

بررسی تجربی اثر فلپ بر عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل Riso

محمدحسن ملاحمدی ریزی^{۱*}، مجید خاشعی ورنامخواستی^۲، مهدی نیلی احمدآبادی^۳

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

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

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

چکیده

۶۸۰۰۰۰ دلار خرید یا فروش گاز طبیعی در سال می‌باشد. بنابراین گسترش استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر در درازمدت می‌تواند سهم مهمی در اقتصاد جوامع داشته باشد. در همین راستا تمرکز بسیاری از شرکت‌های سازنده توربین بادی و مراکز تحقیقاتی بر روی طراحی و ساخت توربین باد کارآتر و با قدرت بیشتر می‌باشد. یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی توربین باد آیرودینامیک پره توربین بادی است. نسبت ضریب برآ به ضریب پسا یکی از مهم‌ترین پارامترها در عملکرد پره توربین بادی است. با توجه به این مطلب، اکثر تحقیقات باهدف رسیدن به بیشترین نسبت ضریب برآ به پسا در شاخه‌های زیر انجام می‌شود:

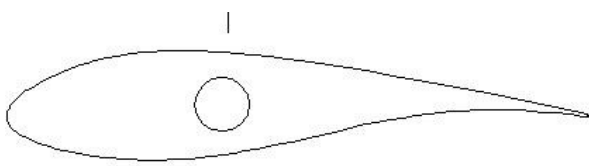
الف- طراحی ۳ بعدی پره توربین باد از روش‌های متنوع

ب- تصحیح هندسه ۲ بعدی سطح ایرفویل جهت رسیدن به کارایی آیرودینامیکی بالاتر

ج- ایجاد ناهمواری در سطح ایرفویل مانند ایجاد زبری سطح یا حفره

د- ایجاد سطوح متحرک در پره توربین باد

یکی از جدیدترین ایرفویل‌های مورد استفاده در توربین‌های باد ایرفویل ریزو 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 ۱ پروفیل این ایرفویل آورده شده است.



شکل ۱- پروفیل ایرفویل ریزو

نسبت ضریب برآ به ضریب پسا برای ایرفویل، از پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل و ماشین‌های ساخته‌شده بر مبنای ایرفویل از جمله توربین‌ها می‌باشد. 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 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 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 فلپ با مقاطع مختلف ولی سطح تصویر یکسان برای افزایش نیروی برآ، به‌صورت کمی بررسی شد. در این آزمایش‌ها، با استفاده از نصب لودسل و روش اندازه‌گیری نیرو از یک طرف، ضرایب برآ و پسای ایرفویل ریزو بدون فلپ و به‌همراه فلپ‌های با سطح تصویر ۱۳۵۴/۵ میلی‌متر مربع در اعداد رینولدز $10^5 * 2/9$ و $10^5 * 3/5$ و در زوایای حمله ۲- تا ۲۲ درجه اندازه‌گیری شد. نتایج این بخش افزایش ضریب پسا و برآ و افزایش نسبت ضریب برآ به پسا در حالت فلپ‌دار نشان می‌دهد. همچنین استفاده از فلپ باعث کاهش زاویه‌ی واماندگی در عدد رینولدز $10^5 * 3/5$ شد. در عدد رینولدز $10^5 * 2/9$ در حالت فلپ با دالبور ۹۰ درجه زاویه واماندگی ۱ درجه بهبود پیدا کرد ولی در سایر حالات واماندگی بدون تغییر ماند.

