

ارزیابی رفتار گردابه‌های بال مثلثی در زوایای حمله بالا با آشکارسازی لیزری و حل عددی

مجتبی دهقان منشادی^۱، مهدی فیضیان^۲، مهرداد بزاززاده^۳، مهدی ایل‌بیگی^۴

۱ دانشیار مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، dehghanmanshadi@gmail.com

۲ کارشناس ارشد مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

۳ دانشیار مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

۴ دانشجوی دکتری مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۱۷

چکیده

در این پژوهش جریان گردابه‌ای روی بال مثلثی با زاویه پسرگرای ۷۰ درجه و تأثیر تغییرات زاویه حمله بر گردابه‌های تشکیل‌شده روی بال مثلثی به کمک تونل دود و نور لیزر به‌روشنی آشکارسازی جریان بررسی شده است. برای این منظور، از مدل اسپالارت آلماراس نرم‌افزار فلونت برای بررسی عددی استفاده شده است. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تغییرات زاویه حمله بیشترین اثر را بر گردابه‌های تشکیل‌شده روی بال می‌گذارند، لذا در این پژوهش تأثیر زاویه حمله بر اندازه، مکان فروپاشی گردابه و ایجاد پدیده واماندگی روی بال بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش زاویه حمله سبب بزرگتر شدن گردابه‌های روی بال و افزایش فاصله مرکز گردابه از سطح می‌شود. بزرگتر شدن گردابه سبب افزایش نیروی برا و بالارفتن قدرت مانور هواپیما می‌شود. زاویه حمله‌های بالا بی‌نظمی ناگهانی در ساختار گردابه لبه حمله ایجاد می‌کنند که فروپاشی گردابه گفته می‌شود و باعث کاهش قدرت مانور هواپیما می‌گردد.

واژگان کلیدی

آشکارسازی جریان، بال مثلثی، زاویه حمله، فروپاشی گردابه، زاویه پسرگرای

۱. مقدمه

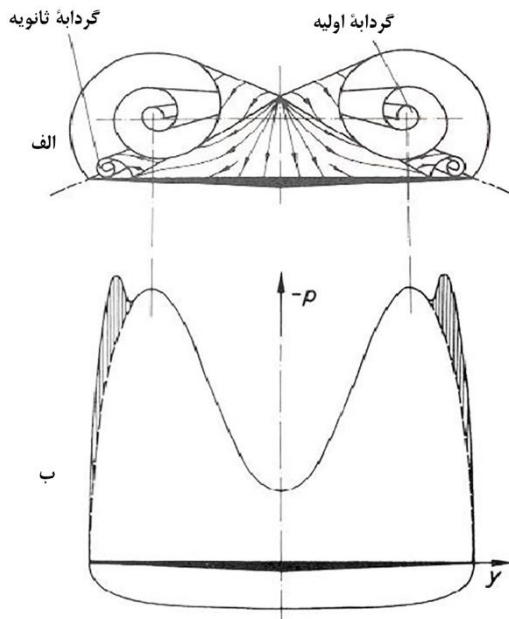
در زمان‌هایی طولانی از مأموریت‌های نظامی گوناگون، تغییرات زاویه حمله در این هواپیماها زیاد است. بنابراین لازم است این جنگنده‌ها ضمن حفظ پایداری خود قدرت مانور بالایی داشته باشند. در بال‌های مثلثی درک جریان گردابه‌ای در طراحی سطوح کنترلی لبه حمله و فرار دارای اهمیت است، لذا نیاز به دانش کمی

امروزه با وجود پیشرفت‌های عظیم در عرصه صنایع هوایی، برتری هوایی با جنگنده‌هایی است که در زاویه حمله بالاتر از واماندگی، قابلیت انجام مانورهای سریع را داشته باشند. بیشتر هواپیماهای سرعت‌بالا، به‌خصوص هواپیماهای جنگنده، برای افزایش قدرت مانورپذیری در سرعت‌های زیر صوت، به بال‌های مثلثی مجهزند.

و کیفی رفتار گردابه‌ها، نیروها، گشتاورها، بارگذاری روی بال و کنترل آنها وجود دارد. از خصوصیات بال‌های مثلثی می‌توان به پسای کم در سرعت‌های فراصوت و همچنین پایداری جریان در زوایای حمله بالا اشاره کرد [۱]. این هواپیماها از نیروی برای تولیدشده از جریان گردابه‌ای بهره می‌برند تا قدرت مانورپذیری بالایی داشته باشند. در بال‌های پسرگرای بالا، گردابه‌های لبه حمله تأثیر غالبی بر جریان و نیروهای ائرودینامیکی دارند. جریان هوا روی بال‌های مثلثی در زوایای حمله بالاتر از حدود ۱۵ درجه اختلاف فاحشی با جریان روی بال‌های معمولی در همین زوایای حمله دارد [۲]. تخمین شروع و گسترش جدایش جریان روی بال کار دشواری است. فیزیک پیچیده‌ای از جریان در مقیاس بسیار کوچک در محدوده‌هایی از بال که انحنای زیادی دارد، مانند لبه حمله، رخ می‌دهد [۳]. جریان روی بال مثلثی شدیداً غیرخطی، ناپایا و پیچیده است. در بال‌های مثلثی بخش زیادی از جریان روی بال شامل یک جفت گردابه خلاف جهت هم است که از لایه برشی جداشده از لبه حمله سرچشمه می‌گیرند. این گردابه سرعت طولی ۲ تا ۳ برابر سرعت جریان آزاد درون هسته خود القا می‌کند. این گردابه‌ها می‌توانند قطری تا حدود ۳۰ درصد اسپن بال داشته باشند [۲].

فشار در زیر یک بال تحت زاویه حمله از روی آن بیشتر است. بنابراین جریان زیر بال در نزدیکی لبه حمله سعی دارد به سمت روی بال بچرخد. در صورتی که لبه حمله تیز باشد، جریان در امتداد تمامی طول لبه حمله جدا خواهد شد. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، این جریان جداشده به داخل گردابه اولیه روی بال در قسمت داخلی لبه حمله می‌پیچد [۴]. سطح جریان جداشده در محل لبه حمله روی بال، حلقه می‌زند و در امتداد خط اتصال اولیه مجدداً به سطح می‌چسبد. با افزایش زاویه حمله، گردابه‌های اولیه از سطح مدل فاصله بیشتری می‌گیرند و یک ناحیه کم‌فشار را نزدیک سطح به وجود می‌آورند که یک جفت گردابه کوچکتر نزدیک بال به نام گردابه ثانویه تشکیل می‌شود و مکش این گردابه‌های ثانویه روی گردابه اولیه تأثیر می‌گذارند و سبب نزدیکتر شدن گردابه اولیه به لبه حمله می‌شوند. گردابه‌های ثانویه باعث افزایش نیروی برآ و تا حدی سبب افزایش پایداری می‌شود. فشار سطحی روی یک بال مثلثی در نزدیکی لبه حمله کاهش یافته، در ناحیه میانی روی بال این فشار بالاتر و تا حدی ثابت است. تغییرات کیفی ضریب فشار در دهانه بال در شکل ۱

نمایش داده شده است [۴]. مسیر حرکت گردابه بال مثلثی با پسرگرای بالا، تقریباً مستقل از زاویه حمله است و بیشتر به زاویه لبه حمله بستگی دارد. هرچند برخی از محققان عنوان کرده‌اند که با افزایش زاویه حمله گردابه‌ها قدری به سمت داخل بال حرکت می‌کنند [۲]. در تمامی زوایای حمله مثبت، فشار روی سطح کمتر از فشار جریان آزاد و فشار سطح زیرین بال بیشتر از فشار جریان آزاد است [۵].



