

تأثیر فینلت‌های کاهش‌دهنده نوفه بر میدان جریان آشفته در محدوده لبه فرار صفحه تخت

عباس افشاری^{۱*}، علی‌اکبر دهقان^۲، احمدرضا ایوبی^۱، حیات‌الله ادوی^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، ایران

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳)

چکیده

مطالعه نوفه لبه‌فرار لایه مرزی آشفته، موضوعی بنیادی در طراحی و تولید وسایل پرنده با حداقل نوفه است. در طول دهه‌های گذشته، روش‌های غیرفعال مختلفی برای کاهش نوفه لبه‌فرار پیشنهاد شده و جدیدترین راهبرد، استفاده از فینلت‌های کاهش‌دهنده نوفه است. در مطالعه حاضر، به منظور بررسی نحوه تأثیر فینلت‌های کاهش‌دهنده نوفه بر میدان جریان آشفته در محدوده لبه فرار مدل، یک صفحه تخت مجهز به سنسورهای اندازه‌گیری فشار ناپایای سطح، طراحی و ساخته شده است. سپس با نصب مجموعه‌ای از فینلت‌ها با فواصل عرضی مختلف روی صفحه تخت، اثرات حضور آن‌ها روی میدان جریان در پایین‌دست فینلت‌ها به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که رفتار جریان در پایین‌دست فینلت‌ها، به شدت وابسته به فاصله عرضی بین فینلت‌هاست. در حالی که استفاده از فینلت‌های درشت، منجر به کاهش سرعت متوسط، شدت آشفتگی و محتویات انرژی ساختارهای آشفته فرکانس پایین در نقاط نزدیک به سطح مدل در پایین‌دست فینلت‌ها می‌گردد، رفتار جریان در پایین‌دست فینلت‌های ریز تا حدودی مشابه جریان در پایین‌دست پله روبه‌عقب است. برای فینلت‌های ریز، محتویات انرژی ساختارهای آشفته جریان در نواحی نزدیک به سطح در تمامی محدوده فرکانسی، کاهش قابل توجهی یافته است. نتایج همبستگی متقابل و تابع همدوسی بین نوسانات فشار سطح و میدان سرعت نیز نشان داد که در حالی که مهمترین مکانیزم مؤثر بر نوسانات فشار سطح برای فینلت‌های درشت، جریان کم مومنوم خروجی از بین فینلت‌هاست، برای فینلت‌های ریز، ساختارهای گردابه‌ای تشکیل شده بواسطه جدایش جریان سهم مؤثری بر نوسانات فشار سطح در پایین‌دست فینلت‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: نوفه، صفحه تخت، لایه مرزی آشفته، فینلت

Effect of Noise-Reducing Finlets on Turbulent Flow Field in the Flat Plate Trailing-Edge Region

Abbas Afshari, Ali A. Dehghan, Ahmadreza Ayoobi, Hayat Adavi

Abstract

The study of turbulent boundary layer trailing-edge noise is a fundamental issue in designing and producing flying vehicles with minimum noise. Over the past decades, to reduce trailing-edge noise, various passive methods have been proposed, and the most recent strategy is the use of noise-reducing finlets. In the present study, to investigate the effect of noise reduction finlets on the turbulent flow field in the vicinity of the model trailing edge, a flat-plate model equipped with unsteady surface pressure transducers has been designed and built. Then, by installing a set of finlets with different lateral spacing on it, their effects on the flow field downstream of the finlets have been experimentally studied. Results show that the flow behavior downstream of the finlets is strongly affected by the spacing between the finlets. While the use of coarse finlets leads to a reduction in the mean velocity, turbulence intensity, and energy contents of low-frequency turbulent structures in the near-wall regions downstream of finlets, the flow behavior downstream of fine finlets are somewhat similar to the flow behind a backward-step. For fine finlets, the energy contents of turbulent structures in the near-wall regions are significantly reduced over the whole frequency range. The results of cross-correlation and coherence between surface pressure fluctuations and velocity field also indicated that although the most important mechanism affecting surface pressure fluctuations for the coarse finlets is the exit low-momentum flow, for the tiny finlets, vortical structures formed by flow separation have effective contribution on pressure level fluctuation under the finlets.

Key words: Noise, Flat-plate, Turbulent boundary layer, finlets

* نویسنده پاسخگو: عباس افشاری، پست الکترونیک: afshari@ssau.ac.ir

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



مقدمه

نوفه آیرودینامیکی یکی از مهم‌ترین بخش‌های آلودگی صوتی در جوامع امروزی است. این نوع از نوفه توسط عوامل متعددی از قبیل وسائط نقلیه مدرن مانند هواپیماها، اتومبیل‌ها و قطارها، توربین‌های بادی، سیستم‌های سرمایش و گرمایش و غیره و ایجاد و منتشر می‌شود. نوفه ناشی از ایرفویل از جمله نوفه‌های آیرودینامیکی بوده که بواسطه تداخل یک جریان ناپایا با سطح یک ایرفویل ایجاد می‌گردد. بر اساس مطالعات پیشین، مکانیزم‌های نوفه ناشی از ایرفویل به ۵ گروه شامل نوفه لبه‌فرار لایه مرزی آشفتگی، نوفه ریزش گردابه لایه مرزی آرام، نوفه جدایش (واماندگی)^۱، نوفه ریزش گردابه لبه‌فرار پخ^۲ و نوفه گردابه نوک بال. تقسیم‌بندی شده‌اند [۱]. در میان نوفه‌های یادشده، نوفه لبه‌فرار لایه مرزی آشفتگی، یکی از منابع اصلی نوفه آیرودینامیکی در هواپیماها، توربین‌های بادی و فن‌ها بوده و در دهه‌های گذشته مطالعات گسترده‌ای به آن اختصاص یافته است [۲، ۳]. مطالعه تحلیلی مرجع [۴] از جمله اولین مطالعات انجام شده در زمینه نوفه لبه فرار است که به بررسی ارتباط بین منابع دوقطبی و چهارقطبی با توان نوفه لبه فرار پرداخته است. نرخ تغییر سطح نوفه لبه فرار با سرعت جریان آزاد در مطالعه [۵] و فیزیک مکانیزم تولید نوفه لبه فرار در مطالعه تجربی [۶] مورد بررسی قرار گرفته است. نوفه لبه‌فرار لایه مرزی آشفتگی پهن‌بند بوده و علت وسیع بودن حوزه فرکانسی آن، حضور ساختارهای گردابه‌ای^۳ با اندازه‌های مختلف در لایه مرزی آشفتگی می‌باشد. هنگامی که اغتشاشات گردابه‌ای موجود در لایه مرزی آشفتگی از روی لبه‌فرار ایرفویل عبور می‌کنند به امواج آکوستیکی تبدیل می‌شوند. پروسه فیزیکی نوفه لبه‌فرار لایه مرزی آشفتگی از نقطه نظر تعادل نیروهای وارد به ساختارهای گردابه‌ای توسط راجر و موریو توضیح داده شده است [۷].

