثر بوده و در نهایت باعث کاهش پسای بدنه می‌شوند. با توجه به نتایج استفاده از مولد گردابه با چیدمان چرخش غیرهم‌راستا سبب کاهش جریان گردابه‌ای اطراف مدل شده و جریان آرام‌تر و منظم‌تری را به سمت انتهای مدل هدایت می‌کند. همچنین موجب می‌گردد که مرکز گردابه به بدنه مدل نزدیک‌تر شود و در نهایت جدایش کمتری روی سطح بدنه مدل ایجاد شود.

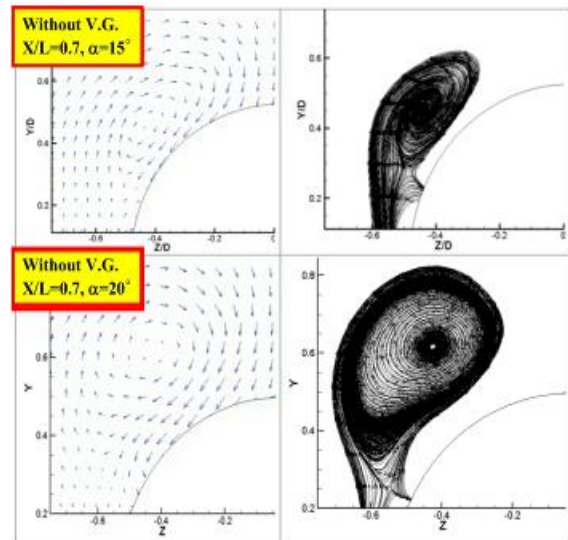
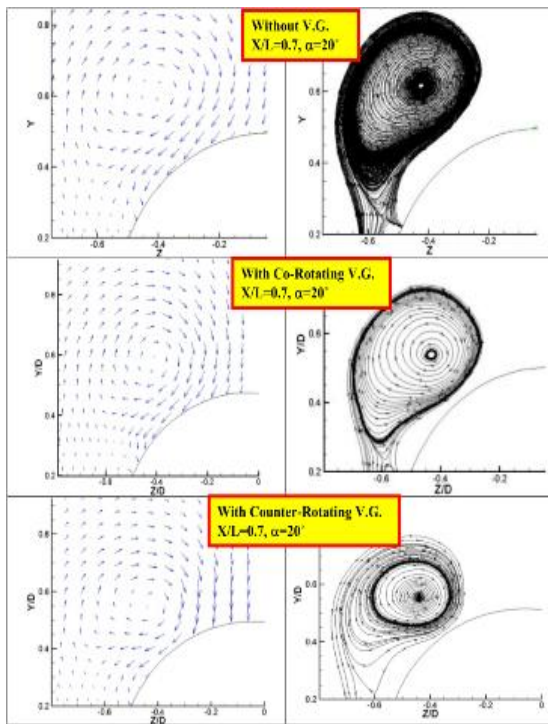


شکل (۷): کانتور ورتیسیتته (چپ)، بردار سرعت (وسط) و خطوط جریان (راست) برای مقاطع $(X/L = 0.5, 0.6, 0.7)$ در زاویه حمله $(\alpha = 20^\circ)$ برای مدل پایه.

هم‌راستا) روی مدل قرار گرفته و فشار و سرعت در همان مقاطع و زوایای مورد نظر اندازه گرفته شده است.