شکل ۱. تشکیل گردابه و توزیع ضریب فشار در امتداد دهانه یک بال مثلثی [۴]

طی دهه‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای روی جریان در اطراف بال‌های مثلثی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به بررسی توزیع فشار، ضرایب نیرو، مقادیر سرعت، الگوی جریان و جز این‌ها اشاره کرد. بیشتر این تحقیقات به وسیله آزمایش‌های تونل باد و یا روش‌های عددی صورت گرفته‌اند و به ندرت با اندازه گیری تجربی گردابه‌ها، تأثیر زاویه حمله مورد بررسی قرار گرفته است. سلطانی و داوری رفتار ائرودینامیکی یک بال مثلثی با پسرگرای ۷۰ درجه را در تونل باد بررسی کردند [۶]. نتایج به دست آمده نشان داد که گردابه‌های به وجود آمده روی بال با پسرگرای بالا تابع عوامل متعددی از جمله زاویه حمله و فاصله از لبه حمله بال است. همچنین پروفیل‌های سرعت نشان داد که سرعت جریان در هسته گردابه تا حدود ۲ برابر سرعت در جریان آزاد خارج از گردابه می‌رسد. این افزایش سرعت سبب کاهش فشار در

دیگر تحت تأثیر نور لیزر قرار نمی‌گیرند. با این روش می‌توان تغییرات گردابه در راستای وتر بال را مشاهده کرد. همچنین لیزر به‌علت ایجاد نور قوی و یکنواخت سبب بهبود کیفیت عکس‌ها می‌شود. در این پژوهش علاوه بر بررسی جریان روی بال مثلثی، سعی شده است تأثیر تغییرات زاویه حمله بر اندازه و قدرت گردابه‌ها به‌صورت تجربی و عددی بررسی شود. بخش آزمایشگاهی این پژوهش در تونل دود انجام و جهت جریان هوا روی بال به‌کمک خطوط دود مشخص شده است.

۲. تجهیزات آزمایشگاهی و روند انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در یک تونل دود تی. ای. ای. ۸۰ انجام شده است. ابعاد اتاق آزمون تونل دود $10 \times 18 \times 24$ سانتی‌متر می‌باشد و دود از بین صفحه مشبک، که در زیر محفظه آزمایش نصب شده است، عبور می‌کند و در نتیجه ۲۳ نوار دود (که مراکز آنها با یکدیگر ۷ میلی‌متر فاصله دارند) تشکیل می‌شود. در شکل ۲ نمایی از تونل دود مذکور نمایش داده شده است.



شکل ۲. نمایی از تونل دود مورد استفاده

برای عکسبرداری و آشکارسازی جریان از یک دوربین عکاسی دیجیتال با قابلیت همگامی با نور فلش در سرعت بالا استفاده شده است. برای آشکارسازی گردابه‌های تشکیل‌شده در مقاطع مختلف روی بال نیز از فلش و دستگاه لیزر استفاده شده است. برای انجام آزمایش، تونل در یک اتاق تاریک قرار گرفته است و به‌کمک نور لیزر مقاطع مختلف روی بال به‌صورت یک

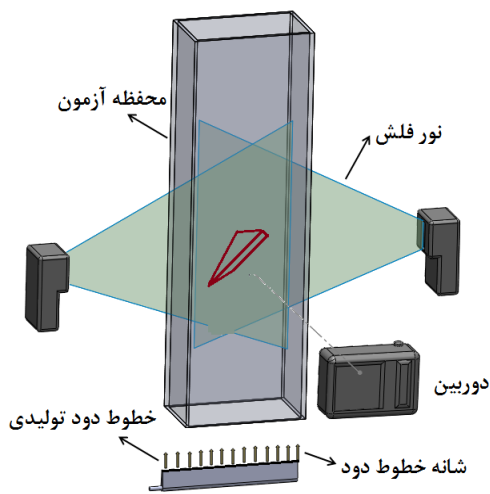
هسته گردابه و ایجاد نیروی برآ روی بال می‌شود. در پژوهش دیگری سلطانی و داوری به‌منظور بررسی ساختار گردابه‌ها و تعیین تأثیر عدد رینولدز و زاویه حمله، آزمایش‌های متعددی در تونل باد انجام دادند و اعلام کردند که تغییر عدد رینولدز در بال‌های مثلثی تأثیر چندانی روی ساختار گردابه‌ها ندارد، بلکه زاویه حمله بال بیشترین تأثیر را روی گردابه‌ها دارد [۷]. لوسن با بررسی ساختار گردابه‌های روی بال مثلثی در اعداد رینولدز ۷۰۰۰ و ۲۳۰۰۰ نشان داد که تغییر عدد رینولدز بر ساختار گردابه تأثیر چندانی ندارد [۸]. سلطانی و همکاران به بررسی میدان سرعت حول یک ترکیب بال-کانارد با استفاده از روش‌های تجربی و شبکه عصبی پرداختند [۹]. نتایج حاصل از آزمایش‌های آنها بیانگر وجود گردابه لبه حمله روی بال است. آنها اعلام کردند که افزایش زاویه حمله سبب بزرگتر شدن و افزایش قدرت گردابه می‌شود. فیضیان و همکاران نیز با آشکارسازی توسط دود توانستند این موضوع را به‌خوبی نشان دهند [۱۰].

پاینه و همکاران به بررسی تجربی جریان روی دو بال مثلثی با زوایای پس‌گرایی ۷۰ و ۸۵ درجه در زوایای حمله مختلف پرداختند [۱۱]. نتایج حاصل نشان داد که افزایش زاویه حمله باعث بزرگتر شدن گردابه و بیشتر شدن فاصله مرکز گردابه از سطح می‌شود.

در زوایای حمله بالا بی‌نظمی ناگهانی در ساختار گردابه لبه حمله ایجاد می‌شود که به فروپاشی گردابه می‌انجامد. این جریان فروپاشیده شده نوسانات شدیدی در فشار روی سطح در پایین‌دست ایجاد می‌کند و تأثیر آن بر دم هوایما نیز سبب ایجاد لرزش دم می‌شود [۱۲]. عواملی مانند زاویه تیزی لبه حمله بال، آثار تداخلی نگهدارنده مدل و آثار دیواره تونل می‌تواند بر فروپاشی گردابه تأثیرگذار باشد.

آشکارسازی جریان روشی برجسته در تحلیل جریان سیالات است که اجازه می‌دهد با مطالعه الگوهای جریان به تحلیل‌های عمیق در پدیده سیال رسید. در گذشته برای مشاهده گردابه تشکیل‌شده روی بال از نور گسترده استفاده می‌شد. در این پژوهش برای مشاهده گردابه‌های تشکیل‌شده روی بال مثلثی به‌وسیله خطوط دود، از آشکارسازی لیزری استفاده شده است. استفاده از دستگاه لیزر در یک محیط کاملاً تاریک باعث ایجاد صفحه‌ای روشن با ضخامتی بسیار ناچیز می‌شود و به این‌صورت می‌توان نور را به مکان مورد نظر تاباند، در حالی که مکان‌های

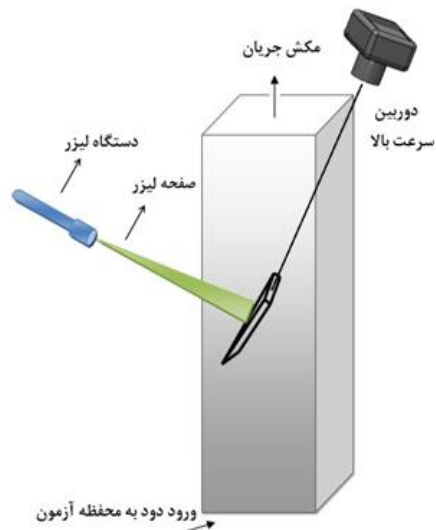
نور فلش باعث ایجاد محیطی کاملاً روشن می‌شود و می‌توان شکل‌گیری گردابه روی سطح بال را به‌کمک آن مشاهده کرد. در این حالت دوربین روبروی تونل تعبیه شده است. در این پژوهش مدل از جنس آلومینیم با زاویه پسگرایی ۷۰ درجه، ارتفاع ۸۰ و قاعده ۵۶ میلی‌متر ساخته شده است. ضخامت مدل ۵ میلی‌متر و زاویه تیزی لبه حمله ۲۰ درجه است. نسبت ضخامت به وتر ۰/۰۶۲ و سرعت جریان عبوری از روی مدل ۲/۵ متر بر ثانیه می‌باشد. عدد رینولدز در این پژوهش ۱۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها در زوایای حمله گوناگون از ۸ درجه تا ۴۵ درجه انجام شده است. در شکل‌های ۵ و ۶ نمای واقعی و شماتیک این مدل و مقاطع بال داده‌برداری شده نمایش داده است.