در طول دهه‌های گذشته، به منظور کاهش نوفه لبه‌فرار ایرفویل، روش‌های غیرفعال^۴ مختلفی مانند دندانه‌دار کردن لبه‌فرار ایرفویل^۵ [۲، ۸]، برس‌های لبه‌فرار^۶ [۹، ۱۰]، لبه‌فرار متخلخل^۷ [۱۱، ۱۲]، بهینه سازی پروفیل ایرفویل^۸ [۱۳، ۱۴] و اخیراً نصب فینلت^۹ در لبه‌فرار ایرفویل [۱۵-۱۸] پیشنهاد شده است. در میان روش‌های غیرفعال کاهش نوفه لبه‌فرار لایه مرزی آشفتگی، جدیدترین راهبرد، روش استفاده از فینلت بوده

که از پیکربندی بال جغد الهام گرفته شده و در سال ۲۰۱۷ توسط کلارک و همکارانش پیشنهاد شده است [۱۵]. آن‌ها برای بررسی کارایی روش نصب فینلت در لبه‌فرار ایرفویل در کاهش نوفه لبه‌فرار لایه مرزی آشفتگی، نوفه دوردست ایرفویل DU96-W180 را در حضور فینلت‌ها با ابعاد مختلف اندازه‌گیری نمودند. فینلت‌ها دقیقاً در بالادست لبه‌فرار نصب شدند تا ساختارهای لایه مرزی را قبل از رسیدن به لبه‌فرار ایرفویل تصحیح نمایند. نتایج آن‌ها نشان داد که حضور فینلت‌ها منجر به کاهش نوفه لبه‌فرار تا حدود ۱۰ دسی‌بل شده است. بر مبنای نتایج این مطالعه، هرچه فاصله بین فینلت‌ها کمتر باشد عملکرد فینلت‌ها بر کاهش نوفه موثرتر است ولیکن در صورتیکه فاصله بین فینلت‌ها خیلی کم شود، یک افزایش نوفه در فرکانس‌های پایین مشاهده می‌گردد. در ادامه بررسی‌ها، کلارک و همکارانش [۱۹] برای بررسی کارایی فینلت‌ها در کاهش نوفه لبه‌فرار یک روتور دریایی^{۱۰}، آزمایشات متعددی روی یک روتور با قطر ۰/۴۶ متر در سرعت ۲۰-۱۰ متر بر ثانیه و با سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه انجام دادند. نوفه دوردست با استفاده از یک آرایه میکروفون اندازه‌گیری شده و نتایج جریان با استفاده از یک جریان‌سنج سیم داغ در پایین دست روتور بدست آمد. نتایج آن‌ها نشان داد که فینلت‌ها اگرچه منجر به افزایش شدت آشفتگی در پایین دست روتور می‌شوند، اما همزمان قادر به کاهش نوفه پهن‌بند لبه‌فرار تا حدود ۸ دسی‌بل شده‌اند.

به منظور درک فیزیک حاکم بر جریان در هنگام استفاده از فینلت، مرجع [۲۰]، به مطالعه عددی جریان اطراف ایرفویل NACA 0012 در اعداد رینولدز بالا و در زوایای حمله مختلف پرداخت. نتایج این مطالعه نشان داد که حضور فینلت ضمن کاهش نوفه دوردست، منجر به کاهش شدت توربولانس و سرعت جریان در نزدیکی سطح ایرفویل می‌شود. نتایج مراجع [۲۱، ۲۲] در رابطه با شبیه‌سازی عددی جریان اطراف ایرفویل NACA 0012 نیز نشان داد که فینلت‌ها می‌توانند منجر به کاهش قابل توجه فشار ناپایای سطح ایرفویل و نوفه منتشر شده در دوردست گردند. همچنین نتایج این مراجع نشان داد که آنچه منجر به کاهش نوفه دوردست در هنگام حضور فینلت‌ها می‌گردد فاصله گرفتن ساختارهای توربولانسی جریان از سطح ایرفویل می‌باشد.

نوسانات فشار سطح و میدان سرعت به صورت تجربی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. لازم به ذکر است که ایجاد مکانیزم اندازه‌گیری نوسانات ناپایای فشار سطح شامل طراحی و ساخت منبع تغذیه، طراحی و ساخت کالیبراتور میکروفون‌ها، حذف نویزهای الکترونیکی و نوشتن کدهای مربوط به کالیبراسیون و همچنین داده‌برداری همزمان نوسانات سرعت (با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ) و نوسانات فشار سطحی (با استفاده از میکروفون) و ارائه نتایج همبستگی متقابل و تابع همدوسی بین نوسانات فشار سطح و میدان سرعت، برای اولین بار در کشور با همکاری دانشگاه بریستول انگلیس انجام گرفته است.

تجهیزات آزمایش

تمامی آزمایش‌ها در تونل باد مادون‌صوت اصلاح شده دانشگاه یزد و در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه (معادل عدد رینولدز بر پایه وتر برابر با $Re_c = 7.73 \times 10^5$) انجام شده است. در این بخش، مشخصات تونل باد، مدل صفحه تخت، آرایش میکروفون‌ها روی مدل، مشخصات هندسی فینلت‌ها و مراحل انجام آزمایش‌ها ارائه شده است.

تونل باد

تونل باد استفاده شده از نوع مدار باز بوده که ابعاد سطح مقطع آزمون آن $46 \text{ cm} \times 46 \text{ cm}$ است. در ماکزیمم سرعت تونل، 25 m/s ، شدت توربولانس جریان آزاد کمتر از 0.3% است.



شکل ۱ - تونل باد اصلاح شده دانشگاه یزد

فن تونل از نوع گریز از مرکز و دارای تیغه‌هایی با شیب رو به جلو بوده که نوفه فرکانس پهن‌بند پایین تا متوسطی را

برای مطالعه دقیق‌تر نحوه عملکرد فینلت‌های کاهش‌دهنده نوفه لبه فرار، اخیراً [مراجع ۱۶، ۱۷] با تجهیز یک مدل صفحه تخت به سنسورهای فشار سطحی، به مطالعه تاثیر فینلت‌ها روی پارامترهای اصلی نوفه لبه‌فرار در میدان نزدیک شامل طیف فشار سطح، طول مشخصه در راستای دهانه^{۱۱} مدل و سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای^{۱۲} پرداختند. آن‌ها همچنین، جهت مطالعه ساختار جریان لایه مرزی در پایین دست فینلت‌ها، از جریان‌سنج سیم داغ یک بعدی استفاده نمودند. برخلاف مطالعات پیشین، نتایج این مطالعه نشان داد که رفتار جریان در پایین دست فینلت‌ها، به شدت وابسته به فاصله عرضی بین فینلت‌هاست. استفاده از فینلت‌ها با فواصل عرضی زیاد، منجر به کاهش طیف فشار سطح در محدوده لبه فرار در فرکانس‌های میانی و بالا و افزایش طول مشخصه در راستای دهانه مدل در فرکانس‌های پایین و میانی شده است. از طرف دیگر، برای فینلت‌ها با فواصل عرضی کم، در حالی که طیف فشار سطح در محدوده لبه فرار در فرکانس‌های بالا به مقدار بیشتری کاهش یافته، افزایش نامطلوبی در فرکانس‌های پایین تا میانی بوجود آمده است. همچنین، فینلت‌های ریز می‌توانند منجر به کاهش همدوسی عرضی در فرکانس‌های میانی و بالایی گردند. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد که سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای در پایین دست همه فینلت‌ها کاهش یافته و با کاهش فاصله عرضی بین فینلت‌ها، این اثر تقویت می‌گردد.

در نهایت مرور تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه کارایی عالی فینلت‌ها در کاهش نوفه لبه‌فرار توسط محققین مختلف به اثبات رسیده است اما اندازه‌گیری‌های آن‌ها غالباً منحصر به اندازه‌گیری شدت صدا در دوردست بوده و کمتر میدان جریان (به عنوان منبع اصلی تولید صدا) در پایین دست فینلت‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر که ادامه مطالعات پیشین نویسنندگان حاضر روی فینلت‌های کاهش‌دهنده نوفه لبه فرار (ارائه شده در مراجع [۱۶، ۱۷]) است به منظور بررسی چگونگی تاثیر حضور فینلت‌های کاهش‌دهنده نوفه بر میدان جریان آشفته در محدوده لبه فرار صفحه تخت، مجموعه‌ای از فینلت‌ها با فواصل عرضی مختلف ساخته شده و اثرات حضور آن‌ها، روی مقادیر سرعت متوسط، شدت آشفته‌گی، تغییرات چگالی طیف توان^{۱۳} سرعت در پایین دست فینلت‌ها و رفتار همبستگی متقابل^{۱۴} و تابع همدوسی^{۱۵} بین

توجه به محدودیت طول مدل، به منظور اطمینان از وجود لایه مرزی آشفته کاملاً توسعه یافته، ضخیم کردن لایه مرزی و دستیابی به اعداد رینولدز بر پایه ضخامت مومنتوم بالاتر، از یک تریپ زبر در پایین دست لبه حمله روی سطح بالایی مدل در موقعیت ۱۰ درصد وتر، استفاده شده است.

