بررسی تجربی اثر تولید کننده گردابه بر عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل Riso- B1-18

مجید خاشعی ورنامخواستی [۱*]، محمد حسن ملااحمدی ریزی[۲]، مهدی نیلی احمد آبادی[۳]

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی اصفهان، majidkhashei72@gmail.com

۲- کارشناس مهندسی مکانیک گرایش انرژی و سیالات، دانشگاه صنعتی اصفهان، molaahmadi1993@yahoo.com

۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، m.nili@cc.iut.ac.ir

چکیده

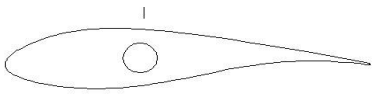
نسبت ضریب برآ به ضریب پسا برای ایرفویل، از پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل و ماشین‌های ساخته‌شده بر مبنای ایرفویل ازجمله توربین باد بوده است. بهبود عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل از مسائلی است که از دیرباز به آن توجه شده است. در این رابطه از روش‌های زیادی جهت افزایش کارایی ایرفویل و یا بال هواپیما استفاده شده است. استفاده از فلاپ، ایجاد حفره بر روی ایرفویل، ایجاد شیارهای ریز، استفاده از ایرفویل پله‌دار، استفاده از ایرفویل با لبه ضخیم و ... از مواردی است که دراین‌باره مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش مدل آزمایشگاهی هندسه ایرفویل ریزو طراحی و ساخته شد و پس از نصب مدل درون تونل باد، اثر تولید کننده گردابه در ضرایب نیرو، به‌صورت کیفی و کمی بررسی شد. تولیدکننده‌های گردابه استفاده شده نخ‌هایی با طول متفاوت در ارایش‌های متفاوت بوده‌اند. آزمایشات انجام شده شامل اندازه گیری نیروهای برآ وپسا می‌باشند. در بخش آزمایش‌های کمی، با استفاده از نصب لودسل و روش اندازه‌گیری نیرو ازیک‌طرف، ضرایب برآ و پسای ایرفویل ریزو ساده به‌همراه ریزو با گردابه ساز در سرعت جریان آزاد ۲۲/۳۶m/sو ۱۸/۱۹m/s که متناظر با اعداد رینولدز ۳۵۰۰۰۰ و ۲۹۰۰۰۰است و در زوایای حمله ۲- تا۲۵ درجه انجام شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهند که اضافه نمودن تولید کننده‌های گردابه به ایرفویل باعث افزایش حداکثر ضریب برآ، افزایش زاویه واماندگی و کاهش نیروی پسا می‌شود.

واژه های کلیدی: *ایرفویل ریزو-تولید کننده گردابه-ضرایب ایرودینامیکی- افزایش نیروی برا- کاهش نیروی پسا*

۱- مقدمه

گسترش جوامع بشری و درنتیجه نیاز روزافزون به انرژی، حرکت به سمت استفاده از منابع انرژی جدید را اجتناب‌ناپذیر کرده‌است. کاهش منابع سوخت فسیلی و آلاینده بودن آن، انگیزه کشورها را برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش داده‌است. مجموعه انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند در حدود ۱۸٪ از تقاضای انرژی جهان را پاسخ‌گو باشد [۱]. در این بین سرعت رشد استفاده از انرژی باد بیش از سایر انرژی‌های تجدید پذیر می‌باشد. میزان توان انرژی باد در سراسر کره زمین برابر با ۵۳۰۰۰ TWh در سال می‌باشد که ۳ برابر مصرف انرژی برق جهان در سال ۲۰۰۷ می‌باشد.

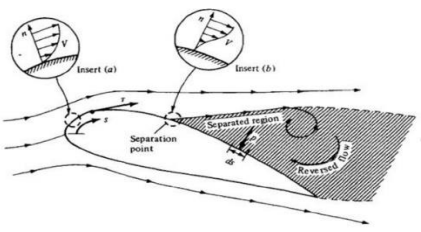
در همین راستا تمرکز بسیاری از شرکت‌های سازنده توربین بادی و مراکز تحقیقاتی بر روی طراحی و ساخت توربین باد کارآتر و باقدرت بیشتر می‌باشد. یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی توربین باد آیرودینامیک پره توربین بادی است. نسبت ضریب برآ(Lift coefficient) به ضریب پسا(Drag coefficient) یکی از مهم‌ترین پارامترها در عملکرد پره توربین بادی است. یکی از جدیدترین ایرفویل‌های مورد استفاده درتوربین‌های باد ایرفویل Riso می‌باشد که از لحاظ آیرودینامیکی عملکرد بسیار مناسبی برای پره‌های توربین باد دارد. به علت جدید بودن این ایرفویل، فعالیت‌های پژوهشی ناچیزی بر روی این نوع ایرفویل انجام شده است. در شکل زیر پروفیل این ایرفویل آورده شده است.



شکل۱- پروفیل ایرفویل ریزو

در این پروژه استفاده از تولید کننده گردابه بر روی ایرفویل ریزو در تونل باد با استفاده از روش تجربی اندازه‌گیری نیرو بررسی شده است. ایرفویل ریزو ، ایرفویلی بسیار جدید است که پژوهش‌های بسیار محدودی بر روی آن انجام گرفته است. علاوه بر آن استفاده از روش‌هایی مانند به‌کارگیری تولیدکننده گردابه نیز بسیار جدید و مورد توجه است. در این پژوهش سعی بر آن شده است تاثیر حالت های مختلف استقرار تولیدکننده های گردابه و تاثیر آنها در ضرایب برآو پسا در زوایای مختلف ایرفویل بررسی شود.