شکل ۴. مکان قرارگیری دوربین و فلش برای عکسبرداری از نمای جانبی

دارد. با افزایش زاویه حمله به ۳۰ درجه، این لوله گردابه تشکیل شده دچار تزلزل و ارتعاش می‌شود و با افزایش زاویه حمله به ۳۵ درجه، لوله گردابه کاملاً از بین می‌رود و فروپاشی لوله گردابه تقریباً تا وسط بال ادامه می‌یابد. عاملی که سبب وضوح بهتر دود در زاویه حمله ۳۵ درجه شده است، فروپاشی لوله گردابه و پخش شدن دود لوله گردابه به اطراف است که نور فلش و دوربین در این لحظه مقادیر بیشتری دود پخش شده به اطراف را ثبت کرده است. برای بررسی بهتر گردابه‌های تشکیل شده روی بال و مشاهده تغییرات گردابه در راستای وتر بال به‌کمک لیزر، گردابه‌های روی بال آشکارسازی شده است. شکل‌های ۷ و ۸ آشکارسازی جریان روی بال مثلی ساده از مقطع $x/c = 0.5$ تا

صفحه با ضخامت بسیار ناچیز روشن می‌شود. در تمام مراحل آزمایش صفحه لیزر به‌صورت عمود بر سطح مدل تابانده می‌شود و زاویه بین راستای دوربین با صفحه لیزر کاملاً قائم می‌باشد. عمودبودن صفحه لیزر بر سطح مدل و راستای لنز دوربین سبب دقیق‌تر بودن نتایج آشکارسازی می‌شود. در شکل ۳ نحوه استقرار مدل، دوربین و لیزر برای عکسبرداری از نمای عرضی نمایش داده شده است. استفاده از دستگاه لیزر در محیطی کاملاً تاریک باعث ایجاد صفحه‌ای روشن با ضخامتی بسیار ناچیز می‌شود. برای عکسبرداری از نمای جانبی و مشاهده لوله (ورقه) گردابه روی بال از فلش استفاده شده است. در شکل ۴ نحوه استقرار مدل، دوربین و فلش برای عکسبرداری از نمای جانبی نمایش داده شده است.



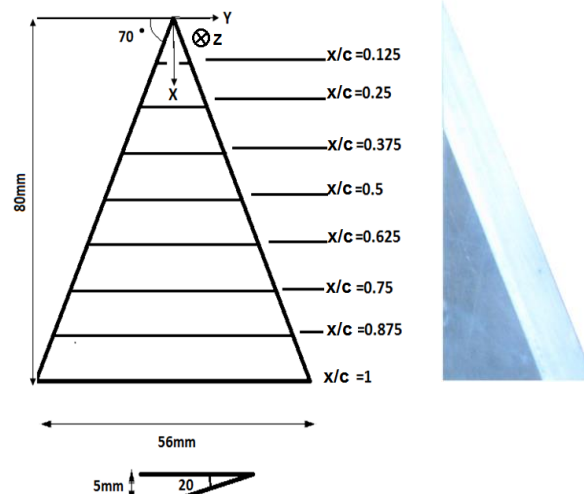
شکل ۳. مکان قرارگیری دوربین و لیزر برای عکسبرداری از نمای عرضی

۳. بررسی و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

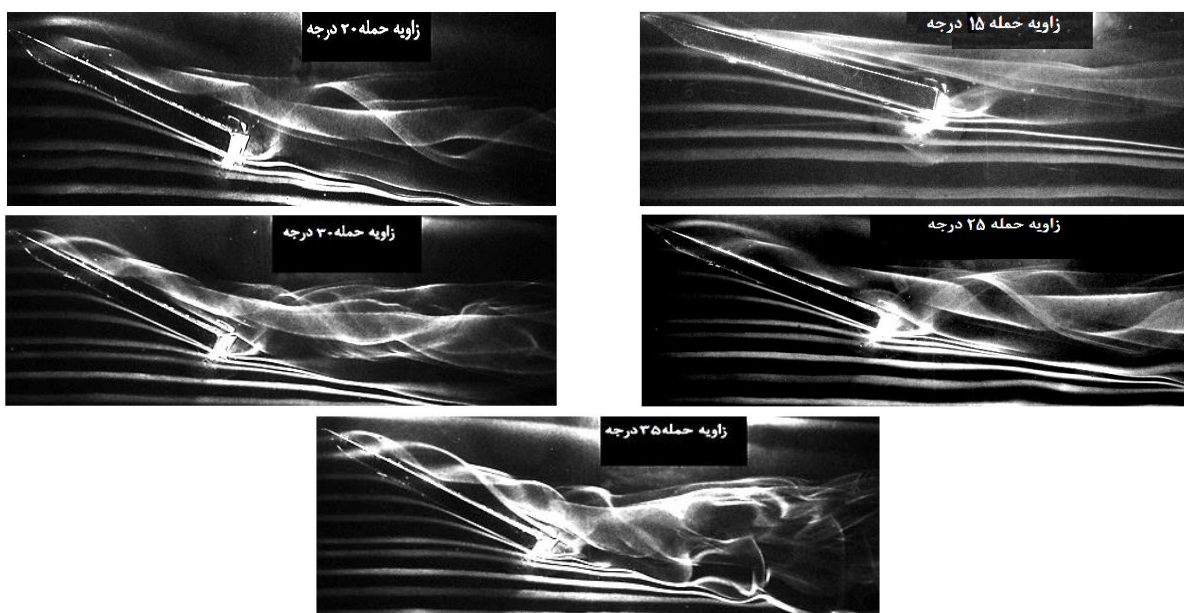
شکل ۶ آشکارسازی جریان به‌کمک نور فلش و خطوط دود را روی بال مثلی در زوایای حمله ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه از نمای جانبی نمایش می‌دهد. در این تصاویر مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه حمله فاصله مرکزگردابه از سطح روی بال بیشتر می‌شود؛ همچنین افزایش زاویه حمله سبب بزرگتر شدن قطر گردابه و قدرتمندتر شدن آن می‌گردد. در زوایای حمله مختلف با حرکت از رأس بال به‌سوی لبه فرار، لوله گردابه‌ای تشکیل شده روی بال بزرگتر می‌شود. با دقت در ادامه گردابه تشکیل شده در قسمت پشت بال مشاهده می‌شود که در زاویه حمله ۱۵ تا ۲۵ درجه لوله گردابه تشکیل شده تا پشت بال بدون فروپاشی وجود

آنها از سطح مدل بیشتر می‌شود. افزایش اندازه و قدرت گردابه در اثر افزایش زاویه حمله به این دلیل است که با افزایش زاویه حمله اختلاف فشار بین سطح زیرین و روی بال بیشتر می‌شود، به این صورت که سطح زیر بال دارای ماکزیمم فشار استاتیک و روی بال دارای مینیمم فشار استاتیک است. بنابراین مکشی قوی روی سطح بال به وجود می‌آید و با افزایش اختلاف فشار در اثر افزایش زاویه حمله این نیروی مکشی قدرتمندتر می‌شود و جریان بیشتری را به سمت روی بال می‌کشد و همین مسئله سبب بزرگتر شدن، قدرتمندتر شدن و ازدیاد و بیشتر شدن فاصله مرکز گردابه تا سطح می‌شود.