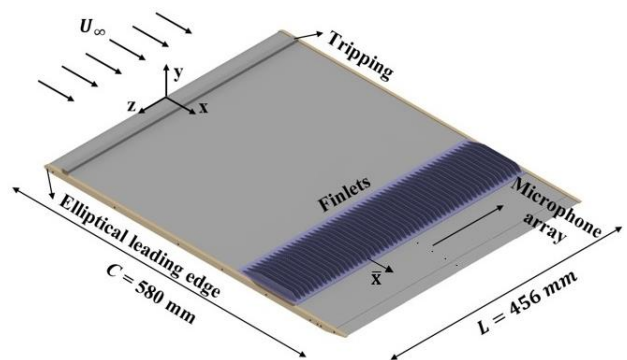
آرایش میکروفون‌ها روی سطح مدل

در مطالعه حاضر برای اندازه‌گیری نوسانات ناپایای فشار سطح از میکروفون‌های کوچک FG-23329-P07 استفاده شده است. این میکروفون‌ها دارای قطر و ارتفاع ۲/۵ mm بوده و قطر ناحیه حسگر^{۱۶} صدا ۰/۸ mm است. کارایی عالی میکروفون‌های انتخاب شده برای اندازه‌گیری فشار ناپایای سطح در مطالعات انجام شده قبلی به اثبات رسیده است [۲۵، ۲۶]. اندازه‌گیری دقیق نوسانات فشار در یک نقطه نیازمند یک سنسور فشار بی-نهایت کوچک است. با این وجود تمامی سنسورهای فشار موجود دارای قطر ناحیه حسگر مشخصی هستند. در فرکانس‌های پایین (طول موج بالا)، طول موج بزرگتر از قطر ناحیه حسگر سنسور بوده و در نتیجه سنسور به صورت نقطه‌ای عمل می‌نماید. اما در فرکانس‌های بالا که طول موج خیلی کوچکتر از قطر ناحیه حسگر سنسور است، فشار اندازه‌گیری شده توسط سنسور، میانگین فشار وارد شده به ناحیه حسگر سنسور است. در واقع نوسانات فشار کوچکتر از قطر ناحیه حسگر سنسور، انتگرال‌گیری مکانی شده و تضعیف می‌گردند. بنابراین چنانچه در مطالعات مختلف نشان داده شده است، قطر محدود ناحیه حسگر میکروفون منجر به کاهش نوسانات فشار اندازه‌گیری شده سطح در فرکانس‌های بالا خواهد شد [۲۷-۲۹]. برای حل این مشکل معمولاً از یک نقاب با سوراخ ریز^{۱۷} جهت کاهش ناحیه حسگر موثر سنسور استفاده می‌گردد [۱۲، ۳۰]. در مطالعه حاضر به منظور کاهش اثرات تضعیف^{۱۸} در فرکانس‌های بالا ناشی از سایز ناحیه حسگر میکروفون، به جای نصب مستقیم میکروفون‌ها روی سطح مدل، آن‌ها در زیر یک نقاب با سوراخ ریز به قطر ۰/۴ mm نصب شده‌اند. همچنین، تصحیح اثرات تضعیف، تصحیحات پیشنهاد شده توسط گریس [۲۷] روی نتایج اعمال شده است. گریس با ارائه یک جدول مقادیر $\Phi(\omega)_{measured} / \Phi(\omega)_{true}$ را بر حسب تابعی از $\omega r / U_c$ ارائه نموده که $\Phi(\omega)$ چگالی طیف فشار، ω فرکانس زاویه‌ای، r شعاع سوراخ (و یا شعاع ناحیه حسگر

ایجاد می‌نماید. با این وجود به علت آلوده شدن سیگنال‌های فشار سطحی با نوفه زمینه تونل، با جایگزین کردن دیواره‌های داخلی تونل باد با مواد متخلخل، نوفه زمینه تونل در حدود ۱۵ dB کاهش یافته است، شکل ۱. بعلاوه به منظور کاهش اثرات نامطلوب نوفه زمینه تونل، تمامی آزمایشات در دهانه خروجی تونل انجام گرفته است. در این قسمت به دلیل فاصله بیشتر از فن تونل و عدم وجود دیواره‌های بالا و پایین، نوفه زمینه به مراتب کمتر است.

مدل صفحه تخت

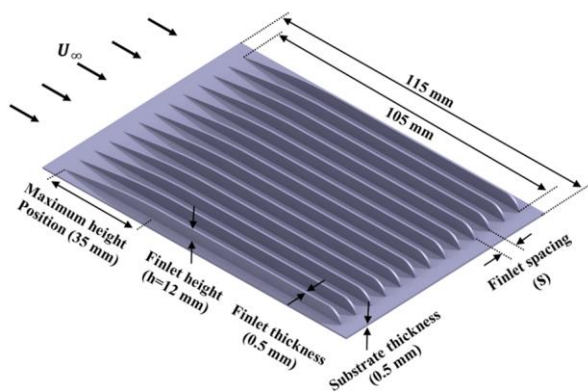
در مطالعه حاضر برای بررسی نوفه لبه‌فرار آشفته، از یک صفحه تخت با طول وتر ۵۸۰ mm، دهانه مدل ۴۶۰ mm و ضخامت ۸ mm استفاده شده است، شکل ۲. لبه حمله مدل به صورت نیم بیضی با نیم قطر بزرگ ۱۲ mm و نیم قطر کوچک ۴ mm ساخته شده است. همچنین برای چسبیده ماندن جریان روی سطح، زاویه لبه‌فرار مدل به صورت ۱۲ درجه نامتقارن در نظر گرفته شده است [۲۳]. ضخامت لبه‌فرار (t) برابر با ۰/۴ mm انتخاب شده و بنابراین نوفه نازک‌باند ریزش گردابه لبه‌فرار پخ قابل نظر است ($t/\delta^* < 0.3$) [۳]. که δ^* ضخامت جابجایی لایه مرزی است.



شکل ۲ - نمای شماتیک مدل، موقعیت تریپ، آرایه میکروفون‌ها و فینلت‌های نصب شده روی مدل

از طرفی با توجه به ابعاد مدل و مقطع آزمون تونل باد، نسبت انسداد تونل برای مدل صفحه تخت برای تمامی آزمایش‌ها کمتر از ۲٪ بوده و بنابراین اثرات دیواره‌های تونل روی مقادیر اندازه‌گیری شده ناچیز است [۲۴]. همچنین برای اطمینان از وجود جریان دو بعدی در طول دهانه مدل از دو صفحه کناری در دو طرف مدل استفاده شده است. بعلاوه با

چسب آلومینیومی به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر به گونه‌ای روی مدل صفحه تخت چسبانده می‌شود که لبه حمله و فرار آن شکل آیرودینامیکی داشته و کمترین اغتشاش جریان ممکن را ایجاد نمایند. فینلت‌ها روی سطح بالایی مدل صفحه تخت در بالادست لبه فرار مدل نصب شده‌اند. ارتفاع فینلت‌ها (h) با توجه به ضخامت لایه مرزی و همچنین مقادیر استفاده شده در مراجع [۱۵، ۱۶] برابر با ۱۲ میلی‌متر ($h = 0.24\delta$) در نظر گرفته شده است. پروفیل لبه حمله فینلت‌ها نیز متناسب با پروفیل لایه مرزی آشفته یعنی $\hat{x}^{4/5}$ (\hat{x} عبارتست از فاصله تا لبه حمله فینلت‌ها) طراحی شده که دلیل آن ایجاد تغییرات تدریجی در جریان عبوری از روی فینلت‌هاست.