یکی از مثال‌های تشکیل لایه مرزی، جریان روی بال یا ایرفویل هواپیما است. اثرات حاصل از جدایش جریان را می‌توان با مشاهده تصویر زیر مشاهده کرد.



شکل۲- جدایش جریان روی ایرفویل

همان‌طور که در این شکل نشان داده شده‌است جریان درحرکت بر روی ایرفویل پس از مدتی دچار گرادیان فشار معکوس می‌شود و این گرادیان فشار به کمک اصطکاک موجبات جدایش را فراهم می‌کند. یک ناحیه‌ی وسیع در انتهای ایرفویل دچار جدایش جریان می‌شود، و درنتیجه فشار در انتهای جسم به‌شدت افت می‌کند و نمی‌تواند خود را بازیابی کند که درنتیجه یک نیروی دراگ بسیار بزرگ از این تفاوت فشار حاصل می‌شود. در هواپیماها با توجه به بزرگ بودن سطح بال و اهمیت بال در تولید نیروی لیفت، جدایش نقش مهمی ایفا می‌کند که در بعضی مواقع خطر سقوط هواپیما را نیز به دنبال دارد. درنتیجه از ابتدای تاریخ هوانوردی موضوع بررسی جریان بر روی بال مورد توجه بوده‌است.

۱-۱- اصول کارکرد تولیدکننده گردابه

یکی از عواملی که باعث ایجاد نیروی پسا می گردد جدایش جریان از روی سطح اجسام است. شیوه‌های مختلفی برای جلوگیری از جدایش لایه مرزی در هواپیما و کاربردهای مهندسی وجود دارد. یکی از وسایل معمول برای کنترل جریان بر روی سطح بالهای پسگرا، تولید کننده‌های گردابه هستند. بیش از ۵۰ سال است که از تولید کننده‌های گردابه برای بهبود پارامترهای آیرودینامیکی بال‌های هواپیما استفاده می‌شود. تولید کننده‌های گردابه جزء وسایل کنترل لایه مرزی هستند که یک انرژی اضافی به گرادیان فشار نامطلوب لایه مرزی که در حال جدایی از سطح می‌باشد، منتقل می‌کنند. این وسایل باعث تاخیر در جدایش جریان بر روی بال یک هواپیما در زوایای بالا می‌گردند. بدیهی است با به تعویق انداختن جدایش جریان، نیروی پسا نیز کاهش می‌یابد. این وسایل همچنین باعث افزایش حداکثر ضریب برآ می‌شوند.

تحقیقات بنیادی نشان داد که بکارگیری تولید کننده‌های گردابه خیلی ریز، موثرترین و کارآمدترین وسیله برای کاهش جدایش جریان درلایه های مرزی مغشوش است. مزایای عمده این نوع تولید کننده‌های گردابه علاوه بر کنترل موثر جدایش جریان، سادگی و پسای پایین آنها است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که بکارگیری تولید کننده‌های گردابه خیلی ریز کاهش قابل توجهی در جدایش جریان گذرنده از روی فلپ را دارند. همچنین افزایش ۱۰ درصدی در نیروی برآ، کاهش ۵۰ درصدی نیروی پسا و افزایش ۱۰۰ درصدی نسبت برآ به پسا از دیگر مزیت‌های استفاده از این وسایل می‌باشد[۲].

۲- مرور کار های پیشین

لین(lin) و همکاران [۳] ویژگی‌های آیرودینامیکی ایرفویل NACA0012 با سطح سینوسی را به‌صورت سه‌بعدی با استفاده از روش عددی LES بررسی کردند. در حالت اول سطح بالایی و پایینی ایرفویل به‌صورت سینوسی درآمد. درحالی‌که در حالت دوم علاوه بر سطح پایینی و بالایی، لبه‌ی ابتدایی و انتهایی نیز به‌صورت سینوسی درآمد. نتایج نشان می‌داد هنگامی‌که زاویه‌ی حمله از ۱۳ درجه(زاویه حمله واماندگی(stall)) کمتر باشد، ضریب برا(lift) برای هر دو حالت با سطح سینوسی کاهش می‌یابد. این در حالی است که برای زوایای حمله بیشتر از ۱۳درجه، این ضریب برای هر دو حالت بیشتر می‌شود، به‌طوری‌که این ضریب برای حالت دوم ۲۰ درصد بیشتر از حالت اول افزایش می‌یابد. در شکل زیر این دو نوع ایرفویل نشان داده‌شده است.

ولته (velte) و همکاران[۴] اثر استفاده از تیغه‌هایی به‌عنوان سازنده گردابه (Vortex generator) بر روی نیروی برا در نزدیکی نقطه‌ی واماندگی را به‌صورت تجربی با استفاده از تکنیک PIV سه‌بعدی بر روی یک ایرفویل بررسی‌کردند. آزمایش‌ها در دو عدد رینولدز ۹۰۰۰۰۰ و ۲۴۰۰۰۰ انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌داد، ایجاد گردابه‌های طولی توسط این تیغه‌ها و مخلوط سیال در نزدیکی دیواره، مومنتوم جریان زیادی به داخل ناحیه جدایش وارد می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌داد، استفاده از این تیغه‌ها سبب به تعویق انداختن جدایش در نزدیکی نقطه‌ی واماندگی می‌شود.

