

مطالعه تجربی اثرات تخلخل بر عملکرد آیرودینامیکی و آیروآکوستیکی یک ایرفویل با انحنای بسیار زیاد

نسترن رودکی^۱، مصطفی کاظمی^۲، محمد مصلی نژاد^۳، محمود مانی^{۴*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، nastaran_rdk@aut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، Kazemi.Mostafa@aut.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، M.mosallanejad@aut.ac.ir

۴- استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، Mani@aut.ac.ir (نویسنده مسئول)

چکیده

هدف از انجام این پژوهش بررسی اثرات قراردادن تخلخل بر عملکرد آیرودینامیکی، فیزیک جریان و نویزهای آیرودینامیکی حول یک ایرفویل با انحنای بسیار زیاد بوده است. نوآوری این تحقیق، استفاده از درصد تخلخل‌های مختلف در لبه فرار در سرعت‌ها و زوایای حمله‌ی مختلف بر روی ایرفویل جغد بوده است. نتایج آزمایش‌های تجربی تونل باد در سرعت‌های ۸، ۱۱، ۱۵ و ۱۸ متر بر ثانیه و زوایای حمله ۱۰- تا ۲۰ درجه نشان می‌دهد که به‌کارگیری تخلخل منجر به کاهش ضریب برآ شده به نحوی که افزایش تخلخل افت ضریب برآ را بیشتر می‌کند. از طرفی تاثیر آن بر ضریب پسا به شکل یکسانی نبوده اما در برخی از زوایای حمله و سرعت‌ها به ویژه در تخلخل ۲۰ درصد کاهش ضریب پسا مشاهده شده است. در سرعت ۸ متر بر ثانیه میزان کاهش ضریب برآ ۱۰.۷٪- و ضریب پسا ۷۳٪- است. همچنین مشاهده شد که زاویه واماندگی ایرفویل با افزودن تخلخل به مقدار ۲ درجه افزایش یافته است. از طرفی اندازه‌گیری نویزهای آیرودینامیکی به کمک سنسورهای فشار و هات‌وایر نشان از کاهش نویزها با استفاده از تخلخل در دنباله ایرفویل به مقدار بیش از ۱۰ درصد داشته است.

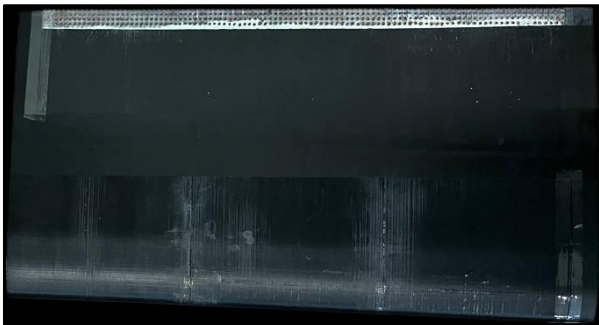
واژه های کلیدی: آیرودینامیک تجربی، تست تونل باد، کنترل جریان، تخلخل ایرفویل

۱) مقدمه

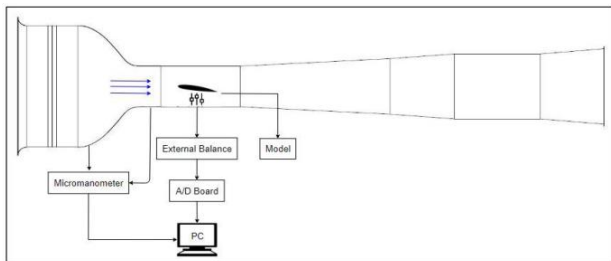
کاهش اغتشاشات پروازی و افزایش بازده سوخت از مهم‌ترین اهداف علم آیرودینامیک در راستای بهبود عملکرد هواپیما است. کاهش اغتشاشات صوتی پرواز به‌ویژه در فاز برخاست و نشست از عواملی است که می‌تواند در جایابی برای فرودگاه‌های جدید و نزدیک به مراکز شهرها بسیار موثر باشد. همچنین باتوجه به افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش زمین، افزایش بازده در مصرف سوخت هواپیما نیز از جمله نکات موردتوجه در این صنعت است. از جمله راه‌های بهبود عملکرد آیرودینامیکی هواپیماها استفاده از سطوح متخلخل است. رویکردهای متفاوتی برای کاهش تولید نویز لبه‌های فرار اجزا برآ، افزا، بال فن‌ها، پروانه‌ها یا توربین‌های بادی وجود دارد. چنین رویکردهایی به‌عنوان مثال همچون دندان لبه‌های فرار، لبه‌های فرار شکاف‌دار، لبه‌های برس مانند و لبه‌های فرار ساخته شده از ورق‌های مشبک فلزی است. روش دیگر برای کاهش نویز لبه‌های فرار استفاده از مواد متخلخل است. در این راستا الهام از بال پرندگان با پرواز آرام جغد، به منظور