واژه‌های کلیدی: ایرفویل ریزو- ضریب برآ- ضریب پسا- فلپ- زاویه واماندگی

۱- مقدمه

گسترش جوامع بشری و در نتیجه نیاز روزافزون به انرژی، حرکت به سمت استفاده از منابع انرژی جدید را اجتناب‌ناپذیر کرده است. کاهش منابع سوخت فسیلی و آلاینده بودن آن، انگیزه کشورها را برای استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر افزایش داده است. مجموعه انرژی‌های تجدید پذیر 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 ۳۰۰۷ TWh در سال می‌باشد که ۳ برابر مصرف انرژی برق جهان در سال ۲۰۰۷ می‌باشد [۲]. در فاصله سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۰ میلادی در حدود ۱/۵٪ از انرژی الکتریکی جهان از طریق انرژی باد تأمین شده است. اهمیت استفاده از منابع تجدید پذیر انرژی علاوه بر عدم تأثیر بر محیط‌زیست از نظر اقتصادی بسیار اهمیت دارد. به‌عنوان نمونه در سال ۲۰۱۴ هر مگاوات ساعت تولید انرژی برق از منابع تجدید پذیر برابر با

۱-۱- برخی از پژوهش‌های انجام شده برای بهبود عملکرد ایرفویل

گریگوریو و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۸ اثرات استفاده از کویتی با شکل دایره بر روی ایرفویل با ضخامت زیاد با جریان مکش و دمش و یا تلفیقی از آن دو را بررسی کردند. پروفیل فشار بر روی ایرفویل و داخل کویتی و همچنین جریان بر روی ایرفویل و داخل کویتی با استفاده از روش PIV محاسبه شدند. هنگامی که تنها از کویتی استفاده شده و از تزریق یا مکش جریان استفاده نمی‌شد، ورتکس‌ها توسط کویتی محدود نشده و ریزش گردابه بازهم باعث کاهش عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل می‌شد. این

انحنای ایرفویل، نیروی برآ افزایش می‌یابد مفید بوده و به خاطر اینکه این افزایش انحنای باعث افزایش نیروی پسا و وامانده شدن ایرفویل در زوایای حمله‌ی کوچکتر می‌شود، مضر است.

در این پژوهش اثر استفاده از فلپ بر روی ایرفویل ریزو در تونل باد با استفاده از روش تجربی اندازه‌گیری نیرو بررسی شده است. فلپ‌های مورد استفاده در این پروژه از نوع تیغه‌ای بوده و در کل چهار فلپ با سطوح مقطع مختلف ولی سطح تصویر یکسان استفاده شد و تاثیر هر کدام بررسی شد و با هم مقایسه گردید.

۲- شرح آزمایش

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 متر بر ثانیه می‌باشد. همچنین مقطع آزمایش این تونل ۳۰×۳۰ سانتی‌متر است و فاقد هرگونه وسیله اندازه‌گیری نیرو و گشتاور می‌باشد. در کار حاضر جهت اندازه‌گیری نیروهای برآ از یک لودسل اس شکل زمیک مدل اچ ۳ سی ۳ استفاده شده است که در شکل ۲ نشان داده شده است. این لودسل قابلیت اندازه‌گیری نیرو تا ۵۰ کیلوگرم را داراست و جنس آن از آلایژ استیل است.



شکل ۲- لودسل اندازه‌گیری نیروی برآ

همچنین جهت اندازه‌گیری نیروهای درگ از یک لودسل خمشی زمیک مدل ال ۶ دی استفاده شده است که در شکل ۳ نشان داده شده است. این لودسل قابلیت اندازه‌گیری نیرو تا ۳ کیلوگرم را داراست و جنس آن آلایژ آلومینیوم است.



شکل ۳- لودسل اندازه‌گیری نیروی پسا

جهت اندازه‌گیری نیرو در این پژوهش از راهکار استفاده از پایه مفصل دار و تکیه‌گاه لودسل استفاده شده است. در این راهکار انتهای بازو به نیروسنج یا لودسل وصل می‌شود. در محل اتصال انتهای بازو به زمین یا هر مکان

درحالی است که استفاده از مکش و یا دمش در محدوده‌ی خاص، سبب کنترل جدایش جریان می‌گردد.