شکل ۴ - مشخصات هندسی فینلت‌ها

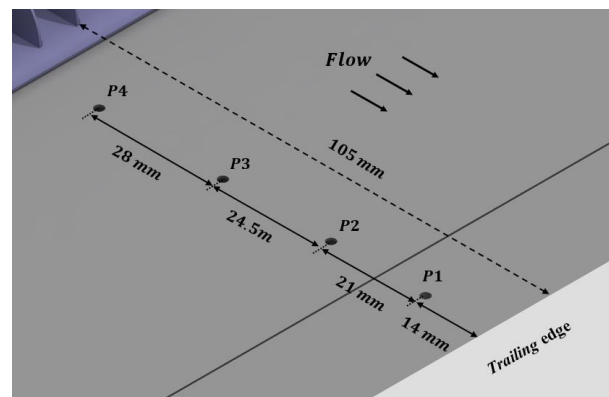
مراحل انجام آزمایش و تحلیل داده‌ها

همانطور که در بخش قبل بیان شد اندازه‌گیری نوسانات فشار با استفاده از میکروفون‌های FG-23329-P07 انجام شده است. قبل از انجام آزمایشات می‌بایست ضریب حساسیت میکروفون‌های استفاده شده بوسیله فرآیند کالیبراسیون اندازه‌گیری شود. در مطالعات مختلف از موج صفحه‌ای ایجاد شده در لوله برای این منظور استفاده شده است [۳۱]. در مطالعه حاضر برای ایجاد نوفه سفید صفحه‌ای در محدوده فرکانس ۲۰۰۰-۱۰۰ هرتز از یک لوله با طول ۱۱۰ میلی‌متر و قطر ۱۰ میلی‌متر به همراه یک اسپیکر کیفیت بالا به عنوان کالیبراتور میکروفون استفاده شده است [۳۲، ۳۳]. برای بدست آوردن تابع انتقال میکروفون‌ها هنگامی که داخل مدل نصب شده‌اند، لوله کالیبراتور روی سوراخ فشار قرار گرفته و هر میکروفون در معرض نوفه سفید صفحه‌ای قرار خواهد گرفت. جهت رعایت

سنسور فشار) و U_c سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای است. آرایش میکروفون‌ها روی سطح مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین موقعیت آن‌ها روی سطح بالایی مدل در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به شکل ۳، در مجموع از تعداد ۴ میکروفون استفاده شده است.

جدول ۱- موقعیت سوراخ‌های فشار روی سطح بالایی مدل

میکروفون	فاصله از لبه فرار (mm)	x/c	\bar{x}/h
۱	۱۴	۰/۹۸	۸/۶
۲	۳۵	۰/۹۴	۶/۸
۳	۵۹/۵	۰/۹۰	۴/۸
۴	۸۷/۵	۰/۸۵	۲/۵



شکل ۳ - آرایش میکروفون‌ها روی سطح مدل

مشخصات هندسی فینلت‌ها

در مطالعه حاضر به منظور بررسی اثر فاصله بین فینلت‌ها روی ساختار جریان پایین‌دست، دو نمونه فینلت با فواصل عرضی (s) مختلف شامل فینلت درشت با فاصله عرضی ۸ میلی‌متر ($s=8$) و فینلت ریز با فاصله عرضی ۲ میلی‌متر ($s=2$) ساخته شده است. همچنین به منظور درک و تحلیل بهتر رفتارهای مشاهده شده، فیزیک جریان در پایین‌دست پله رو به عقب با پروفیلی مشابه پروفیل فینلت‌های مورد مطالعه ($s=0$) مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با توجه به دقت بالای مورد نیاز، ساخت فینلت‌ها در دانشگاه بریستول انگلیس و با استفاده از دستگاه پرینتر ۳ بعدی بسیار دقیق این دانشگاه انجام شده است. پارامترهای هندسی فینلت‌های مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است. فینلت‌ها روی یک صفحه نازک به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. این صفحه نازک بوسیله

$$\Phi_{pu}(\omega) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E [P^*(\omega, T) U(\omega, T)]$$

که E امید ریاضی یک متغیر تصادفی گسسته است. همچنین $P(\omega, T)$ و $U(\omega, T)$ به ترتیب تبدیل فوریه $p'(t)$ و $u'(t)$ بوده و با توجه به رابطه (۲) قابل محاسبه است. بعلاوه $P^*(\omega, T)$ و $U^*(\omega, T)$ به ترتیب مزدوج مختلط $P(\omega, T)$ و $U(\omega, T)$ است.

$$P(\omega, T) = \int_0^T p'(t) e^{-j\omega t} dt \quad (۲)$$

$$U(\omega, T) = \int_0^T u'(t) e^{-j\omega t} dt$$

چنانچه پهنای باند فرکانسی برابر با ۱ Hz در نظر گرفته شود، چگالی طیفی خودکار، معادل چگالی طیف توان بوده و تنها دارای اندازه است. از سوی دیگر چگالی طیفی متقابل، $\Phi_{pu}(\omega)$ ، تابعی مختلط بوده و به صورت رابطه (۳) قابل نمایش است.

$$\Phi_{pu}(\omega) = |\Phi_{pu}(\omega)| \exp(i\varphi_{pu}(\omega)) \quad (۳)$$

که $\varphi_{pu}(\omega)$ فاز تابع چگالی طیفی متقابل نوسانات فشار سطح و نوسانات سرعت جریان است.

همبستگی متقابل بین نوسانات فشار سطح و مولفه سرعت در راستای جریان، R_{pu} ، به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$R_{pu}(\bar{x}, \bar{y}, \tau) = \frac{p'(\bar{x}, t) u'(\bar{y}, t + \tau)}{(p_{rms}(\bar{x}) u_{rms}(\bar{y}))} \quad (۴)$$

که p' نوسانات فشار سطح، u' نوسانات سرعت در راستای جریان، τ تاخیر زمانی بین دو سیگنال و \bar{y} فاصله عمودی بین میکروفون و جریان سنج سیم داغ است. طبق تعریف، مقادیر مثبت τ نشان می‌دهد که میدان سرعت نسبت به میدان فشار تاخیر دارد. بعلاوه از آنجا که چگالی طیفی متقابل^{۱۲} از طریق تبدیل فوریه همبستگی متقابل بدست می‌آید، آنالیز چگالی طیفی متقابل، اطلاعات خوبی در رابطه با فرکانس پدیده‌های جریان که مسئول تولید فشار سطح هستند فراهم نموده و فهم همبستگی متقابل بین نوسانات فشار سطح و میدان سرعت را تکمیل می‌نماید. بنابراین در مطالعه حاضر از تابع همدوسی بین نوسانات فشار سطح و میدان سرعت، γ_{pu}^2 ، که شکل نرمال شده تابع چگالی طیفی متقابل است، برای تعیین میزان تاثیر رفتارهای ناپایای مختلف در لایه مرزی بر میدان فشار القا شده روی سطح در حوزه فرکانس استفاده شده است. همدوسی بین

اختصار، پروسه کامل فرآیند کالیبراسیون و نحوه بدست آوردن تابع انتقال در مرجع [۳۴] ارائه شده است.