مقطع $x/c = 1$ در زوایای حمله ۱۴ و ۱۸ درجه را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با عبور جریان از رأس بال به سمت لبه فرار، گردابه‌های تشکیل شده روی بال بزرگتر و فاصله مرکز گردابه تا سطح بال بیشتر می‌شود. با مقایسه مقاطع یکسان روی دو شکل مشاهده می‌شود که گردابه‌های تشکیل شده روی بال با زاویه حمله ۱۸ درجه، بزرگتر از گردابه‌های تشکیل شده روی بال با زاویه حمله ۱۴ درجه است. همچنین فاصله مرکز گردابه تا سطح در زاویه حمله ۱۸ درجه در مقاطع یکسان، نسبت به زاویه حمله ۱۴ درجه بیشتر شده است. لذا با افزایش زاویه حمله گردابه‌ها بزرگتر و قدرتمندتر و فاصله



شکل ۵. تصویر نیمه مدل و شماتیک مقاطع بال مثلثی، زاویه پسگرایی ۷۰ و زاویه تیزی لبه حمله ۲۰ درجه

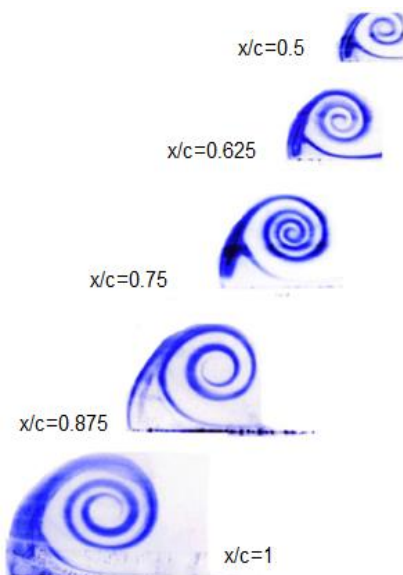


شکل ۶. آشکارسازی جریان روی بال مثلثی ساده

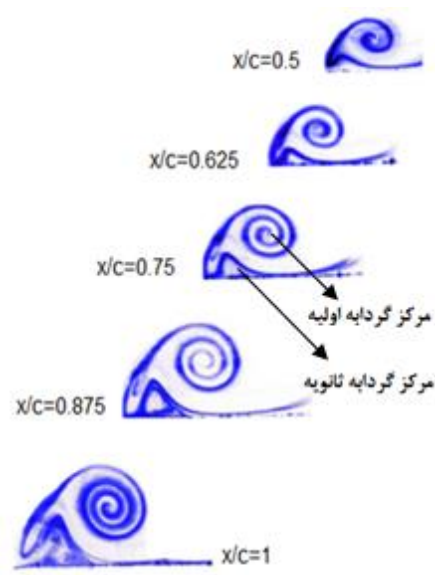
با افزایش زاویه حمله و با توجه به بیشتر شدن اختلاف فشار و فاصله گرفتن گردابه اولیه از سطح، ناحیه‌ای کم‌فشار زیر گردابه اولیه به وجود می‌آید و شرایط برای تشکیل یک گردابه جدید زیر گردابه اولیه فراهم می‌شود. این گردابه با نام گردابه ثانویه شناخته می‌شود و همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، زیر گردابه اولیه تشکیل شده است و با حرکت از رأس بال به سمت لبه فرار بزرگتر می‌شود. بالاتر از این زاویه حمله، تغییری ناگهانی در ساختار گردابه‌ها به وجود می‌آید که اصطلاحاً به آن انفجار گردابه گفته می‌شود. انفجار گردابه با کاهش فشار ناگهانی در جریان محوری، انفجار گردابه‌ها حول هسته ساکن و پیدایش جریان مغشوش همراه است. در زوایای حمله بالاتر از ۲۲ درجه، گردابه‌های اولیه در پایین دست لبه فرار منفجر می‌شوند. با افزایش زاویه حمله انفجار به سمت بالادست حرکت می‌کند.

در شکل ۹ گردابه‌های تشکیل شده در مقطع $x/c=0.75$ برای بال مثلی زوایای حمله ۲۶ و ۳۲ درجه نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در زاویه حمله ۲۶ درجه

گردابه دچار ناپایداری شده و در آستانه فروپاشی است و در زاویه حمله ۳۲ به‌طور کامل منفجر شده است. با مقایسه شکل ۹ و مقطع $x/c=0.75$ در شکل‌های ۷ و ۸ تفاوت آشکار قطر گردابه در زوایای حمله ۲۶ و ۳۲ درجه مشهود است. دلیل افزایش شدید قطر گردابه در زوایای ۲۶ و ۳۲ درجه، رسیدن به مرحله فروپاشی گردابه است. در زمان فروپاشی گردابه، قطر گردابه به شدت افزایش می‌یابد و فشار درون آن به فشار روی سطح بال نزدیک می‌شود. بنابراین علاوه بر پیدایش جریان مغشوش یکی دیگر از مشخصه‌های مرحله فروپاشی گردابه افزایش شدید قطر گردابه می‌باشد. با توجه به اینکه در تمام مراحل آزمایش دوربین دقیقاً بر صفحه لیزر عمود و فاصله سطح بال تا دوربین در تمامی زوایا یکسان بوده است، با دقت خوبی اطلاعات مربوط به اندازه گردابه توسط نرم‌افزار اتوکد استخراج شده است. در شکل ۱۰ نحوه اندازه‌گیری قطر گردابه و فاصله گردابه از لبه حمله روی یک مقطع خاص نمایش داده شده است. اندازه‌های به دست آمده روی کلیه مدل‌ها، همگی براساس طول وتر بال بی‌بعد شده است.



شکل ۸. آشکارسازی جریان روی بال مثلی ساده در زاویه حمله ۱۸ درجه از $x/c=0.5$ تا $x/c=1.0$



شکل ۹. آشکارسازی جریان روی بال مثلی ساده در زاویه حمله ۱۴ درجه از $x/c=0.5$ تا $x/c=1.0$

انتهایی بال فاصله مرکز گردابه تا سطح بیشتر می‌شود. افزایش زاویه حمله باعث می‌شود فروپاشی گردابه در مقاطع انتهایی بال به وجود بیاید. فروپاشی گردابه باعث می‌شود قطر گردابه و فاصله مرکز گردابه تا سطح بیشتر شود. نمودار مربوط به زوایای حمله

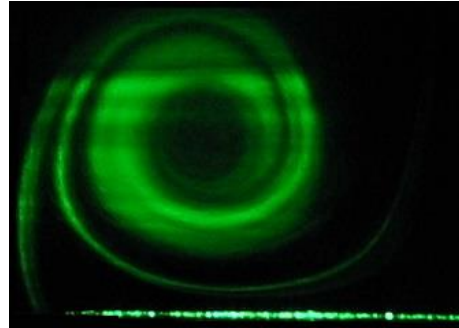
شکل ۱۱ مربوط به فاصله مرکز گردابه تا سطح بال مثلی ساده در زوایای حمله مختلف است. در این شکل مشاهده می‌شود که افزایش زاویه حمله باعث فاصله گرفتن مرکز گردابه از سطح مدل در مقاطع یکسان می‌شود. همچنین با حرکت به سمت مقاطع