لین و همکاران [۴] ویژگی‌های آیرودینامیکی ایرفویل NACA0012 با سطح سینوسی را به صورت سه بعدی و با استفاده از روش عددی LES بررسی کردند. در حالت اول سطح بالایی و پایینی ایرفویل به صورت سینوسی درآمد. درحالی‌که در حالت دوم علاوه بر سطح پایینی و بالایی، لبه‌ی ابتدایی و انتهایی نیز به صورت سینوسی درآمد. نتایج نشان می‌داد هنگامی‌که زاویه‌ی حمله از ۱۳ درجه (زاویه حمله واماندگی) کمتر باشد، ضریب برآ برای هر دو حالت با سطح سینوسی کاهش می‌یابد. این در حالی است که برای زوایای حمله بیشتر از ۱۳ درجه، این ضریب برای هر دو حالت بیشتر می‌شود، به طوری‌که این ضریب برای حالت دوم ۲۰ درصد بیشتر از حالت اول افزایش می‌یابد.

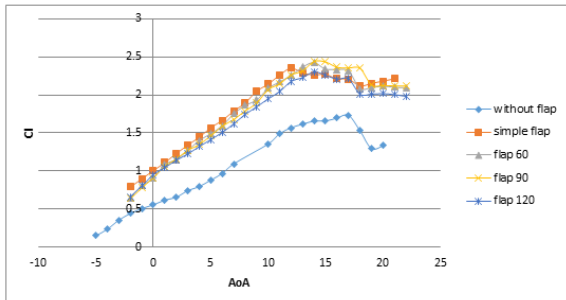
پرینس و همکاران [۵] با استفاده از جت‌های دمش هوا بر روی ایرفویل، سعی در کنترل جریان بر روی ایرفویل و تأخیر جدایش و پدیده‌ی واماندگی بر روی ایرفویل داشتند. آن‌ها این پدیده را به صورت عددی شبیه‌سازی کرده و به صورت تجربی نیز آزمایش کردند. برای بررسی تجربی، فشار بر روی سطح ایرفویل قابل اندازه‌گیری بوده، همچنین از ریک فشار برای اندازه‌گیری فشار در نقاط مختلف نزدیک به هم استفاده می‌شد. نتایج نشان می‌داد جت‌های هوا سبب تأخیر جدایش و انجام پدیده‌ی واماندگی در زوایای حمله بالاتر می‌شود. در حالتی که از جت‌های هوا استفاده می‌شد، ضریب نیروی برآ در زوایای حمله بالاتر سیر نزولی به خود می‌گیرد.

ولته و همکاران [۶] اثر استفاده از تیغه‌هایی به عنوان سازنده گردابه بر روی نیروی برآ در نزدیکی نقطه‌ی واماندگی را به صورت تجربی با استفاده از تکنیک PIV سه بعدی بر روی یک ایرفویل بررسی کردند. آزمایش‌ها در دو عدد رینولدز ۹۰۰۰۰ و ۲۴۰۰۰۰ انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌داد، ایجاد گردابه‌های طولی توسط این تیغه‌ها و مخلوط سیال در نزدیکی دیواره، مومنوم 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.

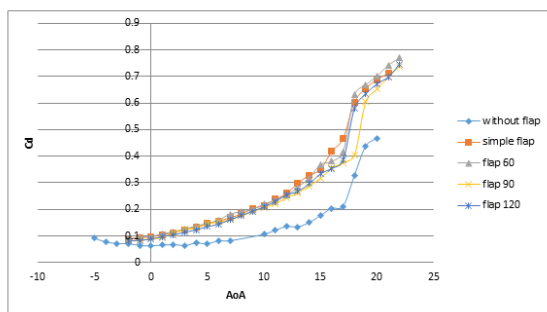
وونا [۷] اثر استفاده از ایرفویل پله‌دار به همراه تزریق سیال را برای بهبود خصوصیات آیرودینامیکی ایرفویل NACA441 مانند نیروی درآگ و لیفت به صورت تجربی و عددی بررسی کرد. در داخل پله جت‌هایی نصب شد که با تزریق سیال، جریان بر روی ایرفویل را کنترل می‌کند. میزان تزریق و زاویه تزریق توسط جت‌ها برای رسیدن به بهترین خاصیت‌های آیرودینامیکی قابل تنظیم است. نتایج نشان می‌داد با استفاده از پله، ضریب نیروی برآ تا ۳۷ درصد و نسبت نیروی لیفت به درآگ تا ۱۲ درصد قابل بهبود است. این عددها با بهبود عملکرد جت‌ها بیشتر هم خواهد شد.