وونا(Voona) [۵] اثر استفاده از ایرفویل پله‌دار به همراه تزریق سیال را برای بهبود خصوصیات آیرودینامیکی ایرفویل NACA441 مانند نیروی دراگ و لیفت به‌صورت تجربی و عددی بررسی کرد. در داخل پله جت‌هایی نصب شده است که با تزریق سیال، جریان بر روی ایرفویل را کنترل می‌کند. میزان تزریق و زاویه تزریق توسط جت‌ها برای رسیدن به بهترین خاصیت‌های آیرودینامیکی قابل تنظیم است. نتایج نشان می‌داد با استفاده از پله، ضریب نیروی برا تا ۳۷ درصد و نسبت نیروی لیفت به دراگ تا ۱۲درصد قابل بهبود است. این عددها با بهبود عملکرد جت‌ها بیشتر هم خواهد شد.

بررسی تولید کننده‌های گردابه بعنوان یک وسیله جدید برآ بالا در هواپیماهای مسافربری توسط ملین(Tomas Melin) و همکارانش انجام شده‌است. آنها با استفاده از روش‌های تجربی و عددی به شبیه سازی رفتار آیرودینامیکی یک بال هواپیمای مسافربری که مجهز به تولیدکننده‌های گردابه باز شونده(Deployable) است پرداخته‌اند. نتایج تجربی تست تونل باد یک افزایش حدود ۳۰ درصدی را در حداکثر ضریب برآ ایرفویل و یک افزایش اندک در ضریب پسا مشخصه‌های واماندگی نشان می‌دهد[۶].

نتایج بدست آمده تا کنون احتمال زیاد شکل گیری جریان دنباله توسط تولید کننده های گردابه را نشان می دهد اما هنوز هیچ مزیتی در مورد راندمان سیستم پیشرانش بدست نیامده است. در تحقیق حاضربه بررسی تجربی اثر تولیدکننده های گردابه بر الگوی جریان روی سطح بالائی بال و همچنین ضرایب آیرودینامیکی بال پرداخته شده‌است.در این تحقیق از سه نوع تولید کننده گردابه با طول هاوقطر های مختلف استفاده شده است.

۳- تونل باد

آیرودینامیک مطالعه حرکت گازها –مهم‌ترین آن‌ها هوا- و تأثیر آن‌ها بر حرکت اشیایی است که در میانشان حرکت می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر آیرودینامیک طریقه حرکت هوا در اطراف اجسام است. روش‌های پژوهش در این علم در سه شاخه‌ی تئوری ، عددی و تجربی گسترش یافته است . روش‌های تئوری در اکثر موارد به علت پیچیدگی تحلیل جریان هوا در اطراف اجسام کارایی لازم را ندارد ، بنابراین پژوهش‌ها بر روی مسایل آیرودینامیکی بیشتر متکی به روش‌های عددی تجربی است .

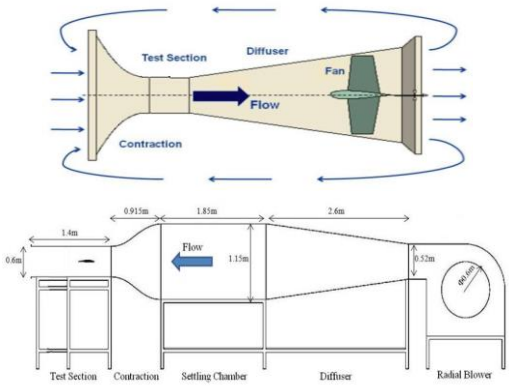
در روش‌های تجربی اثر جریان هوا بر روی اجسام را می‌توان به دو صورت مطالعه و بررسی نمود:

۱- اجسام را در هوای ساکن به حرکت درآورده و مطالعات لازم را انجام داد (نظیر پرواز آزاد)

۲- اجسام و یا مدل آن‌ها را در جریان هوا قرار داده و مشخصات آیرودینامیکی آن‌ها را مطالعه نمود .

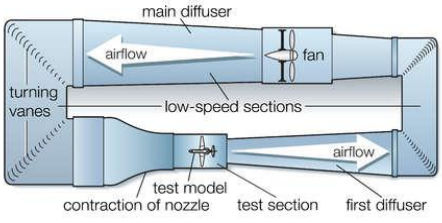
تونل باد ، جریان هوای کنترل‌شده‌ای را ایجاد می‌کند که این جریان هوا از اطراف مدل عبور کرده و بدین ترتیب اطلاعات لازم از چگونگی عبور جریان از اطراف مدل به دست می‌آید. ازاین‌رو می‌توان نتیجه‌گیری نمود که استفاده از تونل باد یکی از بهترین و ارزان‌ترین روش‌های تجربی برای انجام پژوهش-ها در زمینه علم آیرودینامیک است.