شکل ۷ کانتور ورتیسیتته (چپ)، بردار سرعت (وسط) و خطوط جریان (راست) برای مقاطع $(X/L = 0.5, 0.6, 0.7)$ در زاویه حمله $(\alpha = 20^\circ)$ برای مدل پایه نشان داده شده است. همچنین در شکل ۸ بردار سرعت (چپ) و خطوط جریان (راست) برای مقطع $(X/L = 0.7)$ در زوایای حمله $(\alpha = 15, 20^\circ)$ برای مدل پایه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با حرکت از قسمت نوک مدل به انتهای آن یعنی به سمت پاشنه مدل ورتیسیتته‌ها و گردابه‌ها شروع به رشد می‌کنند و اندازه گردابه‌ها افزایش می‌یابند. علاوه بر این، همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش زاویه حمله گردابه‌ها و ورتیسیتته‌های اطراف مدل بزرگتر شده و رشد بیشتری پیدا می‌کنند. در واقع بردارهای سرعت و خطوط جریان در اثر زاویه حمله از سطح جسم جدا شده و دوباره به سطح بدنه مدل می‌چسبند و ناحیه چرخشی را در اطراف مدل ایجاد می‌کنند. این ناحیه جدا شده و چرخشی در واقع همان گردابه‌های اطراف مدل می‌باشند که در اثر افزایش زاویه حمله مدل نسبت به جریان ورودی به مدل ایجاد می‌شود. همچنین با توجه به نتایج ملاحظه می‌شود که با حرکت به سمت پاشنه مدل و افزایش زاویه حمله مرکز چرخش ورتیسیتته از مدل جدا شده و اندازه گردابه بزرگتر می‌شود، که نشان دهنده جریان جدا شده بیشتری بر روی سطح مدل می‌باشد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که گردابه‌ها با حرکت به سمت قسمت انتهای مدل، رشد کرده و محدوده وسیع‌تری اطراف مدل را دربر می‌گیرند. این گردابه‌ها باعث ایجاد نویز و سر و صدا و کاهش راندامان می‌شود. در واقع گردابه‌های عرضی که بزرگترین و مهمترین گردابه‌های اطراف بدنه مدل هستند که تاثیر بسزایی در افزایش پسا و سر و صدا یا نویز دارند.

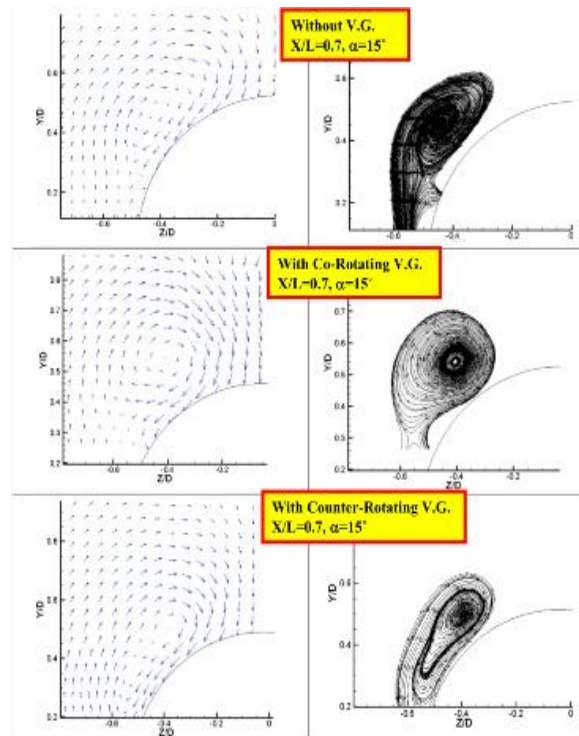
شکل‌های (۹-۱۰) خطوط جریان و کانتور ورتیسیتته برای جسم تقارن محور در سه حالت مختلف بدنه (بدنه پایه یا بدنه بدون مولد گردابه (بالا)، بدنه با مولد گردابه با چیدمان چرخش هم‌راستا (وسط) و بدنه با مولد گردابه با چیدمان چرخش غیرهم‌راستا (پایین)) و در مقطع $(X/L = 0.7)$ و به ترتیب در دو زاویه حمله ۱۵ و ۲۰



شکل (۸): خطوط جریان (راست) و بردار سرعت (چپ) برای مدل بدون مولد گردابه در مقطع $(X/L=0.7)$ و زوایای حمله $(\alpha = 15^\circ)$ (بالا) و $(\alpha = 20^\circ)$ (پایین).

شکل (۱۰): خطوط جریان و بردار سرعت برای مدل بدون مولد گردابه (بالا) و مدل با مولد گردابه (پایین) در مقطع $(X/L=0.7)$ و در زوایای حمله ۲۰ درجه.