۱-۲- استفاده از فلپ جهت بهبود عملکرد ایرفویل

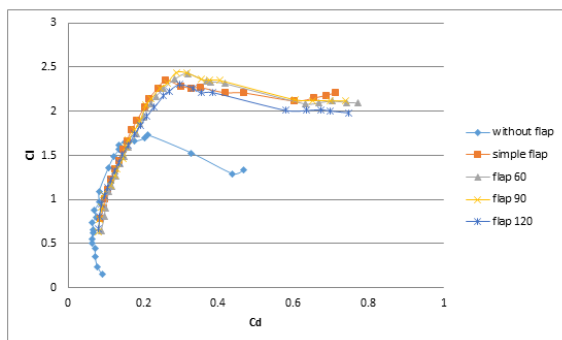
فلپ تیغه‌ای، وسیله‌ای ساده است که به صورت یک نوار نازک در لبه‌ی انتهایی ایرفویل بر روی سطح فشار جای می‌گیرد. ضخامت این نوار معمولاً ۱ تا ۸ درصد طول کورد بوده و می‌تواند نیروی لیفت را به مقدار قابل توجه افزایش داده و زمان واماندگی را به اندازه‌ی کوچکی به تأخیر بیندازد. در واقع فلپ باعث افزایش انحنای ایرفویل می‌گردد. انحنای ایرفویل می‌تواند از جهتی مفید و از جهتی دیگر مضر باشد. از این جهت که با افزایش



شکل ۵- نمودار ضریب برآ بر حسب زاویه حمله در رینولدز $2/9 \times 10^5$



شکل ۶- نمودار ضریب پسا بر حسب زاویه حمله در رینولدز $2/9 \times 10^5$



شکل ۷- نمودار ضریب برآ بر حسب ضریب پسا در رینولدز $2/9 \times 10^5$

همانطور که در شکل ۵ نمایان است، برای حالت ایرفویل بدون فلپ در عدد رینولدز $2/9 \times 10^5$ ، استال در زاویه ۱۷ درجه رخ داده است. همچنین بیشینه ضریب لیفت در این حالت حدود $1/73$ است و در نقطه‌ی استال ضریب درگ برابر $0/21$ است. در عدد رینولدز $2/9 \times 10^5$ استفاده از فلپ باعث افزایش ضریب برآ در تمام زوایای حمله شده است ولی زاویه‌ی واماندگی کاهش یافته است. در تمامی حالات به جز حالت فلپ دالبوردار با زاویه‌ی ۹۰ درجه، زاویه واماندگی در حدود ۱۷ درجه است در حالی که در حالت ایرفویل به همراه فلپ دالبوردار ۹۰ درجه‌ای زاویه واماندگی حدود ۱۸ درجه است. در حالت فلپ ساده بیشینه ضریب برآ $2/35$ است که در زاویه حمله‌ی ۱۲ درجه رخ می‌دهد. این کمیت برای فلپ با دالبوره‌های ۶۰ درجه‌ای برابر $2/42$ است که در زاویه حمله‌ی ۱۴ درجه رخ می‌دهد. همینطور برای فلپ با دالبوره‌های ۹۰ درجه‌ای و ۱۲۰ درجه‌ای، بیشینه ضریب برآ به ترتیب برابر $2/44$ و $2/30$ است که هر دو مورد در زاویه حمله‌ی ۱۴ درجه رخ می‌دهد.

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.