مبنای اصلی آزمایش‌های تونل باد بر اساس نظریه‌ی داوینچی(Da Vinci)و نیوتن(Newton) است. طبق این نظریه ، رفتار جریان سیال برای جسمی که در سیال حرکت می‌کند و این‌که سیال از روی جسم ساکن عبور کند ، یکسان است. بنابراین با این فرض که مدل ساکن و جریان هوا از روی آن عبور می‌کند ، می‌توان رفتار جریان هوا را مورد بررسی و مطالعه قرار داد. تونل بادها ازلحاظ سرعت جریان هوا در اتاق آزمون ، مسیر حرکت جریان و ابعاد ، طبقه‌بندی می‌شوند. تونل باد با سرعت کم ازلحاظ مسیر جریان هوا به دو نوع تونل باد مدارباز و تونل باد مداربسته تقسیم‌بندی می‌شوند .تونل باد مدارباز به دو نوع مکنده و دمنده تقسیم‌بندی می‌شوند ، که به ترتیب در شکل‌های زیر نشان داده شده‌اند.



شکل۳-تونل باد مدارباز مکنده و تونل باد مدارباز دمنده

در تونل باد مداربسته ، جریان هوا در کانالی که ابتدا و انتهای آن به هم متصل است ، عبور می‌کند. به‌عبارت‌دیگر مسیر جریان هوا در این نوع تونل باد بسته است و جریان هوا در تونل باد گردش می‌کند. شکل زیر، نمونه‌ای از تونل باد مداربسته را نشان می‌دهد.

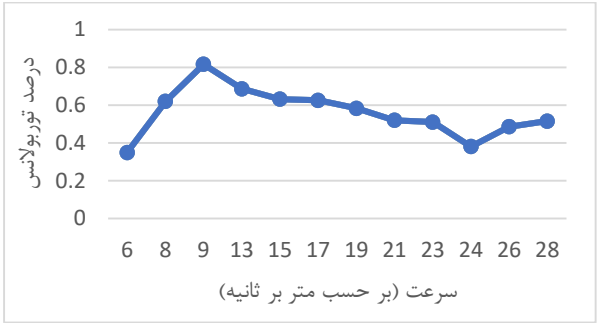


شکل۴- تونل باد مداربسته

در این پژوهش از تونل باد مدار باز نوع مکنده استفاده شده است.

۴- شرایط پژوهش

جهت انجام تست‌های نیرویی از تونل باد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شده است. این تونل باد، یک تونل باد کوچک با سرعت بیشینه جریان هوا برابر با ۲۸ m/s می‌باشد. همچنین مقطع آزمایش(Test section) این تونل ۳۰×۳۰ سانتی‌متر است و فاقد هرگونه وسیله اندازه‌گیری نیرو و گشتاور می‌باشد. نتایج تست اندازه‌گیری توربولانس تونل باد مدارباز آموزشی دانشگاه صنعتی اصفهان در نمودار زیر نمایش داده شده است.



شکل۵- نتایج تست اندازه‌گیری توربولانس تونل باد

شرایط تست:

ساعت تست: ۱۴ الی ۱۵ و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد

پراب مورداستفاده: Dantec یک‌بعدی در مرکز مقطع آزمون

نگه‌دارنده پراب: L شکل (۹۰ درجه)

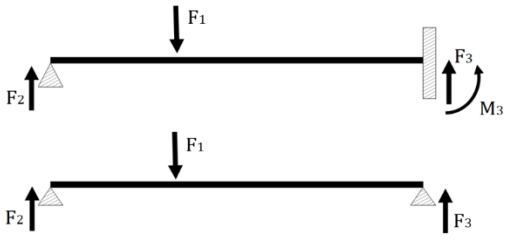
به‌طورکلی اندازه‌گیری نیروهای آیرودینامیکی وارده بر مدل در تونل باد، توسط وسیله‌ای به‌نام بالانسر انجام می‌شود. در موارد خاصی که امکان استفاده از این دستگاه وجود ندارد، متناسب با نوع آزمایش، مجموعه آزمایش طراحی و ساخته می‌شود.

با مطالعه‌ی روش‌های اندازه‌گیری نیرو در تمامی آزمایش‌های انجام‌شده در تونل باد، ۲ راهکار عمده وجود دارد:

الف) نصب تمامی اجزا اعم از مدل و قسمت‌های دیگر بر روی لودسل(Load cell)

ب) استفاده از پایه مفصل دار و تکیه‌گاه لودسل

راهکار ب، به‌عنوان راهبرد در کار حاضر انتخاب گردید. این روش که اکثراً مورداستفاده قرار می‌گیرد بر مبنای اندازه‌گیری نیرو ازیک‌طرف (side force) استوار است؛ بدین‌صورت که مدل تیر ۲ سر لولا یا تیر یک‌سر درگیر و یک‌سر لولا با نیروی وارده در طول تیر، به‌عنوان مبنا قرار می‌گیرد. در این حالت نیروی واردشده در طول تیر قابل محاسبه است. شکل تصویر این دو تیر را نشان می‌دهد.

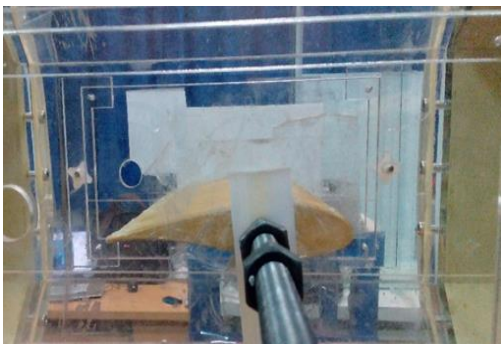


شکل۶- تیر یک سر درگیر و یک سر لولا و تیر دو سر لولا

در این روش انتهای بازو به نیروسنج یا لودسل وصل می‌شود. در محل اتصال انتهای بازو به زمین یا هر مکان موردنظر، بسته به نوع کار، از اتصال مفصل یا درگیر کردن استفاده می‌شود. بنابراین نیروی وارده بر مدل به‌عنوان نیرو در طول تیر فرض شده و اندازه‌گیری می‌شود. البته با کالیبره کردن نیروسنج یا لودسل می‌توان نیروی وارده بر مدل را مستقیماً به‌دست آورد و محاسبات ثانویه را انجام نداد.