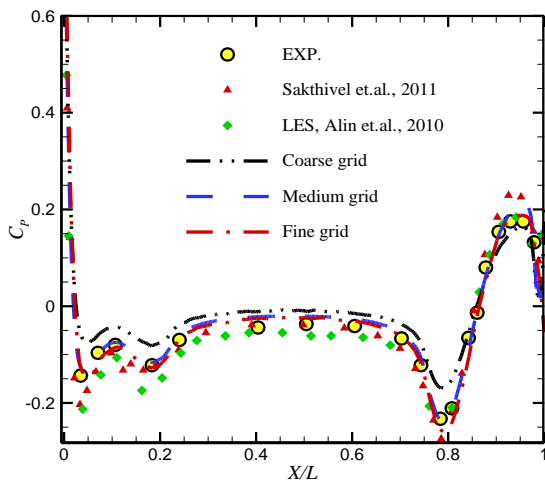
همان‌طور که از شکل ۱۱ مشخص است استفاده از مولدهای گردابه با چیدمان غیرهم‌راستا فاصله مرکز گردابه از محور جسم تقارن محور را کاهش داده است. همچنین با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد که برای مدل با مولدهای گردابه چرخش هم‌راستا بیشترین کمینه مقدار نسبت سرعت در مرکز کانتور توزیع سرعت را دارا می‌باشد. همان‌طور که در بالا نیز اشاره شد، به دلیل این‌که ورتیسیت‌های ایجاد شده توسط این نوع چیدمان (چرخش هم‌راستا)، باعث تقویت و افزایش قدرت ورتیسیت‌های بعدی شده و در نهایت سبب افزایش اندازه گردابه‌ها و نیروی پسا و جدایش جریان می‌گردد. اما مولدهای گردابه با چرخش غیرهم‌راستا موجب انتقال انرژی بالای لایه مرزی به داخل آن شده و با انرژی‌دهی به لایه مرزی از جدایش جریان و رشد جریان گردابه‌ای اطراف آن جلوگیری می‌کند.



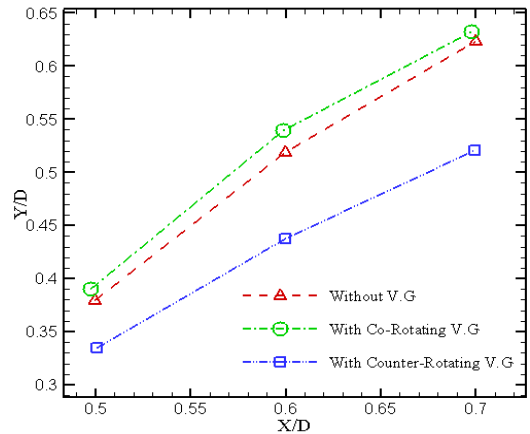
شکل (۹): خطوط جریان و بردار سرعت برای مدل بدون مولد گردابه (بالا) و مدل با مولد گردابه (پایین) در مقطع $(X/L=0.7)$ و در زوایای حمله ۱۵ درجه.

که نشان‌دهنده قابلیت نرم‌افزار ذکرشده در شبیه‌سازی جریان هیدرودینامیکی اطراف یک جسم زیرسطحی می‌باشد. علاوه بر این، با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌گردد که استفاده از مولد ورتکس با چیدمان غیرهم‌راستا باعث کاهش پسا تا حدود ۸/۸٪ بوده که تایید کننده نتایج تجربی حاصل از پراب پنج حفره می‌باشد.