اثرات نامطلوب تضعیف و تشدید با اعمال تابع انتقال بر روی نتایج میکروفون‌ها تصحیح خواهد شد. لازم به ذکر است که استفاده از صوت فقط در مرحله کالیبراسیون میکروفون و تعیین دقیق پاسخ دینامیکی آن انجام می‌گیرد. در مطالعه حاضر از یک میکروفون کندانسوری بسیار دقیق یک چهارم اینچ مدل G.R.A.S 40BP به عنوان میکروفون مرجع استفاده شده است. میکروفون‌های FG با استفاده از یک منبع تغذیه ۱۰ کاناله (ساخت دانشگاه یزد) راه اندازی شده و داده برداری با استفاده از یک سیستم پردازش سیگنال مدل DT9847-2-2 انجام گرفته است. فرکانس داده برداری برابر با ۴۰ کیلوهرتز بوده و در مجموع تعداد ۸۰۰ هزار داده در مدت زمان ۲۰ ثانیه ذخیره شده است.

همچنین به منظور مطالعه ساختار جریان لایه مرزی در پایین دست فینلت‌ها، از جریان سنج سیم داغ یک بعدی با مدار دما ثابت (ساخت شرکت فرانسجش صبا) استفاده شده است. سنسور این جریان سنج، سیمی از جنس تنگستن به ضخامت ۵ μm و طول ۱/۲۵ mm است. قبل از استفاده از جریان سنج سیم داغ، پراب آن به صورت دقیق از نظر استاتیکی و دینامیکی با استفاده از لوله پیتوت و فرآیند تست موج مربعی کالیبره شده و همه نتایج با توجه به فرکانس قطع ۱۵ کیلوهرتز از فیلتر پایین گذر عبور داده شده است. کلیه داده‌ها با فرکانس داده برداری ۳۰ کیلوهرتز در مدت ۱۰ s ذخیره شده است. نمایی از مدل صفحه تخت به همراه جریان سنج سیم داغ در شکل ۵ نشان داده شده است.

در ادامه، لازم است نحوه تحلیل داده‌ها و محاسبه چگالی طیف توان فشار و سرعت، همبستگی متقابل (R_{pu}) و تابع همدوسی (γ_{pu}^2) بین نوسانات فشار سطح و میدان سرعت بیان گردد.

با توجه به روابط بندها و پیرسول [۳۵]، چگالی طیفی خودکار^{۱۹} و متقابل برای هر دو سیگنال زمانی مختلف همچون نوسانات فشار سطح، $p'(t)$ و نوسانات سرعت جریان، $u'(t)$ ، به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\Phi_{pp}(\omega) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E [P^*(\omega, T) P(\omega, T)] \quad (۱)$$

$$\Phi_{uu}(\omega) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E [U^*(\omega, T) U(\omega, T)]$$

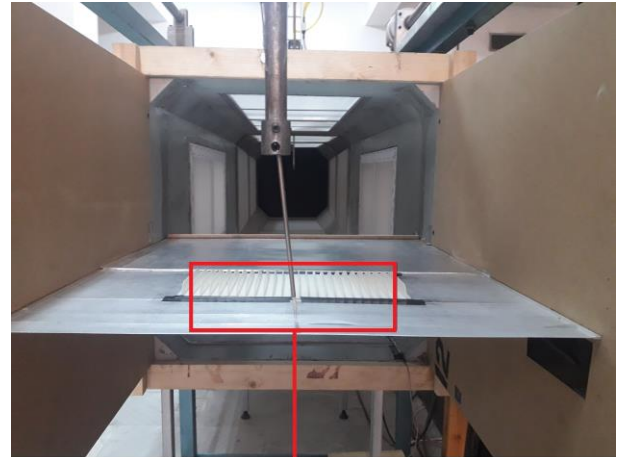
نوسانات فشار سطح و میدان سرعت در راستای جریان با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود [۱۲].

$$\gamma_{pu}^2(\bar{x}, \bar{y}, \omega) = \frac{|\Phi_{pu}(\bar{x}, \bar{y}, \omega)|^2}{(\Phi_{pp}(\bar{x}, \omega)\Phi_{uu}(\bar{x}, \bar{y}, \omega))} \quad (5)$$

نوسانات فشار سطح و میدان سرعت در راستای جریان با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود [۱۲].

نوسانات فشار سطح و میدان سرعت در راستای جریان با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود [۱۲].

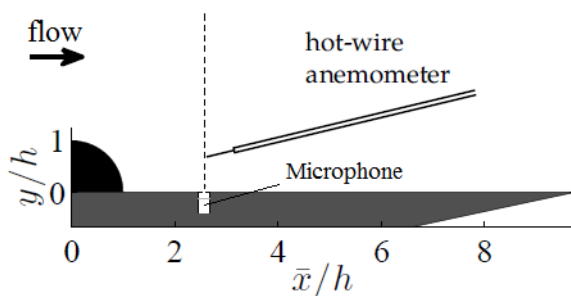
$$\gamma_{pu}^2(\bar{x}, \bar{y}, \omega) = \frac{|\Phi_{pu}(\bar{x}, \bar{y}, \omega)|^2}{(\Phi_{pp}(\bar{x}, \omega)\Phi_{uu}(\bar{x}, \bar{y}, \omega))} \quad (5)$$



شکل ۵ - مدل صفحه تخت به همراه جریان سنج سیم داغ

نتایج و بحث

در این بخش ابتدا ساختار جریان لایه مرزی در پایین دست فینلت‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. تمامی اندازه‌گیری‌های سرعت لایه مرزی در نیمه دهانه مدل و در سرعت ۲۰ m/s انجام گرفته است. بررسی‌های انجام شده شامل بررسی سرعت متوسط، شدت آشفتگی و چگالی طیف توان سرعت در پایین دست فینلت‌ها است. در ادامه، به منظور دستیابی به درک روشن‌تری از نحوه تاثیرگذاری فینلت‌ها روی ساختار جریان لایه مرزی، با استفاده از داده‌برداری همزمان نوسانات سرعت و فشار سطح در نقاط مختلف لایه مرزی بالای میکروفن‌های p1، p2، p3 و p4 ($\bar{x}/h = 2.5, 4.8, 6.8$ and 8.6)، رفتار همبستگی متقابل و تابع هم‌دوسی بین نوسانات فشار سطح و میدان سرعت مورد بررسی قرار گرفته است، شکل ۶. تکرارپذیری نتایج در حالت‌های مختلف بررسی شده و برای نوشتن تمامی کدها از نرم افزار متلب استفاده شده است.