کنترل نویز آیرودینامیکی از جمله نکاتی است که به محققین در طراحی بال‌های جدید و بهینه کردن نیروهای آیرودینامیکی بال‌ها کمک کرده است. کیسیل و همکاران [۱]، در پژوهشی مربوط به صفحات مسطح با لبه‌ی فرار متخلخل، بیان کردند که در فرکانس‌های پایین، می‌توان ناحیه لبه فرار را فشرده در نظر گرفت و همچنین افزایش اندازه منافذ یک ماده نفوذپذیر متخلخل منجر به کاهش نویز می‌شود، با این حال، این کاهش نویز به قیمت افزایش نویز اضافی در محدوده فرکانس متوسط تا بالا می‌شود. علاوه بر این، در محدوده‌ی فرکانس متوسط تا بالا، نویسندگان، لبه فرار نفوذپذیر متخلخل را به‌عنوان منبع مهمی که می‌تواند در تولید نویز تداخل ایجاد کند و در نتیجه هدایت صوتی را تغییر دهند شناسایی کردند. بوهن [۲] تولید نویز را در صفحه‌ای که به امتداد لبه‌های فرار به مواد متخلخل مجهز شده بود را بررسی کرد. او حداکثر کاهش نویز را در فرکانس متناسب با نسبت سرعت به میزان جریان گذر کرده از روی مواد متخلخل بدست آورد. شولز و همکاران [۳] توزیع بهینه منافذ و نفوذپذیری را برای کاهش نویز لبه‌های فرار به‌صورت عددی بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که محیط بهینه باید دارای گرادیان نفوذپذیری در جهت جریان و دارای شبکه منافذ ناهمسان‌گرد باشد. لیلکیان و همکاران [۴] یک روش کنترل جریان فعال را که در آن انرژی اغتشاشات با دمیدن کنترل شده جریان در لایه مرزی از دیوار دور می‌شوند را بررسی کردند. یان و همکاران [۵] از طریق استفاده از مواد متخلخل در یک جریان یکنواخت، اندازه‌گیری کاهش نویز را در لبه‌ی فرار بررسی کردند. آن‌ها سریشین در لبه فرار یا استفاده از مواد متخلخل را به‌عنوان دو روش برای کاهش نویز لبه‌های فرار بیان کردند. همچنین آن‌ها صدای تولید شده در لبه فرار ایرفویل‌ها را به عنوان یکی از منابع اصلی تولید نویز در نظر گرفتند. رول و همکاران [۶] به صورت تجربی در مورد اثر رفتار متخلخل در لبه‌ی فلپ یک بال هواپیما تحقیق کردند. آنها دریافتند که لبه جانبی فلپ‌ها سهم زیاد در تولید سر و صدای کل بدنه هواپیما دارند، با بهبود این فلپ‌ها و استفاده از مواد متخلخل، کاهش نویز در طیف وسیعی از فرکانس‌ها مشاهده شد که عمدتاً به دلیل نشتی جریان در فرکانس‌های بالاتر است. همچنین آنها دریافتند که اثر مثبت امپدانس سطح محدود یک استوانه در معرض جریان، که از طریق سوراخ شدن سطح سیلندر به دست می‌آید، بر کاهش نویز موثر است که این پژوهش به طور تجربی توسط یاهاتوگادا آکیشیدا مورد بررسی قرار گرفت [۷]. تینتی و همکاران [۸، ۹] استفاده جزئی از مواد متخلخل را به عنوان یک روش ممکن برای دستیابی به کاهش سر و صدا ارائه دادند. گراهام [۱۰] با بررسی بال جغد به عنوان پرنده‌ای با پرواز آرام و بال متخلخل مشاهده کرد که حاشیه لبه‌های فرار و سطح فوقانی

با توجه به مطالعات گسترده پیشین و فیزیک جریان شناخته شده حول ایرفویل جغد، این ایرفویل به عنوان مدل آزمایش، با طول وتر ۲۵۰ میلی‌متر انتخاب و ساخته شده است (شکل ۱). کلیه آزمایش‌ها در تونل باد دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام گرفته است. این تونل باد دارای مقطع آزمون مستطیلی با ابعاد ۱.۸×۱ مترمکعب و بیشینه سرعت ۶۰ متر بر ثانیه می‌باشد. برای کنترل سرعت از یک میکرومانومتر ساخت شرکت کیمو و نمونه MP120 استفاده شده است که توانایی اندازه‌گیری سرعت با دقت ۰.۱ متر بر ثانیه را داراست. برای اندازه‌گیری سرعت و شدت اغتشاشات در فرکانس بالا از دستگاه سیم داغ با تنگستن ۵ میکرونی و برای ذخیره و خواندن مقدار سیم داغ از دستگاه CTA استفاده شده است. نیروها به کمک بالانس خارجی سه محوره ساخت شرکت پلینت انگلستان اندازه‌گیری شده که توانایی اندازه‌گیری نیروهای پسا، برآ و گشتاور پیچشی را داراست. بیشینه اندازه‌گیری این لودسل‌ها ۵ کیلوگرم و دقت آن ۵ گرم می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری توزیع فشار حول ایرفویل، از سنسورهای فشار تفاضلی شرکت هانیول و مدل HSCDD005MDNN5 با بیشینه رنج ۱۲۵۰ پاسکال و دقت اندازه‌گیری ۰.۱% FS با معادل ۲.۵ پاسکال بهره گرفته شده است. با قراردادن دقت‌های هر سنسور در رابطه محاسبه ضریب پسا و برآ، میزان خطای اندازه‌گیری ضریب پسا و برآ در بیشترین حالت ۰.۱۳۸± درصد می‌باشد. با تکرار آزمایش‌ها، مقدار ۰.۱% تفاوت در تکرارپذیری ضریب پسا و برآ دیده شده که چون مقدار آن از مقدار محاسبه شده برای خطا بیشتر است، مقدار تکرارپذیری به عنوان خطای آزمایش معرفی می‌شود و کلیه اعداد ضریب پسا و برآ مطرح شده در این پژوهش دارای مقدار خطای ۰.۱± درصد هستند و تغییرات موجود در این محدوده قابل قبول نمی‌باشد. شماتیک تونل باد و ابزارآلات اندازه‌گیری در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۱- مدل دارای تخلخل ۱۰٪ جغد