شرایط انجام آزمایش در این مرحله مطابق زیر است:

- فشار هوای ساکن برابر با $84/3$ کیلوپاسکال
- دمای هوا برابر با ۲۵ درجه سانتی‌گراد
- سرعت جریان هوا درون تونل باد برابر با $22/36$ متر بر ثانیه برای عدد رینولدز $2/9 \times 10^5$ و $3/5$ و $18/19$ متر بر ثانیه برای رینولدز $2/9 \times 10^5$
- میزان اغتشاش جریان در حدود $0/5\%$

برای بررسی اثر کمی فلپ مدل ریزو از جنس چوب با طول کورد ۱۵ سانتی‌متر و عرض $31/1$ سانتی‌متر استفاده شد. همچنین از چهار مدل فلپ (ساده، دالبوردار ۶۰ درجه، دالبوردار ۹۰ درجه و دالبوردار ۱۲۰ درجه) استفاده شد و این فلپ‌ها به گونه‌ای ساخته شدند که مساحت سطح تصویر همه‌ی آن‌ها برابر $1354/5$ میلی‌متر مربع باشد. در شکل ۴ مدل آزمایش به همراه نمونه فلپ با دالبور ۶۰ درجه نشان داده شده است.



شکل ۴- مدل آزمایش به همراه فلپ با دالبور ۶۰ درجه

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 مینا، تونل باد روشن می‌شود. اختلاف نیروها در دو حالت، نیروی اصلی را نشان می‌دهد. سیستم ثبت نیرویی به‌صورت بر خط و بر حسب 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 از این نمودار متوسط‌گیری شد و نیروی متوسط به‌عنوان نیروی میانگین ثبت شد. همچنین تکرار پذیری آزمایش مربوط به اندازه‌گیری نیروهای آیرودینامیکی نیز مورد بررسی قرار گرفت. در کار حاضر اندازه‌گیری نیرو در هر نقطه مورد نظر، ۳ مرتبه تکرار گردید و نتایج پس از اطمینان از عدم تغییر نهایی شد.

۳- تحلیل و گزارش

در ادامه نتایج تغییرات ضریب برآ و ضریب پسا ایرفویل ریزو بر حسب زاویه حمله و همچنین و نسبت ضریب برآ به ضریب پسا ایرفویل ریزو در حالت‌های بدون فلپ و فلپ دار و در اعداد رینولدز $2/9 \times 10^5$ و $3/5$ و $2/9 \times 10^5$ آمده است.

بیشینه ضریب لیفت در این حالت حدود ۱/۸ است و در نقطه‌ی استال ضریب درگ برابر ۰/۳۶ است.

در عدد رینولدز $3/5 \times 10^5$ استفاده از فلپ باعث افزایش ضریب برآ در تمام زوایای حمله شده‌است ولی زاویه‌ی واماندگی کاهش یافته‌است. در حالت ایرفویل بدون فلپ، زاویه واماندگی در حدود ۲۲ درجه است در حالی که در حالت ایرفویل به همراه فلپ (برای تمامی حالات فلپ) زاویه‌ی واماندگی در حدود ۱۸ درجه است. در حالت فلپ ساده بیشینه ضریب برآ ۲/۲۳ است که در زاویه حمله‌ی ۱۳ درجه رخ می‌دهد. این کمیت برای فلپ با دالبورهای ۶۰ درجه‌ای برابر ۲/۳ است که در زاویه حمله‌ی ۱۳ درجه رخ می‌دهد. همینطور برای فلپ با دالبورهای ۹۰ درجه‌ای و ۱۲۰ درجه‌ای، بیشینه ضریب برآ به ترتیب برابر ۲/۳۹ و ۲/۲۵ است که هر دو مورد در زاویه حمله‌ی ۱۴ درجه رخ می‌دهد.