می‌شود. در نمودارهای مربوط به زوایای حمله پایین، با حرکت به سمت لبه انتهایی بال قطر گردابه با نسبت تقریباً ثابتی افزایش می‌یابد. اما در زوایای حمله بالاتر به علت فروپاشی گردابه افزایش قطر گردابه با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد و تحت تأثیر نوسانات شدیدتری قرار می‌گیرد. این موضوع در زوایای حمله ۲۶ و ۳۲ درجه مشهود است. شکل ۱۳ مکان فروپاشی گردابه روی بال را در زوایای حمله مختلف نشان می‌دهد. در این شکل نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش دیگر محققان مقایسه شده است. در تمامی پژوهش‌های انجام‌شده در این شکل بی‌بعدسازی براساس طول وتر صورت پذیرفته است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، همخوانی خوبی بین نتایج وجود دارد. در مورد خطای وارد بر آزمایشات انجام‌شده از چندین دیدگاه می‌توان به بررسی پرداخت. نخست خطای ناشی از دقت در تنظیم مدل در زاویه مورد نظر است. از این گذشته خطای دستگاه در معرفی سرعت جریان عبوری از روی مدل نیز باید در نظر گرفته شود و در نهایت خطای دید دوربین عکسبرداری که می‌تواند به دلیل همراهی نبودن آن با محور عبوری از مرکز مدل باشد و در انتها خطای ناشی از سرعت عکس برداری باشد.

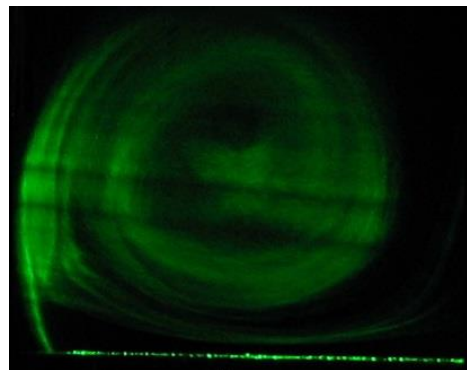
۴. بررسی و تحلیل نتایج عددی

در ادامه، از فلوتنت و مدل تک‌معادله‌ای اسپالارت آلماراس برای بررسی عددی استفاده شده است. مدل مذکور مدلی تک‌معادله‌ای است که یک معادله مدل‌شده انتقال را برای لزجت آشفتگی حل می‌کند و برای کاربردهای هوافضا توصیه شده است. این مدل در شکل اصلی خود برای اعداد رینولدز پایین مؤثر است. اسپالارت آلماراس مدلی پایا، فشار مبنا و دارای دقت مرتبه ۲ معادلات است. شبکه مورد استفاده از نظر هندسی توزیع نقاط غیریکنواختی دارد. در شکل ۱۴ موقعیت مدل نسبت به دیواره‌های تونل دود و شرایط مرزی مورد استفاده در هندسه حل عددی نمایه داده شده است. این شبکه ۶۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی دارد. برای دقت بیشتر نتایج از مش لایه مرزی استفاده شده است. در شکل ۱۵ شبکه تولیدشده برای حل در زاویه حمله ۱۰ درجه توسط نرم‌افزار گمبیت نمایش داده شده است. معیار همگرایی در این تحقیق ضریب برآ انتخاب شده است. شکل ۱۶ نمودار همگرا شدن ضریب برآ را برای بال مثلی مورد بررسی نشان می‌دهد. شکل ۱۷ نمودار فاصله مرکز گردابه تا سطح مدل را برای بال مثلی در سه

۲۶ و ۳۲ درجه در شکل ۱۱ به خوبی اختلاف در فاصله گردابه تا سطح را نسبت به زوایای حمله کمتر، در مقاطع انتهایی بال نشان می‌دهد. همان‌گونه که اشاره شد، این اختلاف زیاد بیانگر شروع پدیده فروپاشی گردابه روی بال است.



(الف)

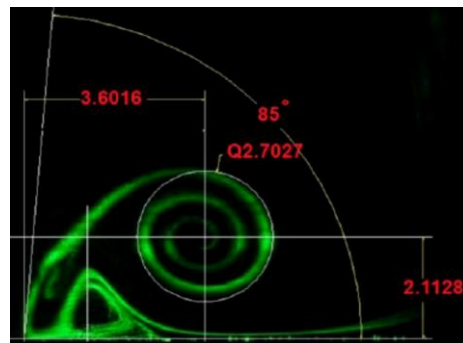


(ب)

شکل ۹. آشکارسازی جریان روی بال مثلی

(الف) زاویه حمله ۲۶ درجه در $x/c = 0.75$

(ب) زاویه حمله ۲۳ درجه در $x/c = 0.75$

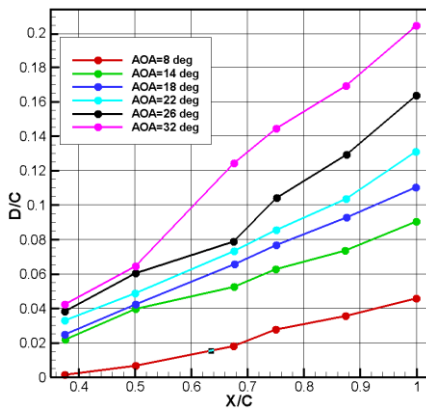


شکل ۱۰. روش اندازه‌گذاری گردابه روی مدل مثلی

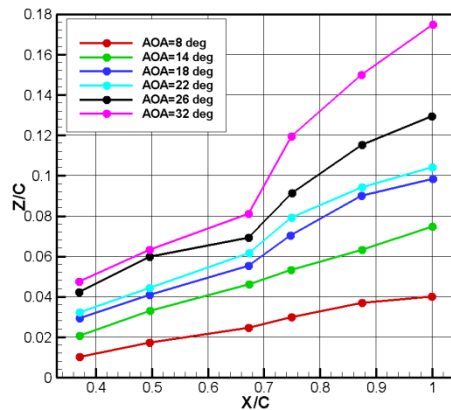
در شکل ۱۲ اندازه قطر گردابه روی سطح بال در زوایای حمله مختلف نمایش داده شده است مشاهده می‌شود که افزایش زاویه حمله باعث افزایش قطر گردابه در مقاطع یکسان می‌شود. همچنین با حرکت به سمت مقاطع انتهایی بال گردابه بزرگتر

به مناسب بودن دقت مورد نیاز، حجم محاسباتی کمتر و صرف زمان کمتر برای به جواب رسیدن، حالت ۲ که شامل ۶۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی می‌باشد به‌عنوان الگوی مناسب برای تحلیل نتایج عددی در نظر گرفته شده است. همچنین مشاهده می‌شود که نتایج CFD با نتایج آزمایشگاهی همخوانی خوبی دارد. گفتنی است تمامی اعداد به‌وسیله طول وتر بال بی‌بعد شده‌اند.