۵- مشخصات نمونه ایرفویل

برای بررسی اثر کمی تولیدکننده گردابه مدل ریزو از جنس چوب با طول کورد۱۵ cmو عرض۳۰/۱ cm اسبتفاده شد. مدل اصلی از چسباندن ۱۲قطعه مثل هم و جدا به عرض۲/۵ cm ساخته شده است. مراحل آماده سازی مدل به این صورت می‌باشد که ابتدا نقشه‌ی آن در نرم افزار اتوکد(Autocad) کشیده شده است. سپس چوب توسط دستگاه CNC برش داده شده و مدل ریزو با عرض ۲/۵ cm و کورد۱۵ cm آماده می‌شود. در واقع ۱۲ قطعه به ضخامت ۲/۵ cm از هر نوع ساخته شده است. سپس ۱۲ قطعه‌ی مربوطه با چسب چوب به یک‌دیگر متصل شده و مدل اصلی با عرض ۳۰/۱ cm را می‌سازند. بعد از ساخت مدل برای صافی و یک دست شدن سطح آن دو کار انجام شده است. ابتدا از کاغذ سمباده مناسب استفاده شده است، به این صورت که با سمباده زدن‌های متوالی سطح مدل‌ها صافی سطح نسبی پیدا کرده، سپس برای تکمیل کار و رسیدن به صافی سطح مناسب از بتونه وکیلر مخصوص استفاده شده است به این صورت که تمام سطح مدل‌ها به دقت و بدون برآمدگی توسط این نوع کیلر پوشیده شده است. در شکل مدل ایرفویل ریزو نصب شده در تونل نشان داده شده است.



شکل۷- مدل ایرفویل ریزو نصب شده در تونل

۶- تست های انجام شده

در این تحقیق به منظور بهینه سازی شکل و جایگاه استقرار تولیدکننده های گردابه تست‌های مختلف گرفته شد. اولین تست‌ها، تست‌های ایرفویل ساده به منظور مقایسه و بهینه‌سازی می‌باشد. لازم به ذکر است که تمام تست‌ها در دو سرعت برای بررسی عملکرد بهینه تر گرفته‌شدند. در ادامه تست ها به ترتیب زیر می باشند:

۱. تست نخ های باضخامت ۲,۷mm و طول ۵cm با ارایش stagger در دو ردیف با فاصله عرضی ۴cm و تست دوباره فوق در ارایش inline در فاصله ۰,۰۸ کورد ایرفویل
۲. تست نخ های باضخامت۱,۶mm و طول ۵cm باهمان ارایش stagger فوق (به منظور مقایسه)
۳. تست نخ های باضخامت ۲,۷mm و طول ۵cm در یک ردیف در فاصله ۰,۴کورد ایرفویل بافاصله عرضی ۴cm
۴. تست نخ های باضخامت ۲,۷mm و طول ۵cm در یک ردیف در فاصله ۰,۶کورد ایرفویل بافاصله عرضی ۴cm
۵. تست نخ های باضخامت ۲,۷mm و طول ۸cm در یک ردیف در فاصله ۰,۴کورد ایرفویل بافاصله عرضی ۵cm
۶. تست نخ های باضخامت ۱,۶mm و طول ۵cm در یک ردیف در فاصله ۰,۴کورد ایرفویل بافاصله عرضی ۲cm

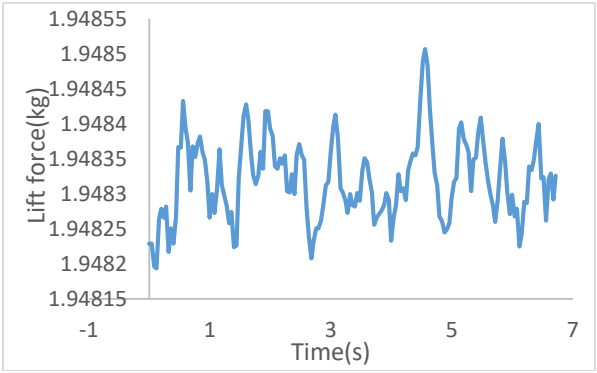
شکل۸- حالت 1 (inline)

شکل۹- حالت1 (stagger)

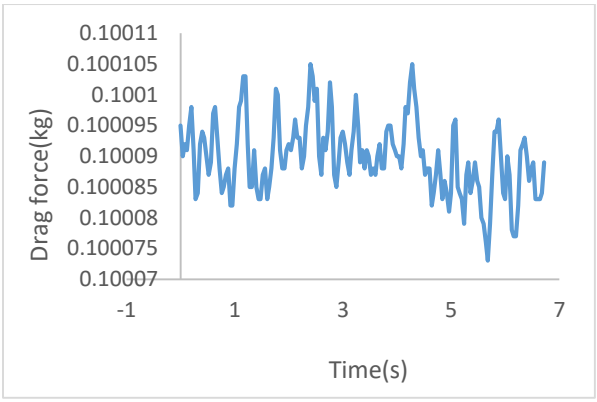
لازم به ذکر است که تغییر سایز نخ‌ها در دو حالت صورت گرفتند. یکی بدون توجه به ثابت بودن سطح اضافه شده به ایرفویل وصرفا به خاطر مقایسه آرایش و دیگری با توجه به ثابت بودن سطح اضافه شده به ایرفویل می‌باشد.