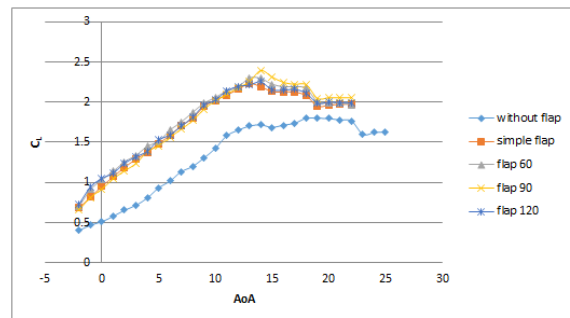
در عدد رینولدز $3/5 \times 10^5$ استفاده از فلپ در تمامی زوایای حمله باعث افزایش ضریب پسا نیز شده‌است. در زاویه واماندگی ۲۲ درجه برای ایرفویل ریزو بدون فلپ، ضریب پسا برابر ۰/۳۶ است که این ضریب برای ایرفویل فلپ‌دار در زاویه واماندگی ۱۸ درجه برابر ۰/۴۳ و ۰/۴۲ و ۰/۴۰ و ۰/۴۴ به ترتیب برای فلپ‌های ساده، دالبوردار ۶۰ درجه‌ای، دالبوردار ۹۰ درجه‌ای و دالبوردار ۱۲۰ درجه‌ای می‌باشد که می‌توان استنباط کرد که فلپ با دالبورهای ۹۰ درجه‌ای کمترین ضریب پسا و در عین حال بیشترین ضریب برآ را در زاویه واماندگی ایرفویل دارد که این مورد در شکل ۸ به وضوح نمایان است. همچنین به ازای یک ضریب پسا، فلپ با دالبورهای ۹۰ درجه‌ای بیشترین ضریب برآ را دارد. پس از آن به ترتیب فلپ با دالبورهای ۶۰ درجه‌ای و ۱۲۰ درجه‌ای در رتبه دوم و سوم قرار دارد. و در انتها فلپ ساده در رده‌ی چهارم قرار دارد.

۴- نتیجه‌گیری

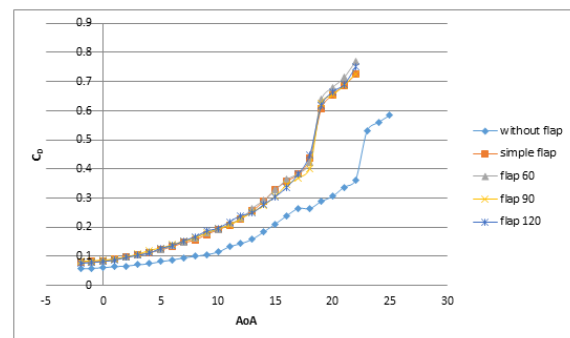
بهبود عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل از مسایلی است که از دیرباز به آن توجه شده است. در این پژوهش مدل آزمایشگاهی هندسه ایرفویل ریزو به همراه بستر آزمون طراحی و ساخته شد و پس از نصب مدل درون تونل باد، اثر فلپ برای افزایش نیروی برآ، به صورت کمی بررسی شد. در بخش آزمایش‌های کمی، با استفاده از نصب لودسل و روش اندازه‌گیری نیرو از یک طرف، ضرایب برآ و پسای ایرفویل ریزو ساده و به همراه ریزو با فلپ‌هایی به مساحت تصویر $1354/5$ میلی‌متر مربع در اعداد رینولدز $2/9 \times 10^5$ و $3/5 \times 10^5$ در زوایای حمله ۲- تا ۲۲ درجه اندازه‌گیری شد که نتایج ذیل بدست آمد:

- ۱- در حالت ایرفویل به همراه فلپ ضرایب برآ و پسا در همه حالات افزایش یافت.
- ۲- نسبت ضریب برآ به ضریب پسا به ازای یک مقدار از ضریب پسا در حالت فلپ‌دار افزایش یافت.
- ۳- استفاده از فلپ در عدد رینولدز $3/5 \times 10^5$ در تمام زوایای حمله موجب کاهش زاویه‌ی واماندگی شده است.
- ۴- استفاده از فلپ در عدد رینولدز $2/9 \times 10^5$ در تمامی حالات به جز حالت فلپ دالبوردار با زاویه‌ی ۹۰ درجه، زاویه واماندگی در حدود ۱۷ درجه است در حالی که در حالت ایرفویل به همراه فلپ دالبوردار ۹۰ درجه‌ای زاویه‌ی واماندگی حدود ۱۸ درجه است.