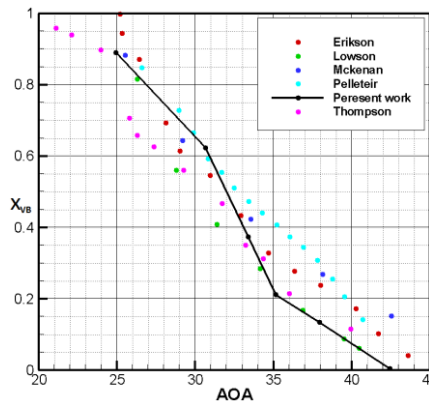
شبکه‌بندی مختلف نشان می‌دهد. حالت ۱ شامل ۳۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی، حالت ۲ شامل ۶۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی و حالت ۳ شامل ۱۰۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در حالت ۱ نتایج اختلاف محسوسی با حالت‌های ۲ و ۳ دارد. با بررسی این شکل مشاهده می‌شود که نتایج در حالت‌های ۲ و ۳ اختلاف ناچیزی با نتایج آزمایشگاهی دارند. بنابراین با توجه



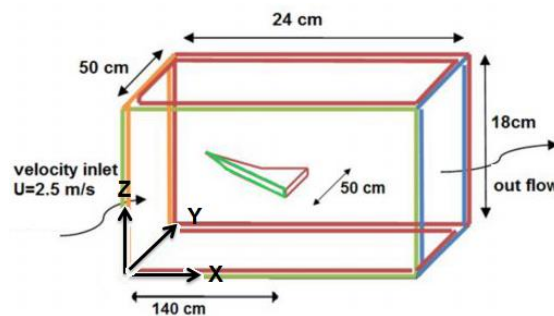
شکل ۱۲. اندازه قطر گردابه تا سطح بال



شکل ۱۱. فاصله مرکز گردابه تا سطح بال

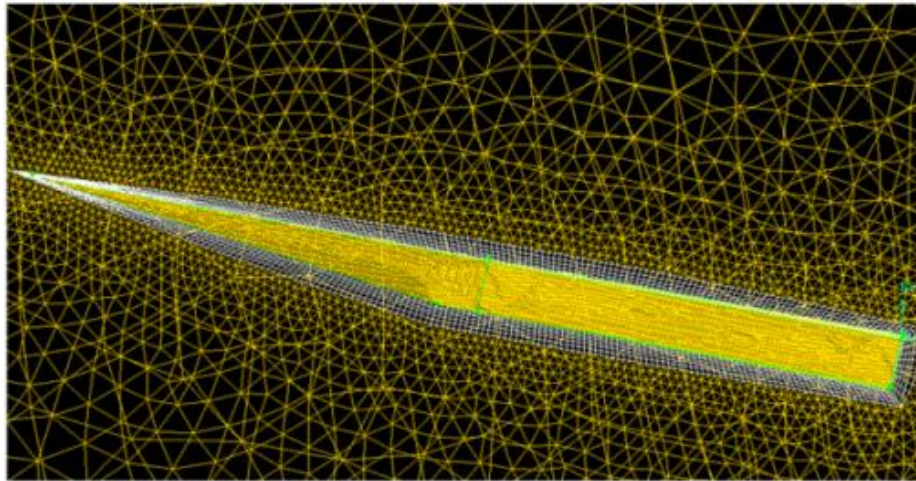


شکل ۱۳. مکان فروپاشی گردابه روی بال مثلی با پسگرایی ۷۰ درجه [۱۳]

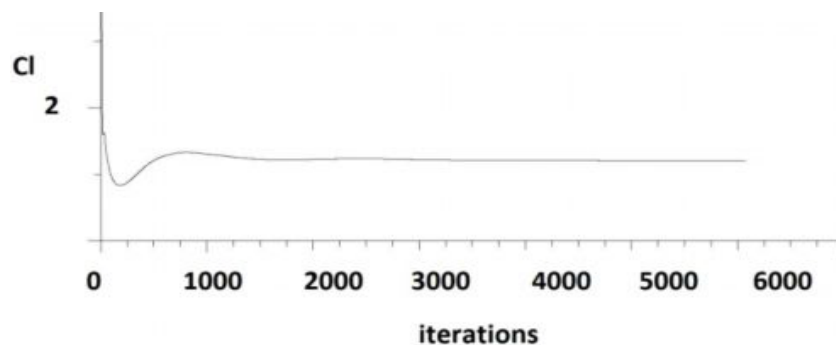


شکل ۱۴. شرایط مرزی تحلیل عددی

صفحه سبز شرط مرزی صفحه متقارن است. صفحات نارنجی شرط مرزی سرعت ورودی است. صفحات قرمز شرط مرزی دیوار است. صفحه آبی شرط مرزی فشار خروجی است.



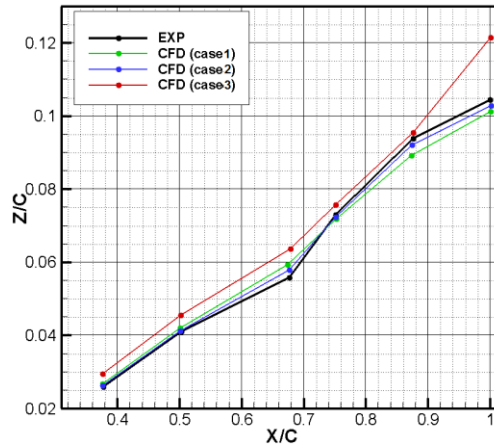
شکل ۱۵. شبکه استفاده شده برای حل در زاویه حمله ۱۴ درجه



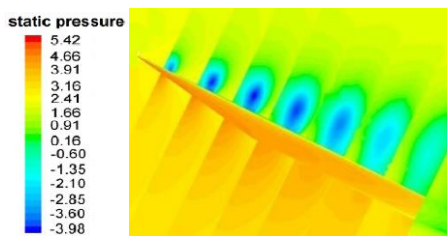
شکل ۱۶. بررسی روند نمودار همگرایی

تا زمانی صدق می‌کند که گردابه دچار فروپاشی نشده باشد. در زمان فروپاشی گردابه فشار منفی روی بال به فشار محیط نزدیک می‌شود. اما به‌طور کلی تا زمانی که فروپاشی گردابه اتفاق نیافتد، با افزایش زاویه حمله، در مقاطع یکسان از بال، فشار منفی افزایش می‌یابد و گردابه بزرگتر و قدرتمندتر، و فاصله مرکز گردابه تا سطح مدل بیشتر می‌شود. دلیل این مسئله ازدیاد اختلاف فشار بین زیر بال و روی بال در اثر افزایش زاویه حمله است. نمودارهای شکل ۲۰ تغییرات فشار استاتیک در مرکز گردابه را نمایش می‌دهند. در این شکل مشخص است که با افزایش زاویه حمله فشار منفی در مرکز گردابه افزایش می‌یابد. همچنین در نمودارهای مربوط به زوایای حمله مختلف، با عبور جریان به سمت لبه فرار، فشار استاتیک منفی در مرکز گردابه کاهش می‌یابد که این کاهش فشار منفی با افزایش زاویه حمله با شیب بیشتری همراه است. با افزایش زاویه حمله مکان شروع کاهش فشار مرکز گردابه، به سمت رأس بال حرکت می‌کند که این به منزله حرکت مکان فروپاشی گردابه به سمت رأس بال می‌باشد.