پس از مشخص شدن نسبت نیروی تکیه‌گاه و نیروی مرکز مدل اقدام به اندازه‌گیری نیروهای آیرودینامیکی گردید. روش کار بدین‌صورت است که ابتدا در حالت تونل باد خاموش اقدام به اندازه‌گیری نیرو می‌شود و پس از ثبت نیروی مبنا، تونل باد روشن می‌شود. اختلاف نیروها در ۲ حالت، نیروی اصلی را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به این‌که مقدار نیروی برا در برخی زوایای حمله از وزن مدل و مجموعه بیش‌تر است جهت جلوگیری از بلند شدن تبر، وزنه‌هایی به طور موقت بر روی تیر اصلی قرار گرفت. سیستم ثبت نیرویی به‌صورت بر خط و برحسب زمان می‌باشد و نیروهای وارد شده بر تکیه‌گاه را به‌صورت لحظه‌ای و بر حسب زمان مشخص می‌کند. بنابراین خروجی نرم‌افزار نمودار نیرو بر حسب زمان می‌باشد که باید از این نمودار متوسط گیری کرد و نیروی متوسط را به‌عنوان نیروی میانگین ثبت

کرد. نمودارهای و نمودارهای نیروی تکیه‌گاه لودسل برآ و پسا برحسب زمان در کار تجربی مربوط به زاویه حمله ۱۰ درجه و حالت تونل خاموش را نشان می‌دهد.



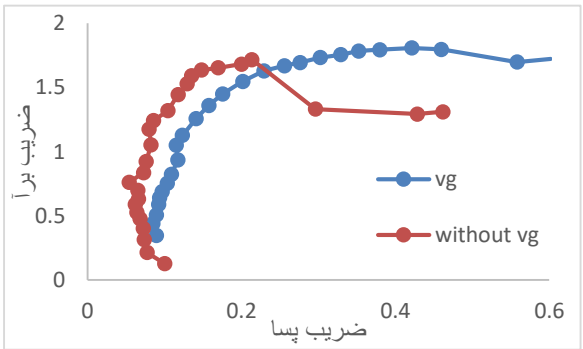
شکل۱۰- تغییرات نیروی تکیه‌گاه لودسل برآ برحسب زمان در زاویه حمله ۱۰ درجه در حالت تونل خاموش



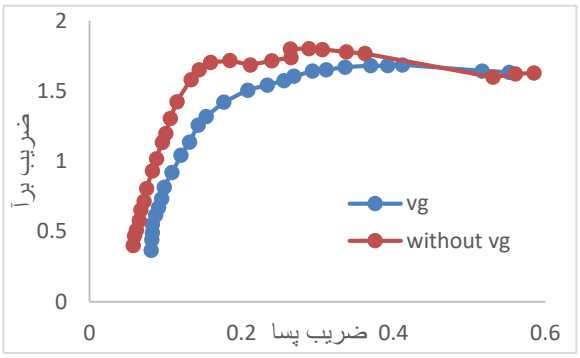
شکل۱۱- تغییرات نیروی تکیه‌گاه لودسل پسا برحسب زمان در زاویه حمله ۱۰ درجه در حالت تونل خاموش

در ادامه نتایج تغییرات ضریب برآ، پسا و نسبت ضریب برآ به پسای ایرفویل ریزو بر حسب زاویه حمله در حالت ساده و باتولیدکننده گردابه آمده است. تکرار پذیری آزمایش مربوط به اندازه‌گیری نیروهای آیرودینامیکی نیز مورد بررسی قرار گرفت. در کار حاضر اندازه‌گیری نیرو در هر نقطه مورد نظر بیش از ۳ مرتبه تکرار گردید وپس از محاسبه حدود ۱۱ درصدی خطا در حالت ریزو با تولیدکننده گردابه،و ۸ درصدی خطا در حالت بدون تولید کننده گردابه(در رینولدز پایین تر)، نتایج پس از اطمینان از عدم تغییر نهایی شد.وجود درصد خطای بالاتر در نتایج ریزو با تولیدکننده گردابه به خاطر تاثیر گردابه های ایجاد شده توسط تولیدکننده گردابه ودر نتیجه لرزش لودسل ها می باشد.