شکل ۶ - داده‌برداری همزمان نوسانات سرعت (از طریق جریان سنج سیم داغ) و فشار سطح (از طریق میکروفون) در نقاط مختلف لایه مرزی واقع در بالای میکروفون

در نهایت، نتایج یک اندازه‌گیری، تنها زمانی کامل است که همراه با عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری شده ارائه گردد. عدم قطعیت چگالی طیفی خودکار و متقابل نوسانات فشار میکروفون‌ها عمدتاً ناشی از عدم قطعیت همگرایی آماری بوده و با توجه به روابط بنسداد و پیرسول [۳۵] به صورت $\varepsilon = 1/\sqrt{N_r}$ محاسبه می‌گردد. که N_r برابر با تعداد ثبت داده‌ها است. در مطالعه حاضر جهت کاهش عدم قطعیت همگرایی آماری، کل زمان داده برداری به ۸۰۰ قسمت مجزا تقسیم شده ($N_r = 800$) که با توجه به تعداد کل داده‌ها (۸۰۰ هزار داده)، هر قسمت دارای ۱۰۰۰ داده است. طیف فشار سطح با میانگین‌گیری از طیف فشار حاصل از تمامی قسمت‌ها بدست آمده است. بنابراین با توجه به رابطه ذکر شده، عدم قطعیت همگرایی آماری چگالی طیفی خودکار و متقابل

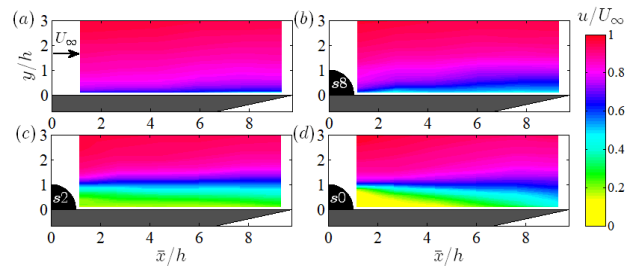
نسبت ضخامت لایه مرزی ورودی به ارتفاع پله، عدد رینولدز، شدت آشفتگی ورودی و غیره است. با توجه به شکل ۸، موقعیت اتصال مجدد جریان به سطح برای نمونه $s=0$ در حدود $\bar{x}/h \approx 7$ است. همچنین مشاهده می‌گردد که ماکزیمم شدت آشفتگی برای نمونه $s=0$ در $\bar{x}/h \approx 6$ رخ داده که به اندازه یک برابر ارتفاع پله، در بالادست موقعیت اتصال مجدد (یعنی $\bar{x}/h \approx 7$) قرار دارد. این نتیجه نیز با مشاهدات مطالعات پیشین [۴۰، ۴۱] تطابق خوبی دارد.

با توجه به شکل ۸، برای فینلت‌های ریز ($s=2$) نیز مشابه نمونه $s=0$ (پله رو به عقب)، جریان جدا شده باعث تشکیل یک لایه برشی در موقعیت تقریبی $y/h \approx 1$ شده است. با این حال، ماکزیمم شدت آشفتگی به ازای نمونه $s=2$ نسبت به پله رو به عقب در موقعیت طولی دورتر ($\bar{x}/h \approx 9$) و با شدت کمتری رخ داده است. اختلاف مشاهده شده در موقعیت و اندازه ماکزیمم شدت آشفتگی در هنگام استفاده از نمونه $s=2$ به جای نمونه $s=0$ ، با مشاهدات مربوط به موقعیت و اندازه ماکزیمم ضریب فشار برای این نمونه‌ها تطابق خوبی دارد [۱۷]. به نظر می‌رسد جابجا شدن نقطه ماکزیمم شدت آشفتگی (و به دنبال آن نقطه اتصال مجدد جریان) به سمت پایین‌دست جریان در نمونه $s=2$ ، به دلیل حضور جریان کم سرعت خروجی از بین فینلت‌هاست. در واقع حضور این جریان کم مومنتوم باعث کاهش گرادیان فشار معکوس در ناحیه پشت فینلت‌ها [۱۷] و در نتیجه کاهش اثر "کوندا" و در نهایت افزایش طول اتصال مجدد شده است. این تغییر در طول اتصال مجدد نسبت به پله رو به عقب با مشاهدات مراجع [۴۲، ۴۳] در پایین‌دست پوشش‌های گیاهی و مرجع [۴۴] در پایین‌دست پله نفوذپذیر همخوانی مناسبی دارد.

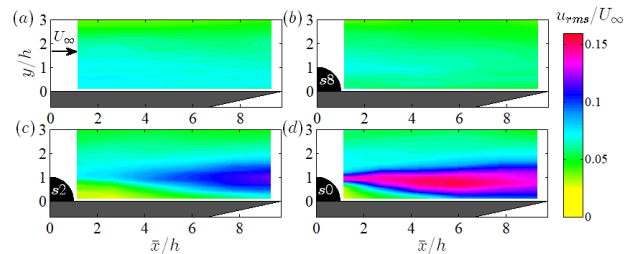
در ادامه، جهت درک بهتر رفتار جریان در پایین‌دست فینلت‌ها با فواصل عرضی درشت و ریز، پروفیل سرعت متوسط (u/U_∞) و پروفیل شدت آشفتگی (u_{rms}/U_∞) در چندین موقعیت طولی مختلف ($\bar{x}/h = 2.5, 4.8, 6.8$ and 8.6) به ترتیب در شکل ۹ و شکل ۱۰ ارائه شده و با نتایج حالت مبنا و پله رو به عقب ($s=0$) مقایسه شده است. همانطوری که دیده می‌شود در هنگام حضور فینلت‌ها با فواصل عرضی درشت، سرعت متوسط و شدت آشفتگی در نزدیکی سطح مدل (حداکثر تا ۲ برابر ارتفاع فینلت‌ها)، در تمامی موقعیت‌های طولی مطالعه شده در پایین‌دست فینلت‌ها کاهش یافته است.

بررسی میدان سرعت در پایین‌دست فینلت‌ها

در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب خطوط همتراز سرعت متوسط و شدت آشفتگی در پایین‌دست فینلت‌ها با فواصل عرضی درشت ($s=8$) و ریز ($s=2$) ارائه شده و با نتایج حالت مبنا (صفحه تخت بدون حضور فینلت) و نتایج پله رو به عقب با پروفیلی مشابه پروفیل فینلت‌های مورد مطالعه ($s=0$) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فینلت‌های درشت منجر به کاهش سرعت متوسط و شدت آشفتگی در نقاط نزدیک به سطح مدل در پایین‌دست فینلت‌ها شده است.



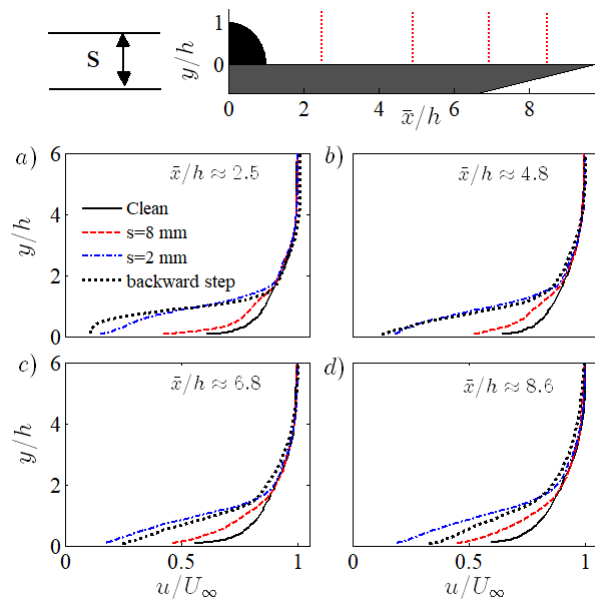
شکل ۷ - خطوط همتراز سرعت متوسط در پایین‌دست فینلت‌ها با فواصل عرضی مختلف، (a) صفحه تخت، (b) $s=2$ (c) $s=8$ (d) $s=0$



شکل ۸ - خطوط همتراز شدت آشفتگی در پایین‌دست فینلت‌ها با فواصل عرضی مختلف، (a) صفحه تخت، (b) $s=2$ (c) $s=8$ (d) $s=0$

از طرف دیگر، مقایسه نتایج خطوط همتراز سرعت متوسط و شدت آشفتگی در پایین‌دست فینلت‌های ریز با نمونه $s=0$ نشان می‌دهد که جریان در پایین‌دست فینلت‌های ریز تا حدودی مانند جریان در پایین‌دست پله رو به عقب ($s=0$) رفتار می‌کند. با توجه به شکل ۸ برای نمونه $s=0$ ، یک لایه برشی نازک بلافاصله بعد از لبه فرار پله ($y/h \approx 1$) تشکیل شده و با حرکت به سمت پایین‌دست جریان رشد می‌نماید. در ادامه طبق اثر "کوندا" به علت وجود گرادیان فشار معکوس در این ناحیه، جریان به سمت مدل منحرف شده و در نهایت به سطح مدل می‌چسبد. نتایج مطالعات پیشین روی پله رو به عقب [۳۹] نشان داده که رشد لایه برشی و موقعیت اتصال مجدد وابسته به پارامترهای مختلفی از جمله