شکل ۲- شماتیک تونل باد و تجهیزات آزمایش

بال‌ها و پاهای، نرم‌تر و کشسان‌تر از پرندگان با پرواز غیرآرام دیگر است. که این پرواز آرام را ناشی از اثرات تخلخل بر بال این پرنده دانست. با توجه به پژوهش‌های پیشین، بررسی و مطالعه بر روی سطوح متخلخل، کنترل جریان و بررسی پارامترهای تأثیرگذار در این زمینه می‌تواند تأثیر گذار باشد. همچنین پتانسیل کاهش نویز و کارایی مواد متخلخل به دو عامل زیر وابسته است [۱۱]:

(۱) مقاومت جریان که در معادله‌ی ۱ تعریف شده است که در فرکانس‌های پایین نویز تأثیرگذار است. در این معادله ΔP اختلاف فشار جریان، v سرعت جریان و d قطر تخلخل است.

$$r = \frac{\Delta P}{v \times d} \quad (1)$$

(۲) وسعت و غلظت تخلخل که در فرکانس‌های بالای نویز تأثیرگذار است. [۱۲].

همچنین این مطالعات نشان داد که با افزایش مقاومت جریان، مقادیر نیروی برآ کاهش و پسا افزایش می‌یابد. در نتیجه تخلخل، با پایین‌تر بودن مقاومت جریان، عملکرد بهتر آیرودینامیکی ارائه می‌دهد.

فرکانسی که در آن ریزش گردابه برای یک استوانه رخ می‌دهد با معادله ۲ مرتبط است که در آن St عدد اشتروهل، f فرکانس ریزش گردابه‌ای، D قطر استوانه و v سرعت جریان است که عدد اشتروهل و زاویه‌ی حمله در کاهش فرکانس تأثیر دارد. [۱۳]