۷- شکل‌ها و نمودارها

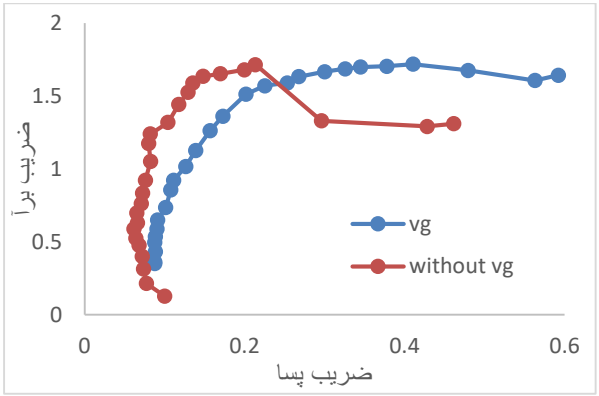


شکل۱۲- نتایج مربوط به میانگین نیروهای برا به پسا در عدد رینولدز ۲/۹*۱۰^۵ برای ایرفویل ریزوحالت ۱

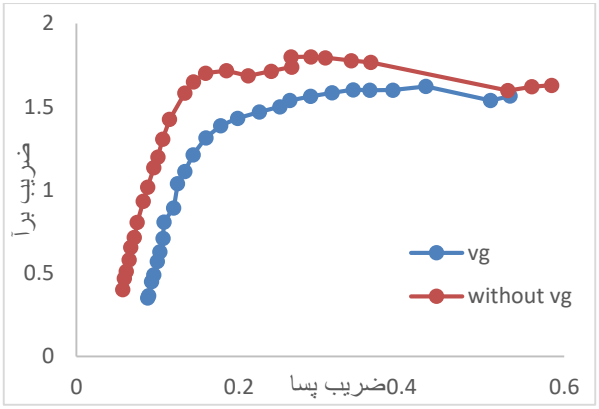


شکل۱۳- نتایج مربوط به میانگین نیروهای برا به پسا در عدد رینولدز ۳/۵*۱۰^۵برای ایرفویل ریزوحالت۱

نمودار های بالا نشان می دهند که استفاده از تولیدکننده گردابه در رینولدز بالا باعث افزایش درگ و کاهش لیفت در ایرفویل نسبت به حالت ساده ایرفویل می شود. هم‌چنین در نمودار نیروی برا به نیروی پسا نیز افت قابل ملاحظه ای مشاهده می شود. پس در کل در این حالت استفاده از تولیدکننده گردابه در سرعت های پایین نتیجه بخش تر است. اما همان طور که در رینولدز پایین مشاهده می شود استفاده از تولیدکننده گردابه تا زاویه حمله ۱۷ درجه تقریبا مانند ایرفویل ساده است ولی از این زاویه به بعد لیفت بیشتری نسبت به ایرفویل ساده می دهد و با مغشوش کردن جریان باعث تعویق واماندگی در ایرفویل می شود. استفاده از تولیدکننده گردابه در زاویه ۲۰درجه باعث افزایش ۳۰ درصدی لیفت وهمچنین باعث افزایش نیروی درگ از حدود زاویه ۵ تا ۱۷ نسبت به حالت ایرفویل ساده شده است. اما در مجموع شاهد عملکرد بهتر حالت با تولیدکننده گردابه نسبت به حالت ساده از زاویه ۱۷ به بعد در نمودار نسبت نیروی برا به نیروی پسا می باشیم.



شکل۱۴- نسبت ضریب نیروهای برآ به پسا در عدد رینولدز ۲/۹*۱۰۵را برای ایرفویل ریزو ساده و vgحالت ۱



شکل۱۵- نسبت ضریب نیروهای برآ به پسا در عدد رینولدز ۳/۵*۱۰۵را برای ایرفویل ریزو ساده و vgحالت ۱

استفاده از تولیدکننده گردابه در عدد رینولدز ۳/۵*۱۰۵ باعث افزایش درگ و کاهش لیفت در ایرفویل نسبت به حالت ساده ایرفویل می شود. هم‌چنین در نمودار نیروی برا به نیروی پسا نیز افت قابل ملاحظه ای مشاهده می شود. پس در کل در این حالت استفاده از تولیدکننده گردابه در سرعت های پایین نتیجه بخش تر است. در رینولدز ۲/۹*۱۰۵ از زاویه ۵ تا ۱۷ درجه نیروی برای کمتری در حالت باتولیدکننده گردابه نسبت به حالت ساده داریم اما از زاویه ۱۷ نیروی برای بیشتری وجود دارد و واماندگی تا زاویه ۲۰ درجه به تعویق افتاده است. همچنین در این رینولدز از زاویه ۵ تا ۱۸ درجه افزایش نیروی درگ و پس از ان کاهش نیروی درگ را نسبت به حالت ساده مشاهده می‌کنیم به طوری که این کاهش به مقدار ۱۹ درصد در زاویه ۲۰ درجه می باشد. در مجموع با توجه به نمودار نسبت برا به پسا بهبود عملکرد را از زاویه ۱۵ درجه در این حالت مشاهده می‌کنیم. در نهایت نتیجه بهینه در این حالت استفاده از تولیدکننده گردابه در رینولدز ۲۹۰۰۰۰ودر حالت stagger می باشد.