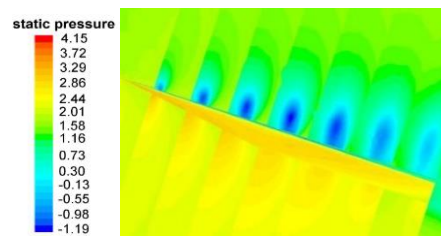
در شکل ۱۸ کانتور فشار استاتیک روی بال مثلثی ساده در زاویه حمله ۱۴ درجه نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با عبور جریان به سمت لبه فرار بال گردابه‌ها بزرگتر و فاصله آنها تا سطح مدل بیشتر می‌شود. در شکل ۱۸ مشخص است که فروپاشی گردابه در زاویه حمله ۱۴ درجه اتفاق نمی‌افتد، هرچند گردابه در لبه‌های انتهایی بال دچار کاهش فشار منفی در مرکز شده است. شکل ۱۹ کانتور فشار استاتیک در زاویه حمله ۱۸ درجه را روی بال نشان می‌دهد. با مقایسه کانتور شکل‌های ۱۸ و ۱۹ مشاهده می‌شود که در مقاطع یکسان روی بال، افزایش زاویه حمله باعث افزایش فشار منفی در مرکز گردابه می‌شود. بیشینه فشار استاتیک منفی در زاویه حمله ۱۴ درجه $-1/19$ پاسکال است، حال آنکه بیشینه فشار منفی در زاویه حمله ۱۸ درجه $-3/98$ پاسکال است. افزایش فشار منفی در مرکز گردابه سبب مکش بیشتر جریان، بزرگتر شدن و قدرتمندتر شدن گردابه می‌شود. به عبارت دیگر افزایش زاویه حمله در مقاطع یکسان از بال باعث افزایش فشار منفی روی بال می‌شود. البته این موضوع



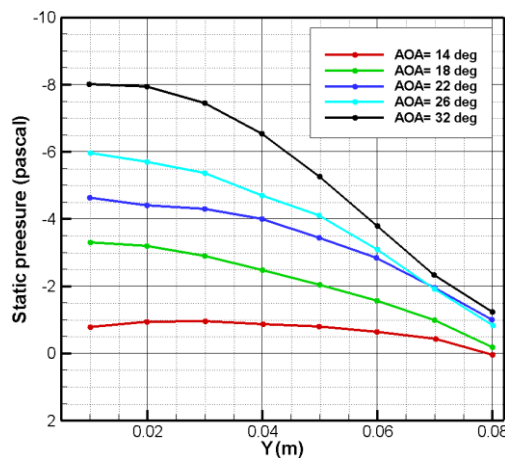
شکل ۱۷. فاصله مرکز گردابه تا سطح مدل برای بال مثلثی در سه شبکه‌بندی در زاویه حمله ۲۰ درجه
حالت ۱ شامل ۳۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی، حالت ۲ شامل ۶۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی، حالت ۳ شامل ۱۰۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی



شکل ۱۹. کانتور فشار استاتیک روی بال در زاویه حمله ۱۸ درجه



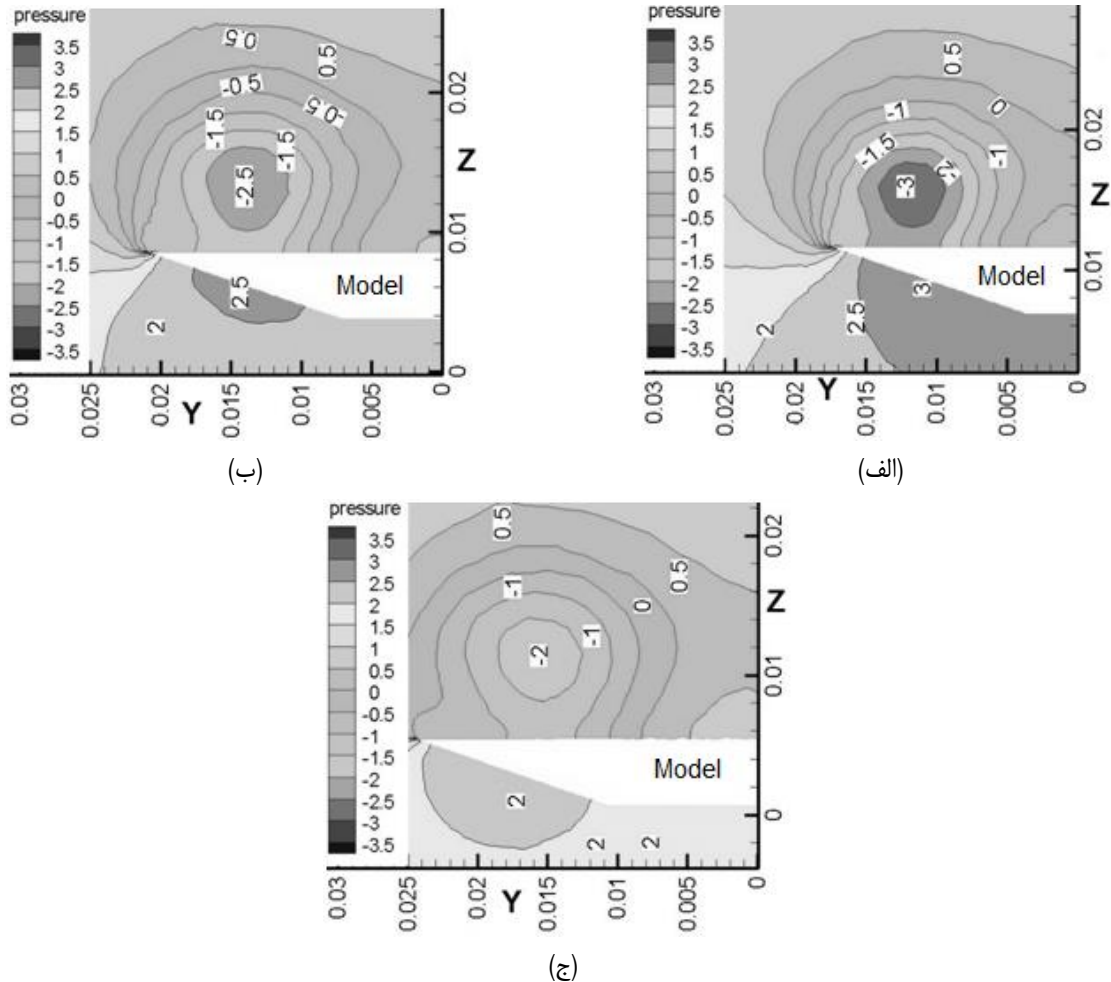
شکل ۱۸. کانتور فشار استاتیک روی بال در زاویه حمله ۱۴ درجه



شکل ۲۰. فشار استاتیک در مرکز گردابه در مقاطع و زوایای مختلف روی بال مثلثی

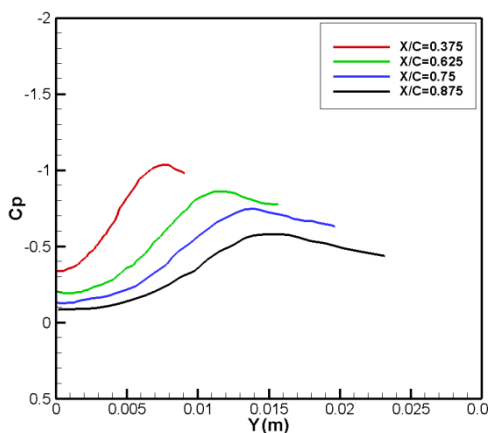
بررسی گردید، بیشینه فشار منفی روی سطح بال مربوط به مرکز گردابه می‌باشد. بنابراین با بررسی و اندازه‌گذاری کانتورهای مربوط به فشار، اطلاعات مربوط به اندازه گردابه محاسبه می‌شود. به این ترتیب برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی می‌توان از کانتور فشار فاصله مرکز گردابه تا سطح مدل و قطر گردابه را محاسبه کرد.

در شکل ۲۱ کانتورهای دوبعدی فشار استاتیک در مقاطع مختلف برای بال مثلثی در زاویه حمله ۱۸ درجه نمایش داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، گردابه‌های نزدیک به رأس بال دارای مکش بیشتری می‌باشند و با حرکت به سمت مقاطع انتهایی بال مکش روی سطح بال کمتر می‌شود. همان‌طور که اشاره شد و با ارائه کانتورها و نمودارهای مختلف



شکل ۲۱. کانتور دوبعدی فشار استاتیک روی مقاطع مختلف بال مثلثی؛ الف) مقطع $x/c = 0.625$ ، ب) مقطع $x/c = 0.75$ ، ج) مقطع $x/c = 0.875$

ضریب فشار، با دقت خوبی مکان مرکز گردابه، در راستای محور Y را مشخص می‌کند. این شکل مشخص می‌کند که با حرکت از رأس بال به سمت لبه فرار مرکز گردابه به میزان اندکی به سمت داخل بال حرکت می‌کند. این مسئله به دلیل بزرگتر شدن قطر گردابه است.