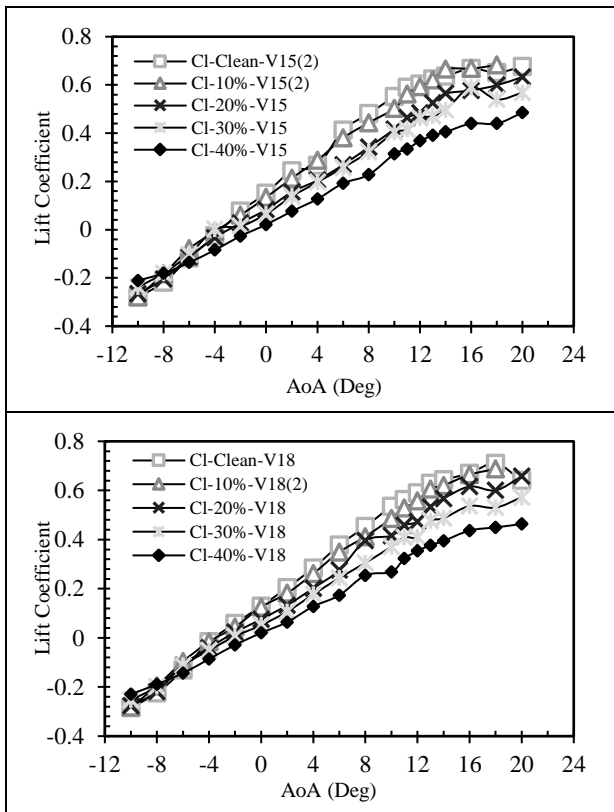
$$St = \frac{fD}{v} \quad (2)$$

در واقع وجود مواد متخلخل بر روی ایرفویل باعث به تأخیر انداختن ریزش گردابه‌ها، کاهش انسجام لایه‌ی مرزی، سرعت و فشار می‌شود. [۱۴] هدف از انجام این پژوهش بررسی اثرات قرار دادن تخلخل بر روی یک نوع ایرفویل با انحنای بسیار زیاد بوده است. در همین راستا ایرفویل جغد به عنوان نمونه مطالعه انتخاب شده است. بنابراین نوآوری انجام این تحقیق، استفاده از تخلخل‌های مختلف بر روی ایرفویل جغد بوده است. در این مطالعه ایرفویل جغد به همراه ۴ ایرفویل متخلخل در ۴ درصد تخلخل مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ نسبت به طول وتر ایرفویل از لبه فرار، مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا در چهار سرعت ۸، ۱۱، ۱۵ و ۱۸ متر بر ثانیه، ضرایب برآ، پسا، زاویه‌ی واماندگی و نسبت ضریب برآ به پسا در زوایای حمله‌ی ۱۰- تا ۲۰ درجه با گام ۱ درجه استخراج شده است. در فاز بعدی آزمایش به منظور بررسی نویزهای آیرودینامیکی، ایرفویل‌های مجهز به تخلخل در لبه فرار نیز بررسی شده است. پس از بررسی تخلخل بر عملکرد ایرفویل، در فاز بعدی تأثیر طول و ضخامت تخلخل بر عملکرد آیرودینامیکی آنها نیز مورد تحلیل قرار گرفته است و تأثیر تخلخل و طول تخلخل ارائه شده است.

۲) متدولوژی و تجهیزات آزمایش

به منظور بررسی اثرات تخلخل یک ایرفویل با انحنای بسیار زیاد از منظر ضریب برآ، ضریب پسا، بازده آیرودینامیکی و شدت اغتشاشات، ایرفویل جغد پایه و ایرفویل‌های مجهز به تخلخل ۱۰ تا ۴۰ درصد در چهار سرعت مختلف در تونل باد با زوایای مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است.

در آزمایش‌های مربوط به تخلخل ایرفویل، پارامترهای سرعت جریان و زاویه اولیه حمله متغیر بوده‌اند. در هر کدام از سرعت‌های ۸، ۱۰، ۱۵ و ۱۸ متر بر ثانیه و هر کدام در زوایای ۱۰- تا ۲۰ درجه با گام ۱ درجه مورد مطالعه قرار گرفته است.