این کاهش ممکن است ناشی از افزایش سطح خیس شده و در نتیجه افزایش استهلاک انرژی از طریق اصطکاک باشد. نکته قابل توجه دیگر، افزایش شدت آشفتگی در نقاط بسیار نزدیک به سطح مدل ($y/h \approx 0.1$)، در موقعیت $\bar{x}/h = 2.5$ در پایین‌دست نمونه‌ی $s=8$ است، شکل ۹. دلیل این افزایش، اغتشاشات جریان ناشی از حضور صفحه نازک است. همانطوری که بیان شد، جهت نصب فینلت‌ها روی مدل صفحه تخت، فینلت‌ها روی یک صفحه نازک به ضخامت 0.5 میلی‌متر قرار گرفته‌اند. این صفحه بصورت یک پله رو به عقب رفتار کرده و لایه برشی ایجاد شده در پایین‌دست آن منجر به افزایش شدت آشفتگی در نواحی بسیار نزدیک به سطح شده است. از طرف دیگر، نتایج سرعت متوسط در لایه مرزی (شکل ۹) به همراه خطوط همتراز میدان سرعت (شکل ۷) نشان می‌دهد که میدان جریان در پایین‌دست فینلت‌های ریز شباهت زیادی به میدان جریان پشت پله رو به عقب دارد. با این حال، تفاوت‌های مهمی بین رفتار جریان در پایین‌دست فینلت‌های ریز و پله رو به عقب وجود دارد. همانطور که در شکل ۹ دیده می‌شود برای نمونه‌ی $s=2$ بر خلاف پله رو به عقب، یک جریان کم سرعت بلافاصله بعد از فینلت‌ها (در موقعیت $\bar{x}/h = 2.5$) وجود دارد. بنابراین می‌توان نمونه‌ی $s=2$ را به عنوان یک پله نفوذپذیر در نظر گرفته و جریان در پایین‌دست این نوع فینلت را ترکیبی از یک جریان خروجی کم سرعت (در $y/h < 1$) و یک جریان جدا شده (در $y/h \approx 1$) دانست.



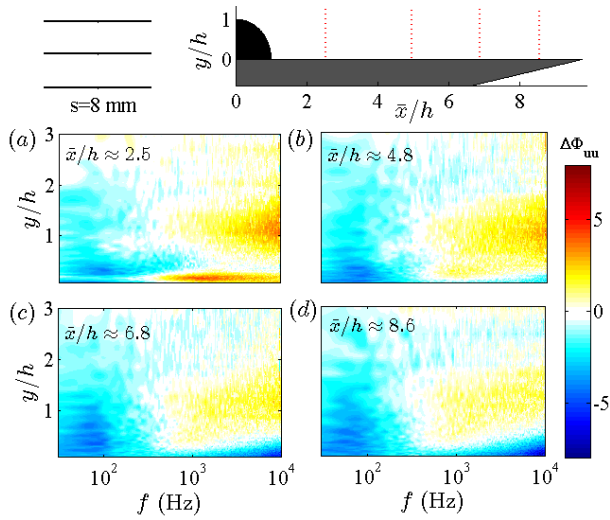
شکل ۹ - سرعت متوسط در موقعیت‌های طولی مختلف در پایین‌دست فینلت‌ها با فواصل عرضی مختلف، (a) $\bar{x}/h = 2.5$ ، (b) $\bar{x}/h = 4.8$ ، (c) $\bar{x}/h = 6.8$ ، (d) $\bar{x}/h = 8.6$

نکته قابل توجه دیگر این است که برخلاف فینلت با فواصل عرضی درشت ($s=8$)، پروفیل شدت آشفتگی در پایین‌دست فینلت‌های ریز، به شدت تابع فاصله طولی بین نقطه اندازه‌گیری تا لبه فرار فینلت‌هاست. همانطور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود با حرکت به سمت پایین‌دست (دور شدن از فینلت‌ها)، شدت آشفتگی در نزدیکی سطح مدل ($y/h < 1$) به دلیل افزایش عرض لایه برشی، افزایش یافته است.

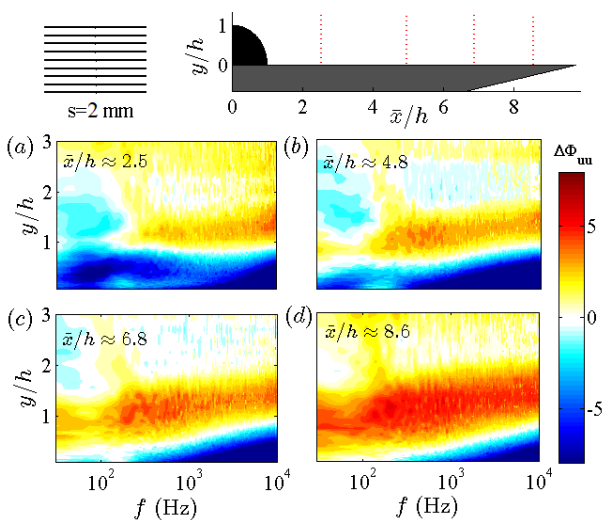
با توجه به نتایج ارائه شده به نظر می‌رسد رفتار جریان نواحی نزدیک به سطح مدل ($y/h < 1$)، در پایین‌دست فینلت‌های ریز، برخلاف فینلت با فواصل عرضی درشت ($s=8$)، ناشی از دو مکانیزم مختلف یعنی تشکیل ناحیه بازچرخش^{۲۲} در ناحیه پشت فینلت‌ها (بواسطه تشکیل لایه برشی) و خروج جریان کم سرعت از بین فینلت‌ها باشد. به منظور بررسی سهم نسبی هر کدام از دو مکانیزم یاد شده در کاهش شدت آشفتگی در پایین‌دست نمونه‌ی $s=2$ ، پروفیل شدت آشفتگی این نمونه با پروفیل پله رو به عقب در موقعیت‌های طولی مختلف ($\bar{x}/h = 2.5 - 8.6$) مقایسه شده است، شکل ۱۰. همانطوری که مشاهده می‌شود، برای نمونه‌ی $s=2$ در موقعیت $\bar{x}/h = 2.5$ ، افزایش قابل توجهی در شدت آشفتگی در موقعیت عمودی $y/h \approx 1$ رخ نداده و در نتیجه با توجه به عدم تشکیل یک لایه برشی قوی در این موقعیت طولی

در این کاهش ممکن است ناشی از افزایش سطح خیس شده و در نتیجه افزایش استهلاک انرژی از طریق اصطکاک باشد. نکته قابل توجه دیگر، افزایش شدت آشفتگی در نقاط بسیار نزدیک به سطح مدل ($y/h \approx 0.1$)، در موقعیت $\bar{x}/h = 2.5$ در پایین‌دست نمونه‌ی $s=8$ است، شکل ۹. دلیل این افزایش، اغتشاشات جریان ناشی از حضور صفحه نازک است. همانطوری که بیان شد، جهت نصب فینلت‌ها روی مدل صفحه تخت، فینلت‌ها روی یک صفحه نازک به ضخامت 0.5 میلی‌متر قرار گرفته‌اند. این صفحه بصورت یک پله رو به عقب رفتار کرده و لایه برشی ایجاد شده در پایین‌دست آن منجر به افزایش شدت آشفتگی در نواحی بسیار نزدیک به سطح شده است. از طرف دیگر، نتایج سرعت متوسط در لایه مرزی (شکل ۹) به همراه خطوط همتراز میدان سرعت (شکل ۷) نشان می‌دهد که میدان جریان در پایین‌دست فینلت‌های ریز شباهت زیادی به میدان جریان پشت پله رو به عقب دارد. با این حال، تفاوت‌های مهمی بین رفتار جریان در پایین‌دست فینلت‌های ریز و پله رو به عقب وجود دارد. همانطور که در شکل ۹ دیده می‌شود برای نمونه‌ی $s=2$ بر خلاف پله رو به عقب، یک جریان کم سرعت بلافاصله بعد از فینلت‌ها (در موقعیت $\bar{x}/h = 2.5$) وجود دارد. بنابراین می‌توان نمونه‌ی $s=2$ را به عنوان یک پله نفوذپذیر در نظر گرفته و جریان در پایین‌دست این نوع فینلت را ترکیبی از یک جریان خروجی کم سرعت (در $y/h < 1$) و یک جریان جدا شده (در $y/h \approx 1$) دانست.