شکل ۲۳. تغییرات ضریب فشار روی سطح بال در زاویه حمله ۱۸ درجه

در شکل ۲۲ تغییرات ضریب فشار روی سطح بال مثلثی در مقاطع مختلف نمایش داده شده است. هر یک از نمودارهای این شکل مربوط به مقادیر ضریب فشار روی خطوط مشخص شده در شکل ۶ می‌باشند. با دقت در نمودارهای شکل ۲۲ مشاهده می‌شود که با حرکت از مکان صفر در راستای محور Y مقادیر ضریب فشار ابتدا تغییر اندکی دارند، اما در انتهای مسیر دچار افزایش زیادی می‌شود. دلیل این افزایش ناگهانی وجود گردابه‌های قدرتمند با مکش زیاد در لبه حمله بال می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با حرکت از لبه فرار بال به سمت رأس بال، ضریب فشار روی سطح بال بیشتر می‌باشد، این افزایش به دلیل قدرتمندتر بودن گردابه در مقاطع نزدیک به رأس است. در شکل ۲۲ مشاهده شد که با حرکت به سمت لبه فرار بال فشار استاتیک در مرکز گردابه کمتر می‌شود. در هر یک از نمودارهای مربوط به شکل ۲۳، مکانی که دارای ماکزیمم ضریب فشار منفی می‌باشد، مربوط به مرکز گردابه است. به بیانی دیگر، محاسبه

۵. جمع‌بندی

سطح در زوایای حمله بالا پدیده فروپاشی گردابه به وجود می‌آید. به عبارت دیگر با زیاد شدن فاصله گردابه از سطح، تأثیر جریان‌ات اطراف که دارای فشار مثبت هستند روی گردابه باعث از هم گسیختگی گردابه می‌شود. پدیده فروپاشی گردابه به سرعت از مقاطع انتهایی بال به سمت رأس بال حرکت می‌کند و نهایتاً باعث ایجاد پدیده واماندگی روی بال می‌شود. بنابراین هندسه بال و شکل لبه حمله تأثیر بسزایی در افزایش قدرت مانورپذیری هواپیما و همچنین به تأخیر انداختن پدیده واماندگی به زوایای حمله بالاتر دارد. همچنین در این پژوهش به صورت عددی به تحلیل جریان روی بال مثلثی با زاویه پسگرایی ۷۰ درجه پرداخته شده است. نتایج عددی نیز نشان می‌دهند که با عبور جریان به سمت لبه فرار بال گردابه‌ها بزرگتر شده و فاصله آنها تا سطح مدل بیشتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در مقاطع یکسان روی بال، افزایش زاویه حمله باعث افزایش فشار منفی در مرکز گردابه می‌شود. افزایش فشار منفی در مرکز گردابه باعث مکش بیشتر جریان، بزرگتر و قدرتمندتر شدن گردابه می‌شود. با بررسی نتایج تجربی و عددی مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده از تحلیل عددی همخوانی خوبی با نتایج تجربی دارد.

در این مقاله جریان روی بال مثلثی با زاویه پسگرایی ۷۰ درجه به صورت تجربی ارزیابی شده است. نتایج مربوط به تأثیر تغییرات زوایای حمله بر اندازه و قدرت گردابه روی بال به صورت تجربی و به کمک تونل دود ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در زوایای حمله مختلف با عبور جریان از رأس بال به سمت لبه فرار گردابه‌ها بزرگتر و فاصله آنها از سطح بال بیشتر می‌شود. افزایش فاصله گردابه از سطح سبب ایجاد شرایط مناسب برای تشکیل گردابه ثانویه می‌شود و با حرکت به سمت لبه فرار گردابه ثانویه نیز بزرگتر می‌شود. افزایش زاویه حمله سبب افزایش اختلاف فشار بین سطح زیر و روی بال می‌شود و در نتیجه در زوایای حمله بالا مکش قوی‌تری روی سطح بال ایجاد می‌شود که باعث تشکیل گردابه‌های بزرگتر و قدرتمندتر می‌شود و افزایش فاصله گردابه از سطح را در پی دارد. با ازدیاد زاویه حمله اختلاف فشار بین سطح زیر و روی بال بیشتر می‌شود و این اختلاف فشار باعث تشکیل گردابه‌های بزرگی می‌شود که فاصله بیشتری از سطح بال دارند. افزایش فاصله گردابه تا سطح بال تا محدوده خاصی سودمند است. اما با بیشتر شدن فاصله گردابه تا

۶. مأخذ

- [1] Nangia, R. K. "Semi-Empirical Prediction of Vortex Onset & Progression on 65 Delta Wings RTO-AVT-113." AIAA, 2008, 384.
- [2] Munro, C. D., P. Krus. "Implications of Scale Effect for the Prediction of High Angle of Attack Aerodynamics." *Progress in Aerospace Sciences* 41, 2005, pp. 301-322.
- [3] Luckring, J. "A Survey of Factors Affecting Blunt Leading-Edge Separation for Swept and Semi-Slender Wings." AIAA, 2010, 4820.
- [4] Dutta, S., K. Muralidhar, K. "Influence of the orientation of a square cylinder on the wake properties." *Experiments in Fluids* 34, 2003, pp. 16-23.
- [5] Pashilkar, A. "Surface Pressure Model for Simple Delta Wings at High Angles of Attack." *Sadhana* Vol. 26, Part 6, 2001, pp. 495-515.
- [۶] سلطانی، محمدرضا، علیرضا داوری. "بررسی تجربی جریان روی یک بال با ضریب منظری پایین." *استقلال*، س. ۲۰، ش. ۲، ۱۳۸۰.

- [۷] سلطانی، محمدرضا، علیرضا داوری. "بررسی تجربی گردابه‌های به وجود آمده روی بال های مثلثی." *شریف*، ش. ۱۹، س. ۱۷، ۱۳۸۰.
- [8] Lowson, M. V. "Visualization Measurements of Vortex Flows." *Journal of Aircraft*, Vol. 28, No. 5, 1991, pp. 320-327.
- [۹] سلطانی، محمدرضا، احمد شرفی، مجتبی دهقان منشادی. "بررسی میدان سرعت حول یک ترکیب بال - کانارد با استفاده از روش‌های تجربی و شبکه عصبی." *شریف*، ش. ۴۶، س. ۲۴، ۱۳۸۷.
- [۱۰] فیضیان، مهدی، مجتبی دهقان منشادی، مهرداد بزاززاده، مهدی ایل بیگی. "مطالعه جریان گردابه‌ای و تأثیر زاویه تیزی لبه حمله بال مثلثی با آشکارسازی دود." *دوازدهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران*، تهران، ۱۳۹۱.
- [11] Payne, F. M., K. D. Visser. "Leading edge vortex flow studies at the University of notre

dame steady and unsteady investigations.”1983-2000.

[12] Verhaagen, N. G., B. C. Van Bossuyt. “Flow on a 65-Deg Blunt Apex.” AIAA, 2006-3005.

[13] Huang, X. Z. “Critical Assessment of Test Cases on Vortex Breakdown over Slender Delta Wings under Static Model Conditions.” RTO-TR-AVT-080, 2009.

پی‌نوشت

1. TE80