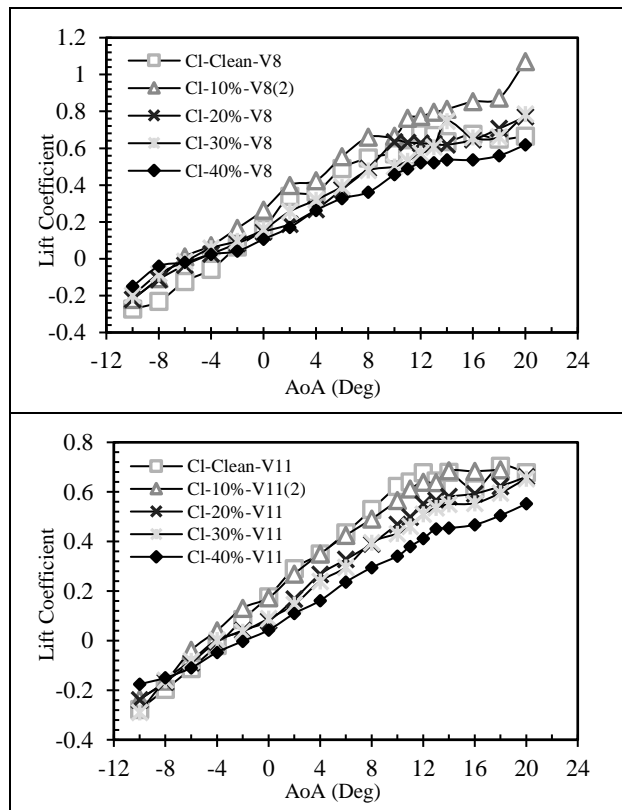


شکل ۳- نمودارهای ضریب لیفت بر حسب زوایای حمله در سرعت‌های مختلف

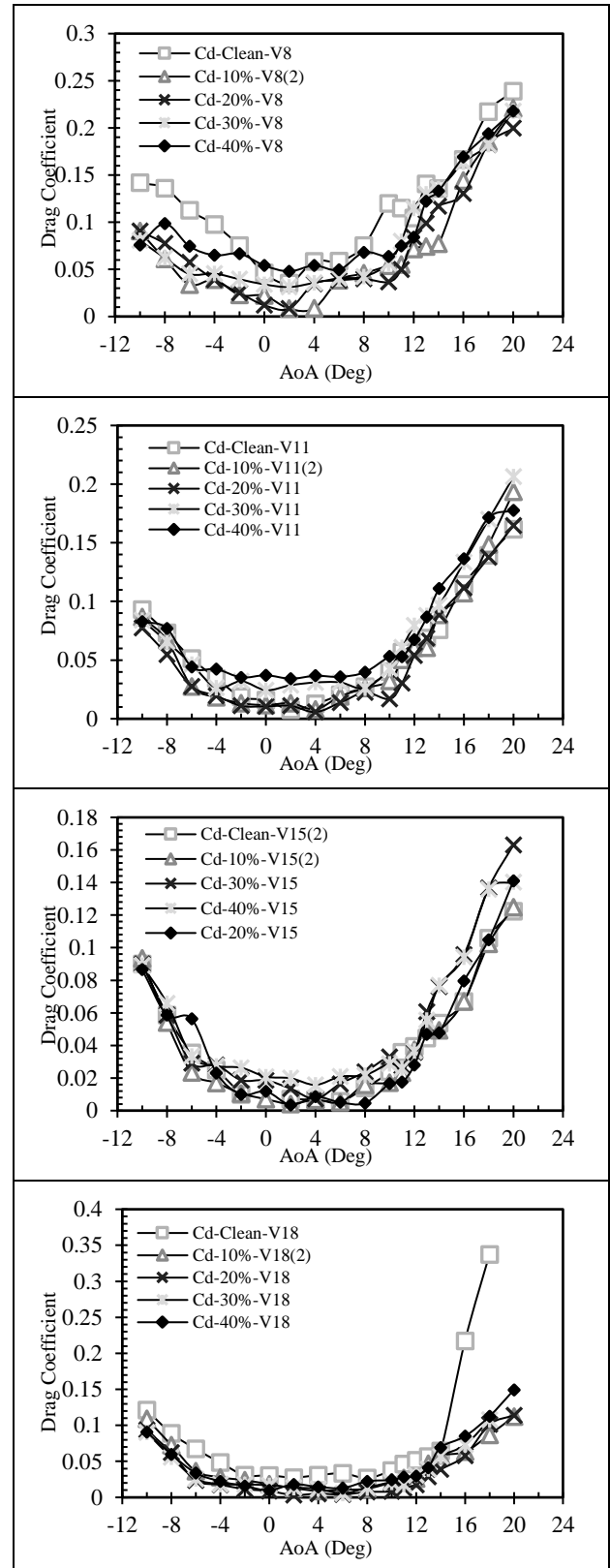
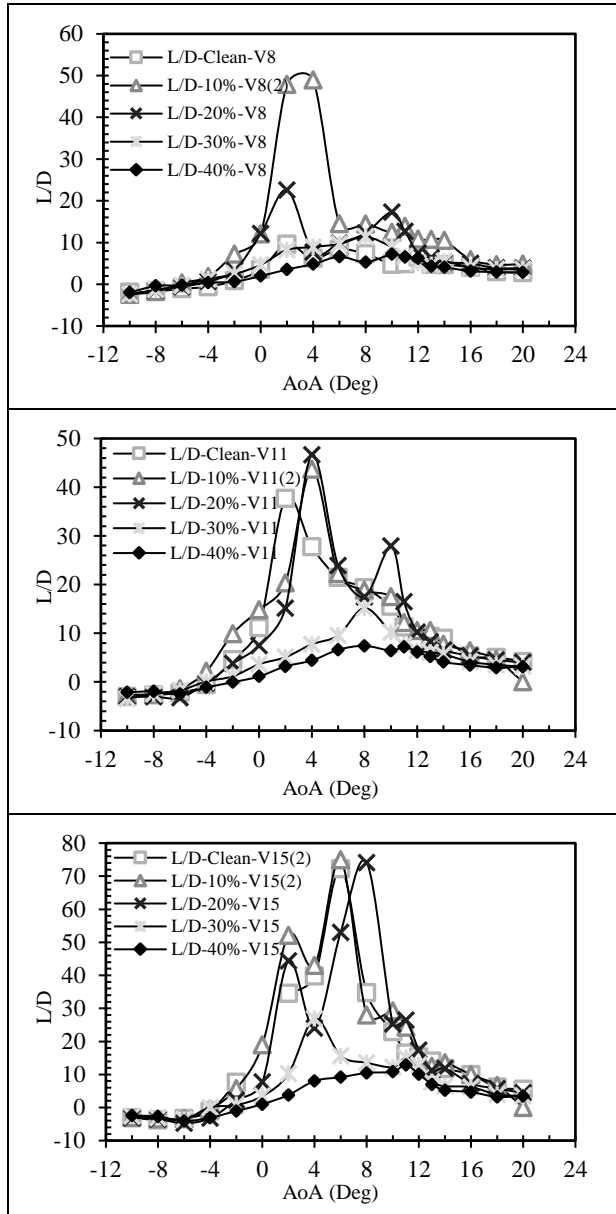
شکل تغییرات ضرایب پسا مربوط به ایرفویل متخلخل با زوایای حمله و سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در نگاه کلی به نمودارها می‌توان کاهش ضریب پسا در تمامی مدل‌های مجهز به تخلخل را مشاهده نمود به گونه‌ای که بیشینه افزایش C_{dmax} مربوط به ایرفویل ۱۰٪ تخلخل است اما با این حال با حضور تخلخل، این نمودارها روند متفاوت و متغیری را از خود نشان می‌دهند، مواد متخلخل در لبه‌ی فرار باعث کاهش و تضعیف گردابه‌های ریخته شده در لبه‌ی فرار شده و این موضوع موجب تغییر جریان در پایین دست لبه‌ی فرار می‌شود. البته قابل ذکر است که عملکرد تخلخل بر روی ایرفویل تابع متغیرهای زیادی از جمله شکل، ابعاد و هندسه‌ی تخلخل بر روی ایرفویل است و برای بررسی کامل‌تری از تاثیر این مواد بر جریان پایین دست و تحلیل بیشتری از تغییرات نیروی پسا استفاده از ریک فشاری بدین منظور در پشت لبه‌ی فرار ایرفویل ضروری است.