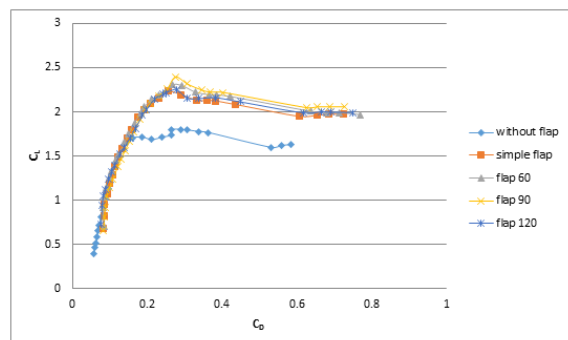
در عدد رینولدز $2/9 \times 10^5$ استفاده از فلپ در تمامی زوایای حمله باعث افزایش ضریب پسا نیز شده‌است. در زاویه واماندگی ۱۷ درجه برای ایرفویل ریزو بدون فلپ، ضریب پسا برابر ۰/۲۱ است که این ضریب برای ایرفویل فلپ‌دار در زاویه واماندگی ۱۷ درجه برابر ۰/۴۶ و ۰/۴۱ و ۰/۳۸ به ترتیب برای فلپ‌های ساده، دالبوردار ۶۰ درجه‌ای و دالبوردار ۱۲۰ درجه‌ای می‌باشد. برای حالت فلپ‌دار با دالبور ۹۰ درجه‌ای ضریب پسا در زاویه واماندگی ۱۸ درجه برابر ۰/۴۰ است که می‌توان استنباط کرد که فلپ با دالبورهای ۹۰ درجه‌ای کمترین ضریب پسا و در عین حال بیشترین ضریب برآ را در زاویه واماندگی ایرفویل دارد که این مورد در شکل ۷ به وضوح نمایان است.



شکل ۸- نمودار ضریب برآ بر حسب زاویه حمله در رینولدز $3/5 \times 10^5$



شکل ۹- نمودار ضریب پسا بر حسب زاویه حمله در رینولدز $3/5 \times 10^5$



شکل ۱۰- نمودار ضریب برآ بر حسب ضریب پسا در رینولدز $3/5 \times 10^5$

همانطور که در شکل ۸ نمایان است، برای حالت ایرفویل بدون فلپ در عدد رینولدز $3/5 \times 10^5$ استال در زاویه ۲۲ درجه رخ داده‌است. همچنین

Pasadena, California, 1987.

- [5] Prince, Simon A., Vahik Khodagolian, Chrisminder Singh, and T. Kokkalis. "Aerodynamic Stall Suppression on Aerofoil Sections Using Passive Air-Jet Vortex Generators." *AIAA journal* 47, no. 9 (2009): 2232-2242.
- [6] 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).

۵- 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] Kumar, A., and Prasad, S., "Examining wind quality and wind power prospects on Fiji Islands", *Renewable energy*, vol. 35, no. 2, pp. 536-540, 2010.
- [3] De Gregorio, Fabrizio, and Giuseppe Fraioli. "Flow control on a high thickness airfoil by a trapped vortex cavity." In *14th symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal. 2008.
- [4] S. Lai, J. C., and M. F. Platzer. "Jet characteristics of a plunging airfoil." *AIAA journal* 37, no. 12 (1999): 1529-1537. [6] P. Jayakumar, "Modeling and identification in structural dynamics," Ph.D. dissertation, California Institute of Technology,