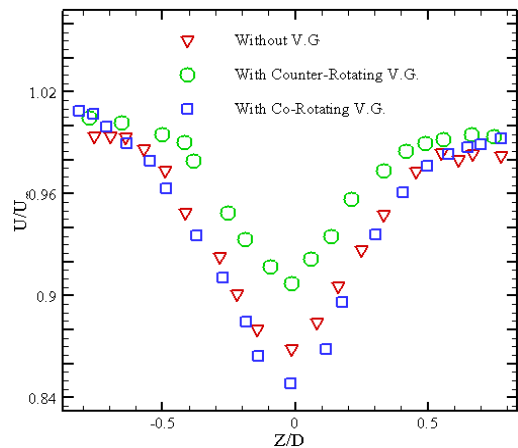
خطوط جریان برای سه مدل (بدون مولد ورتکس، با مولد ورتکس هم‌راستا و با مولد ورتکس غیرهم‌راستا) در زاویه حمله ۲۰ درجه در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۵ و نتایج نیرویی ارائه شده در جدول ۲ مشاهده می‌گردد که هرچه از سمت نوک مدل به انتهای آن یعنی پاشنه مدل حرکت کرده، مرکز گردابه ایجاد شده از سطح جسم فاصله گرفته و جریان جدا شده روی سطح مدل افزایش یافته و ناحیه بیشتری را دربر می‌گیرد. همچنین مشاهده می‌شود که برای مدل با چیدمان مولد ورتکس غیرهم‌راستا جریان جدا شده کمتر بوده و مرکز گردابه به سطح جسم نزدیک‌تر می‌باشد. در واقع مولد ورتکس با چیدمان غیرهم‌راستا با کنترل جریان لایه مرزی قدرت ورتیسسته را کم نموده (قدرت ورتیسسته برای مدل بدون مولد ورتکس در زاویه حمله و جانبی به ترتیب برابر با ۵۵۰۰۰۰ و ۶۰۰۰۰۰ و برای مدل با مولد ورتکس غیرهم‌راستا به ترتیب برابر با ۵۰۰۰۰۰ و ۴۵۰۰۰۰ می‌باشد)، از جدایش جریان و رشد گردابه‌های عرضی جلوگیری کرده و در نتیجه باعث کاهش نیروی پسا می‌گردد.



شکل (۱۳): مقایسه توزیع تغییرات ضریب فشار روی بدنه زیرسطحی سابوف با نتایج عددی و تجربی موجود.



شکل (۱۱): مقایسه فاصله مرکز گردابه از محور جسم تقارن محور برای زاویه حمله ۱۵ و ۲۰ درجه.



شکل (۱۲): مقایسه نسبت سرعت‌ها در $(\frac{Y}{D}=0)$ برای مدل بدون مولد گردابه و مدل با چیدمان‌های مختلف مولد گردابه (چرخش هم‌راستا و غیرهم‌راستا).

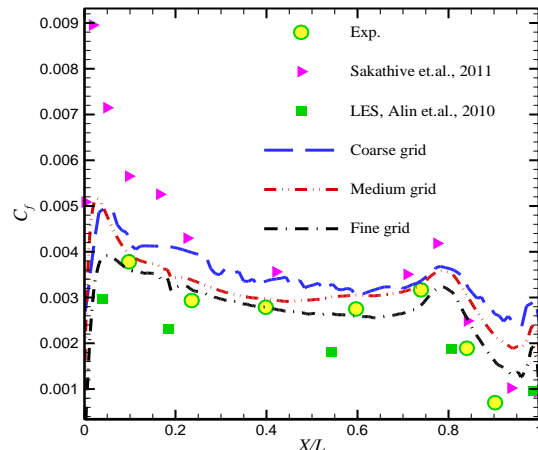
در ادامه جهت تایید نتایج تجربی حاصل از پراب پنج حفره، نتایج نیرویی حاصل از نرم‌افزار متن باز این فوم ارائه شده است.

ابتدا جهت اعتبار سنجی نتایج عددی، نتایج حاصل را با سایر نتایج عددی و تجربی موجود مقایسه شد. برای نشان دادن استقلال نتایج از شبکه، سه نوع شبکه‌بندی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته شده است (شبکه ریز، متوسط و درشت). منحنی ضریب فشار (شکل ۱۳)، ضریب اصطکاک (شکل ۱۴) و مقدار ضریب پسای ارائه شده در جدول ۱ برای هر سه نوع شبکه با نتایج تجربی و عددی موجود مقایسه شده است. همین‌طور که ملاحظه می‌گردد نتایج حاصل تطابق و هم‌خوانی خوبی با نتایج تجربی و عددی معتبر دارد

جدول (۲): مقایسه ضریب پسا برای مدل زیرسطحی

سابوف در زاویه حمله بیست درجه

| %DR (درصد کاهش درگ) | $\alpha=20^\circ$ | ضریب پسا |
|---------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| ٪۰ | ۰/۳۶۳۴ | حل حاضر (بدون مولد ورتکس) |
| ٪۸/۸ | ۰/۳۳۱۲ | حل حاضر (با مولد ورتکس غیرهمراستا) |
| -٪۶/۱ | ۰/۳۸۵۴ | حل حاضر (با مولد ورتکس همراستا) |



شکل (۱۴): مقایسه توزیع ضریب اصطکاک روی بدنه

زیرسطحی سابوف با نتایج عددی و تجربی موجود.

۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، به منظور بررسی فیزیک میدان جریان اطراف بدنه یک جسم تقارن محور با استفاده از چیدمان‌های مختلف مولدهای گردابه به صورت تجربی از پراب پنج حفره استفاده شده است. همان‌طور که ذکر شد بر روی بدنه تقارن محور گردابه‌هایی ایجاد می‌گردد که این گردابه‌ها در عملکرد مدل و مانورپذیری آن و در نهایت روی نیروی پسا و مصرف سوخت آن بسیار موثر می‌باشد. برای کاهش این جریان‌های گردابه‌ای اطراف مدل از مولد گردابه با چیدمان‌های مختلف استفاده شده است. با انجام آزمایشات تجربی بر روی مدل نتایجی به شرح زیر به دست آمد:

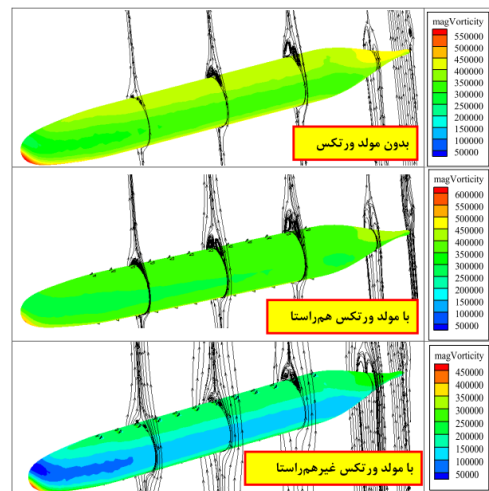
۱) مولدهای گردابه با چیدمان غیرهمراستا باعث کاهش قدرت ورتیسسته و همچنین کاهش جریان گردابه‌ای اطراف مدل در زوایای حمله زیاد می‌شوند،

۲) استفاده از مولدهای گردابه غیرهمراستا موجب کاهش گردابه‌های عرضی اطراف بدنه مدل و همچنین کاهش فاصله مرکز گردابه از محور مدل می‌شوند،

۳) در زوایای حمله $10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ ، مولدهای گردابه غیرهمراستا تقریباً به طور کامل جدایش ثانویه را روی سطح مدل حذف کرده‌اند،

۴) مولدهای گردابه همراستا به دلیل افزایش جریان گردابه‌ای اطراف مدل باعث افزایش نیروی پسا نیز می‌شوند،

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



شکل (۱۵): کانتور فشار روی سطح مدل و خطوط جریان

روی بدنه زیرسطحی سابوف در مقاطع مختلف و در زاویه حمله ۲۰ درجه (بدون مولد ورتکس (بالا)، با مولد ورتکس همراستا (وسط) و با مولد ورتکس غیرهمراستا (پایین)).

جدول (۱): مقایسه ضریب پسا برای مدل زیرسطحی

سابوف در زاویه حمله صفر درجه با نتایج تجربی موجود.

| ضریب پسا | $\alpha=0^\circ$ | درصد خطا |
|--------------------------|------------------|----------|
| حل حاضر (شبه درشت) | ۰/۰۹۸۴ | ٪۱۴/۱۲ |
| حل حاضر (شبه متوسط) | ۰/۰۸۹۴ | ٪۳/۷۱ |
| حل حاضر (شبه ریز) | ۰/۰۸۸۹ | ٪۳/۱۳ |
| تجربی (لیو و هوانگ ۱۹۹۸) | ۰/۰۸۶۲ | - |