۳ نتایج

در این بخش ابتدا نتایج حاصل از آزمایش‌های نیرویی به شکل نمودارهای ضریب برآ و پسا در سرعت‌ها و زوایای حمله مختلف ارائه شده است. شکل تغییرات ضرایب برآ مربوط به ایرفویل متخلخل با زوایای حمله و سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در نگاه کلی به نمودارها می‌توان کاهش ضریب برآ در تمامی مدل‌های مجهز به تخلخل را مشاهده نمود به گونه‌ای که بیشینه کاهش C_{lmax} مربوط به ایرفویل ۴۰٪ تخلخل است که این موضوع ناشی از هندسه و عملکرد تخلخل می‌باشد. در واقع نیروی برآ از اختلاف فشار میان سطح پر فشار (پایین) و کم فشار (بالا) به دست می‌آید، عملکرد تخلخل در لبه‌ی فرار باعث می‌شود که جریان هوا از سطح پر فشار به سمت کم فشار در ناحیه‌ی لبه‌ی فرار مکیده شود و موجب کاهش اختلاف فشار میان دو سطح ایرفویل شود، در نتیجه نیروی برآ در حضور و عملکرد تخلخل کاهش یابد و هر چه درصد سطح متخلخل بر روی ایرفویل زیادتر شود میزان افت نیروی برآ نیز افزایش می‌یابد این نتیجه با مطالعات پیشین صورت گرفته در این زمینه نیز مطابقت دارد. نکته قابل توجه این نمودارها، تاثیر تخلخل بر افزایش زاویه واماندگی است که علت آن، قابل تعمیم به تمامی روش‌های کنترل جریان در لبه فرار است. در واقع در حضور تخلخل، مکیده شدن جریان پر فشار از سطح زیرین به سمت بالایی ایرفویل موجب افزایش سطح انرژی در لایه‌ی مرزی سطح بالایی ایرفویل شده و این موضوع باعث به تاخیر افتادن جدایش جریان از سطح و واماندگی استاتیکی در ایرفویل می‌شود. همچنین با افزایش سرعت، تاثیر تخلخل در افزایش زاویه‌ی واماندگی کاهش یافته است.

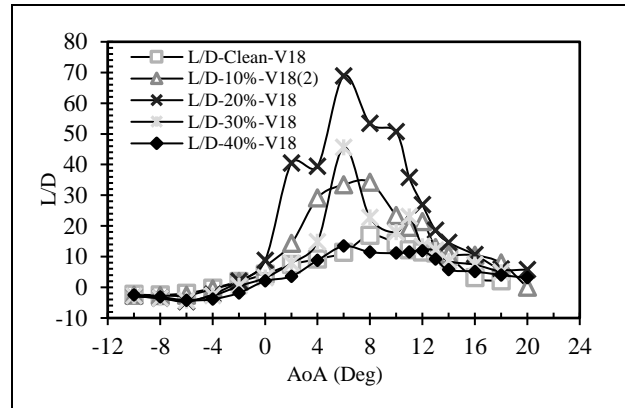


فرار بهترین بهبود عملکرد آیرودینامیکی را در سرعت‌های ۱۱، ۱۵ و ۱۸ متر بر ثانیه داشته است اما در سرعت ۸ متر بر ثانیه ایرفویل با ۱۰٪ تخلخل در لبه‌ی فرار افزایش چشم‌گیری نسبت به نتایج دیگر ایرفویل‌ها داشته است. این موضوع می‌تواند ناشی از اشتباه در انجام آزمایش تجربی باشد و در صورت در نظر نگرفتن این نتایج در سرعت ۸ متر بر ثانیه نیز ایرفویل ۲۰٪ بیشترین تاثیر مثبت را داشته است. (شکل ۵)



شکل ۴- نمودارهای ضریب درگ بر حسب زوایای حمله در سرعت‌های مختلف

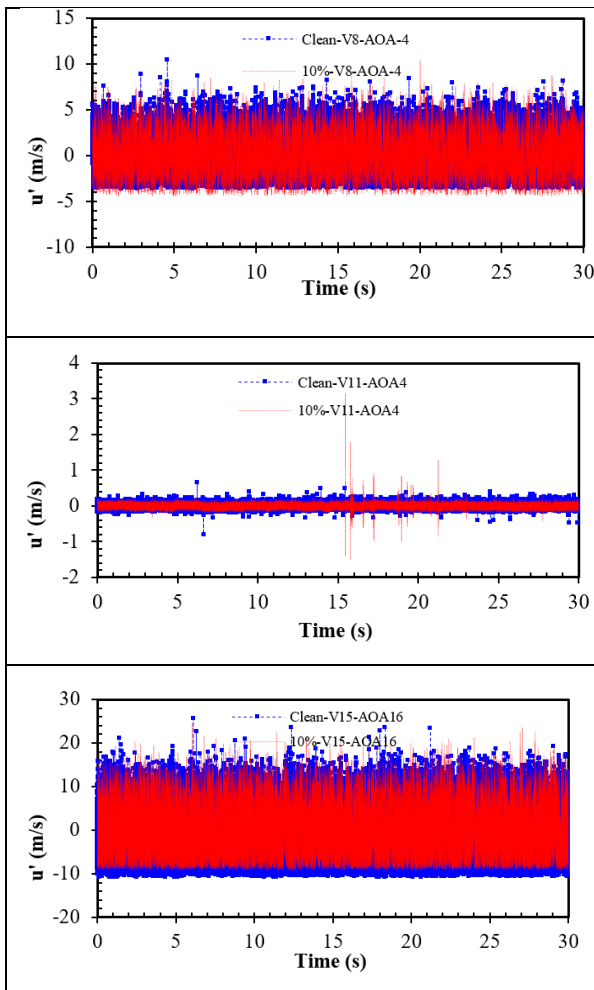
با بررسی نمودار نیروی برآ به پسا که نشان دهنده‌ی عملکرد آیرودینامیک ایرفویل‌ها است نتیجه‌گیری می‌شود که ایرفویل دارای ۲۰٪ تخلخل از لبه‌ی