۸- نتیجه‌گیری

بهبود عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل از مسایلی است که از دیرباز به آن توجه شده است. در این رابطه از روش های زیادی جهت افزایش کارآیی ایرفویل و با بال هواپیما استفاده شده است. استفاده از فلاپ، ایجاد حفره بر روی ایرفویل، ایجاد شیار های ریز، استفاده از ایرفویل پله دار، استفاده از ایرفویل با لبه ضخیم و ...از مواردی است که در این باره مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش مدل آزمایشگاهی هندسه ایرفویل ریزو به‌همراه بستر آزمون طراحی و ساخته شد و پس از نصب مدل درون تونل باد، اثر انواع تولیدکننده گردابه برای کاهش نیروی پسا و افزایش نیروی برآ به‌صورت کمی بررسی شد. یکی از راه های بهبود عملکرد آیرودینامیکی هواپیما در شرایط حرکتی و مانوور، فهم پارامترهای جریان روی سطوح آن می باشد. در اعداد رینولدز پایین، جریان لایه مرزی عموما پایدار می باشد و حضور گرادیان فشار معکوس، منجر به جدایش آرام با چسبندگی یا بدون چسبندگی مجدد توربولانسی می شود. در غیاب آشفتگی اجباری خارجی، جدایش می تواند به لبه فرار ایرفویل کشیده شود که منجر به پسای فشاری بزرگ روی ایرفویل می شود. بنابراین کنترل جدایش جریان مخصوصا به تعویق انداختن آن بسیار حائز اهمیت می باشد.به تاخیر انداختن جدایش به علت اضافه نمودن مومنتوم به ناحیه نزدیک دیواره انجام می شود. تولید کننده گردابه، نوعی از وسیله کنترل جریان می باشد که لایه مرزی آرام را روی سطح ایرفویل به لایه مرزی درهم انتقال می دهد. استفاده از تولید کننده گردابه واماندگی را نیز تا زوایای بالا به تاخیر می اندازد. در این تحقیق، ما از نخ های مختلف و در آرایش ها و جایگاه های مختلف برای به تاخیر انداختن جدایش جریان استفاده کرده‌ایم. همینطور نخ های با طول وضخامت مختلف نیز مورد بررسی قرارگرفتند تا بتوانیم مقایسه‌ای بین این تولیدکننده گردابه ها و حالت بدون تولیدکننده گردابه انجام دهیم. نهایتا نتایج نشان داد که استفاده از نخ های تولید کننده گردابه در اعداد رینولدز پایین، بسیار موثر بوده و عملکرد آیرودینامیکی را بهبود می بخشد ولی در رینولدز بالا، استفاده از این نخ ها ضریب پسا را افزایش داده و عملکرد نامناسبی دارد .

در این بخش آزمایش‌ها ، با استفاده از نصب لودسل و روش اندازه‌گیری نیرو ازیک‌طرف، ضرایب برآ و پسای ایرفویل ریزو ساده به‌همراه ریزو با تولیدکننده گردابه به ضخامت های ۲/۷ و۱/۶ میلی‌متر در اعداد رینولدز ۲/۹*۱۰۵ و ۳/۵*۱۰۵ و در زوایای حمله ۲-تا ۲۵ درجه اندازه‌گیری شد. ابتدا تجهیزات نصب مدل در تونل باد دانشگاه صنعتی اصفهان نصب گردید. سپس با نصب سیستم لودسل، سیستم اندازه‌گیری نیروهای پسا و برآ در تونل باد راه اندازی گردید. نتایج این بخش کاهش ضریب پسا و افزایش نسبت ضریب برآ به پسا در زوایای حمله بالارا در حالت تولیدکننده گردابه دار نشان می‌دهد.

در تست های فوق نشان دادیم که استفاده از تولیدکننده گردابه در عدد رینولدز ۲/۹*۱۰۵، در ارایش stagger نسبت به ارایش inline بهینه تر می باشد وهمچنین دیدیم که در مقایسه نخ های با ضخامتmm ۱/۶و mm ۲/۷در ارایش stagger دیده شد که استفاده از نخ های ضخامت بیشتر نتایج بهینه تری را ایجاد می‌کند. پس از آن به بررسی جایگاه استقرار تولیدکننده گردابه ها پرداختیم که مشاهده شد قرارگیری تولیدکننده گردابه ها در ۰,۴ کورد بهینه ترین حالت در کل تحقیق را باعث می شود.همچنین در این محل تغییر طول نخ ها و ضخامتشان بررسی شد که نتیجه حاکی از آن بود که استفاده از تولیدکننده گردابه های ۵cm وضخامتmm ۲/۷ نسبت به قطر های کمتر نخ ها و یا طول بیشتر همین نخ های با ضخامت ۲/۷ بهینه ترمی باشد .

۹- مراجع

[1] Mostafaeipour, A., Jadidi, M., Mohammadi, K., and Sedaghat, A., “An analysis of wind energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 641-650, 2014.

[2] Lin, JohnC . (1999)," Control of Turbulent Boun dary Layer Separation Using Micro Vortex Generators", 30th AIAA Fluid Dynam ics Confere nce, AIAA 99-3404.

[3] S. Lai, J. C., and M. F. Platzer. "Jet characteristics of a plunging airfoil." *AIAA journal* 37, no. 12 (1999): 1529-1537

[4] Velte, Clara Marika, Martin Otto Lavér Hansen, Knud Erik Meyer, and Peter Fuglsang. "Evaluation of the Performance of Vortex Generators on the DU 91-W2-250 Profile using Stereoscopic PIV." In International Symposium on Energy, Informatics and Cybernetics: Focus Symposium in the 12th World Multiconference on

Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2008), pp. 263-267. 2008.

[7] Voona, Ranganadhan. "Enhancing the aerodynamic performance of stepped airfoils." (2012).

[8] Melin, Tomas, Crippa, Simone, Holly, Martin and Smid, Miroslav, (2006)," Investigating Active Vortex Generators as a Novel High Lift Device", 25th Internation al Congress of the Aeron autical Sciences, ICAS 2006

[Online].Available: https://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf. [Accessed: 10-Sep-2016].