10. Dehghan Manshadi, M., Hejranfar, K., and Farajollahi, A.H. "Numerical and Experimental Investigation of Hydrodynamic Behavior of a Horseshoe Vortex around a Sail", J. M.E., Vol. 12, No. 24, pp. 1-11, 2017 (In Persian).
11. Ekaterinaris, J.A. "Prediction of Active Flow Control Performance on Airfoils and Wings", J. A.S. & Tech., Vol. 8, No. 3, pp. 401-410, 2004.
12. Camocardi, E.M., Francois, G.D., Mariano, A.M., Martinez, and Colman, J. "Vortex Generator Effect on Low Reynolds Number Airfoil in Turbulent Flow", J. BBAA., Italy, Vol. 2, No. 1, pp. 50-65, 2012.
13. Gursul, I., Vardaki, E., Margaris, P., and Wang, Z. "Control of Wing Vortices", The Int. Conf. First Active Flow Control, Berlin, Germany, pp. 27-29, 2006.
14. Dehghan Manshadi, M., Farajollahi, A.H., and Janipour, H. "Experimental Investigation of Behavior Vortical Flow around an Axisymmetric Streamlined Vehicle, Using the Five Hole Probe", J. Mech.T.U., Vol. 46, No. 4, pp. 103-111, 2017 (In Persian).
15. Treaster, A.L. and Yocum, A.M. "The Calibration and Application of five-hole Probes", ISA Transactions, Vol. 18, No. 3, 1979.
16. Zhi-Hua, L., Xiong, Y., Wang, Z., and Cheng-xu, T. "Experimental Study on Effect of a New Vortex Control Baffle and Its Influencing Factor", J. Chin. Ocean Eng., Vol. 25, No.1, pp. 83-96, 2011.
17. Sakthivel, R., Vengadesan, S., and Bhattacharyya, S.K. "Application of Non-linear κ - ϵ Turbulence Model in Flow Simulation over Underwater Axisymmetric Hull at Higher Angle of Attack", J. NAM Eng., Vol. 8, No.3, pp. 149-163, 2011.
18. Alin, N., Bensow, R.E., Fureby, C., Huuva, T., and Svennberg, U. "Current Capabilities of DES and LES for Submarines at Straight Course", J. SR., Vol. 54, No. 3, pp. 184-196, 2010.

۶) مولدهای گردابه با چیدمان غیرهم‌راستا دارای کمترین مقدار کمینه نسبت سرعت در مرکز نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد.

۶- مراجع

1. Anderson, J.D., "Fundamentals of Aerodynamics", Third Ed., McGraw-Hill, NY., 2001.
2. Anand, U., Sudhakar, Y., Thileepanragu, R., Gopinathan V.T., and Rajasekar R. "Passive Flow Control over NACA0012 Aerofoil, Using Vortex Generators", The Int. Conf. Fluid Mech. and Fluid Power, December 16-18, IIT Madras, Chennai, India. FMFP10-FP-12, 2010.
3. Gursul, I., Vardaki, E., Margaris, P., and Wang Z. "Control of Wing Vortices", The Int. Conf., First Active Flow Control, Berlin, Germany, September 27-29, 2006.
4. Heine B., Mulleners K., Gardner A., and Mai H. "On the Effects of Leading Edge Vortex Generators on an OA209 Airfoil", The Int. Conf. ODAS, Berlin, Germany, 8 october, 2009.
5. Shan, H., Jiang, L., Liu, C., Love, M., and Maines B. "Numerical Study of Passive and Active Flow Separation Control over a NACA0012 Airfoil", J. Comput. Fluids, Vol. 37, No. 8, pp. 975-992, 2008.
6. Juan, S. Delnero, J., Maranon D.L., and Bacchi, F., "Experimental Determination of the Influence of Turbulent Scale on the Lift and Drag Coefficients of Low Reynolds Number Airfoils", J. LAAR., Argentina, Vol. 35, No. 2, pp.183-188, 2005.
7. Van der, Burg, J.W., Maseland, J.E.J., and Brandsma, F.J. "Low Speed Maximum Lift and Flow Control", J. AST, Vol. 8, No.2, pp. 389-400, 2004.
8. Dehghan Manshadi, M., Hejranfar, K., and Farajollahi, A.H. "Numerical and Experimental Investigation of Effect of Vortex Generators on Flow over Suboff Bare Hull Model", MM Eng., Vol. 15, No. 6, pp. 81-90, 2015 (In Persian).
9. Dehghan Manshadi, M., Hejranfar, K., and Farajollahi, A.H. "Effect of Vortex Generators on Hydrodynamic Behavior of an Underwater Axisymmetric Hull at High Angles of Attack", J. Vis., Vol. 20, No. 3, pp. 559-579, 2017.