شکل ۵- نمودارهای لیفت بر درگ بر حسب زوایای حمله در سرعت‌های مختلف

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش‌های سرعت اغتشاشی در سرعت‌ها و زوایای حمله مختلف ارائه شده است.

با بررسی شکل ۶ که بیانگر مقایسه‌ی میان میزان اغتشاشات سرعت، در ایرفویل‌های مرجع با ایرفویل‌هایی با میزان تخلخل متفاوتی است، مشخص می‌گردد که حضور تخلخل بر روی ایرفویل با هر میزان، موجب درصدی کاهش در میزان اغتشاشات سرعت در پایین دست جریان و در تمامی موارد آزمایشی شده است. این موضوع بیانگر تاثیر مثبت حضور مواد متخلخل در کاهش نویزها و اغتشاشات آیرودینامیکی بوده است. به عنوان مثال، تغییرات سرعت اغتشاشی مربوط به زاویه حمله ۴-، ۴ و ۱۶ درجه مربوط به تخلخل ۱۰ درصد در مقایسه با ایرفویل ساده در سرعت‌های ۸، ۱۱ و ۱۵ متر بر ثانیه ارائه شده است. همانطور که از شکل مشخص است در زاویه حمله ۴- در طول مدت زمان آزمایش (۳۰ ثانیه) رفتار هر دو سیگنال سرعت اغتشاشی یکسان بوده اما سطح مربوط به ایرفویل با تخلخل ۱۰ درصد کمتر از حالت ساده است که نشان از کاهش نویزهای آیرودینامیکی در میدان سرعت به دلیل وجود تخلخل دارد. این موضوع در زوایای حمله بعدی نیز مشاهده می‌شود. تنها تفاوت در نمودارهای مربوط به زوایای حمله مختلف، مقدار اغتشاشات سرعت در میدان اطراف ایرفویل‌ها می‌باشد که به عنوان مثال در زاویه حمله ۴-، مقدار بیشینه ۴ متر بر ثانیه بوده در حالی که در زاویه حمله ۰ درجه مقدار بیشینه کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه بوده است. مقدار بیشینه سرعت اغتشاشی در زاویه حمله ۱۶ درجه که سرعت جریان آزاد آن ۱۸ متر بر ثانیه است، ۱۰ متر بر ثانیه بوده که نشان از مغشوش بودن کامل جریان دارد. کلیه نمودارهای مربوط به اغتشاشات سرعت کاملاً نشان می‌دهند که در شرایط مختلف زوایای حمله (۷ زاویه حمله) و سرعت‌های جریان آزاد (۳ سرعت مختلف) سرعت اغتشاشی تخلخل‌های مختلف از بال ساده کمتر بوده است.



شکل ۶- مقایسه‌ی سرعت اغتشاشی ایرفویل ساده با ایرفویل ۱۰٪ متخلخل در سرعت‌های مختلف

۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این پژوهش بر مطالعه تجربی اثرات تخلخل بر عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل متمرکز بوده است. علاوه بر تحقیق پیرامون شناسایی تاثیر درصد تخلخل و چگونگی عملکرد آنها بر روی نیروهای آیرودینامیکی، به مطالعه پیرامون تاثیر مواد متخلخل آیروآکوستیکی پرداخته شده است. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثرات قرار دادن تخلخل بر روی یک نوع ایرفویل با انحنای بسیار زیاد بوده است. نوآوری انجام این تحقیق، استفاده از تخلخل‌های مختلف بر روی ایرفویل جغد بوده است. در این مطالعه ایرفویل

- AIAA/CEAS aeroacoustics conference, 1997, p. 1646.
- [۷] K.-S. Rossignol, A. Suryadi, M. Herr, J. Schmidt, and J. Tychsen, "Experimental investigation of porous materials for trailing-edge noise reduction," *International Journal of Aeroacoustics*, vol. 19, no. 6-8, pp. 365-384, 2020.
- [۸] A. Tinetti, J. Kelly, S. Bauer, and R. Thomas, "On the use of surface porosity to reduce unsteady lift," in *15th AIAA computational fluid dynamics conference*, 2001, p. 2921.
- [۹] A. Tinetti, J. Kelly, R. Thomas, and S. Bauer, "Reduction of wake-stator interaction noise using passive porosity," in *40th AIAA aerospace sciences meeting & exhibit*, 2002, p. 1036.
- [۱۰] R. Graham, "The silent flight of owls," *The Aeronautical Journal*, vol. 38, no. 286, pp. 837-843, 1934.
- [۱۱] T. F. Geyer and E. Sarradj, "Self noise reduction and aerodynamics of airfoils with porous trailing edges," in *Acoustics*, 2019, vol. 1, no. 2: MDPI, pp. 393-409.
- [۱۲] P. J. Baddoo, R. Hajian, and J. W. Jaworski, "Unsteady aerodynamics of porous aerofoils," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 913, 2021.
- [۱۳] C. Sumesh and T. Jothi, "Aerodynamic noise from an asymmetric airfoil with perforated extension plates at the trailing edge," *International Journal of Aeroacoustics*, vol. 20, no. 1-2, pp. 88-108, 2021.
- [۱۴] S. A. S. Ali, M. Azarpeyvand, and C. R. I. Da Silva, "Trailing-edge flow and noise control using porous treatments," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 850, pp. 83-119, 2018.

جغد به همراه ۴ ایرفویل متخلخل در ۴ درصد تخلخل مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ نسبت به طول وتر ایرفویل از لبه فرار، مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا در چهار سرعت ۸، ۱۱، ۱۵ و ۱۸ متر بر ثانیه، ضرایب برآ، پسا، زاویه‌ی واماندگی و نسبت ضریب برآ به پسا در زوایای حمله‌ی ۱۰- تا ۲۰ درجه با گام ۱ درجه استخراج شده است. در فاز بعدی آزمایش به منظور بررسی نویزهای آیرودینامیکی آن ایرفویل‌های مجهز به تخلخل در لبه فرار نیز بررسی شده است. پس از بررسی تخلخل بر عملکرد ایرفویل در فاز بعدی تاثیر طول و ضخامت تخلخل بر عملکرد آیرودینامیکی آنها نیز مورد تحلیل قرار گرفته است و تاثیر تخلخل و طول تخلخل ارائه شده است. این آزمایش‌ها نشان داد که ایرفویل‌هایی با لبه‌ی فرار متخلخل موجب کاهش نیروی برآ در تمامی موارد شده است و با افزایش میزان دزد تخلخل میزان کاهش نیروی برآ، افزایش می‌یابد. ایرفویل‌ها با درصد‌های متفاوت لبه‌ی فرار متخلخل دارای اثرات متفاوتی بر ضریب نیروی پسا در زوایا و سرعت‌های متفاوت بودند به نحوی که در برخی از شرایط منتج به کاهش پسا شده بودند. همچنین درصد تخلخل‌های مختلف موجب تاثیرات متفاوتی بر عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل‌ها می‌شوند، عوامل تاثیرگذار در این زمینه شامل جنس تخلخل، شکل تخلخل، میزان تخلخل، ابعاد تخلخل و درصد پوشش تخلخل بر روی ایرفویل هستند که در این پژوهش تاثیر درصد پوشش تخلخل بر عملکرد آیرودینامیکی بررسی شده است. از طرفی درصد‌های مختلفی از تخلخل مشخص گردیده است که ایرفویل با پوشش ۲۰٪ تخلخل بیشترین تاثیر مثبت را بر عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل‌ها داشته است. با بررسی شدت اغتشاشی میان ایرفویل‌های متفاوت مشخص شد که حداقل میزان شدت اغتشاشی با توجه به میزان انحنای ایرفویل و عدم تقارن آن در ۸ درجه مشاهده شده است و میزان درصد تخلخل در زوایای گوناگون تاثیرات متفاوتی را بر شدت اغتشاشات داشته‌اند به گونه‌ای که در حداکثر زاویه‌ی حمله، تخلخل موجب کاهش شدت اغتشاشی شده است اما در دیگر زوایا همچون ۰ درجه موجب افزایش چشم‌گیر نسبت به ایرفویل ساده شده است.

۵) مراجع

- [۱] A. Kisil and L. J. Ayton, "Aerodynamic noise from rigid trailing edges with finite porous extensions," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 836, pp. 117-144, 2018.
- [۲] A. Bohn, "Edge noise attenuation by porous-edge extensions," in *14th aerospace sciences meeting*, 1976, p. 80.
- [۳] J. Schulze and J. Sesterhenn, "Optimal distribution of porous media to reduce trailing edge noise," *Computers & Fluids*, vol. 78, pp. 41-53, 2013.
- [۴] L. Leylekian, M. Lebrun, and P. Lempereur, "An overview of aircraft noise reduction technologies," *Aerospace Lab*, no. 6, pp. p. 1-15, 2014.
- [۵] Y. Bae and Y. J. Moon, "Effect of passive porous surface on the trailing-edge noise," *Physics of Fluids*, vol. 23, no. 12, p. 126101, 2011.
- [۶] J. Revell *et al.*, "Trailing-edge flap noise reduction by porous acoustic treatment," in *3rd*