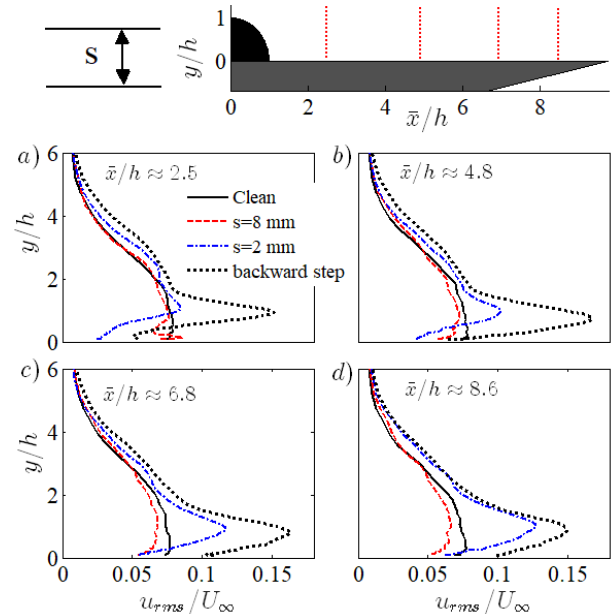
محتویات انرژی ساختارهای آشفته فرکانس پایین در فواصل عمودی نزدیک به سطح (تا حدود ۲ برابر ارتفاع فینلت‌ها) و در تمامی موقعیت‌های طولی ارائه شده در پایین دست فینلت‌ها شده است. این نتایج، تایید کننده مشاهدات قبلی (شکل ۱۰) است که نشان می‌داد شدت آشفته‌گی در تمامی موقعیت‌های طولی در پایین دست نمونه‌ی $s=8$ (در فواصل عمودی نزدیک سطح، تا حدود ۲ برابر ارتفاع فینلت‌ها) کاهش یافته است.



شکل ۱۱ - خطوط هم‌تراز تغییرات چگالی طیف توان سرعت نسبت به حالت مبنا (صفحه تخت بدون فینلت) در فرکانس‌های مختلف در پایین دست فینلت‌ها با فواصل عرضی درشت ($s=8$)



شکل ۱۲ - خطوط هم‌تراز تغییرات چگالی طیف توان سرعت نسبت به حالت مبنا (صفحه تخت بدون فینلت) در فرکانس‌های مختلف در پایین دست فینلت‌ها با فواصل عرضی ریز ($s=2$)



شکل ۱۰ - پروفیل شدت آشفته‌گی در موقعیت‌های طولی مختلف در پایین دست فینلت‌ها با فواصل عرضی مختلف، (a) $\bar{x}/h = 2.5$ ، (b) $\bar{x}/h = 4.8$ (c) $\bar{x}/h = 6.8$ (d) $\bar{x}/h = 8.6$

بررسی چگالی طیف توان سرعت در پایین دست فینلت‌ها

در ادامه، جهت بررسی تغییرات ایجاد شده در ساختارهای جریان لایه مرزی به واسطه حضور فینلت‌ها، محتویات انرژی ساختارهای آشفته لایه مرزی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، چگالی طیف توان سرعت در چندین موقعیت طولی مختلف ($\bar{x}/h = 2.5, 4.8, 6.8$ and 8.6) در پایین دست فینلت‌ها با فواصل عرضی مختلف در سرعت 20 m/s مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۱ تا ۱۳ به جای ارائه چگالی طیف توان سرعت، جهت مشاهده بهتر تغییرات ایجاد شده، اختلاف بین چگالی طیف توان سرعت در هنگام حضور فینلت‌ها و هنگام عدم حضور آن‌ها $(\Delta\Phi_{uu} = 10\log_{10}(\Phi_{uu,treated} / \Phi_{uu,clean}))$ بنابراین نواحی مثبت نشان‌دهنده افزایش چگالی طیف توان سرعت و نواحی منفی نشانگر کاهش آن در هنگام حضور فینلت‌ها است.

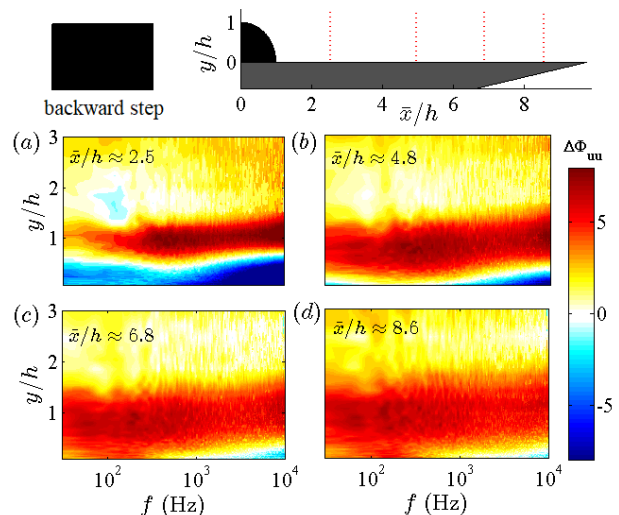
مطابق مشاهدات قبل، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فینلت‌ها با فواصل عرضی درشت ($s=8$) و ریز ($s=2$)، تاثیر متفاوتی روی محتویات انرژی ساختارهای لایه مرزی در پایین دست فینلت‌ها دارد. نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ به وضوح نشان می‌دهد که استفاده از نمونه‌ی $s=8$ ، منجر به کاهش

شده در شکل ۱۲ (a))، نشان می‌دهد که محتویات انرژی ساختارهای آشفته جریان در نواحی نزدیک به سطح ($y/h < 1$) در تمامی محدوده فرکانسی ارائه شده، کاهش قابل توجهی یافته است. میزان کاهش انرژی در این ناحیه نسبت به نمونه $s=8$ (شکل ۱۱ (a)) به مراتب بیشتر بوده و علت این امر علاوه بر انتقال انرژی به فواصل عمودی دورتر (بواسطه عبور بخش زیادی از جریان از روی فینلت‌ها)، می‌تواند به دلیل افزایش سطح خیس شده بین فینلت‌ها و در نتیجه افزایش استهلاک انرژی از طریق اصطکاک باشد.

همچنین استفاده از نمونه $s=2$ ، منجر به افزایش قابل توجه محتویات انرژی جریان در ناحیه $y/h \approx 1$ شده است، شکل ۱۲ (a). نتایج قبلی نشان داد که در این ناحیه، ماکزیمم گرادین سرعت (شکل ۹) و ماکزیمم شدت آشفتگی (شکل ۱۰)، بواسطه جدایش جریان و تشکیل لایه برشی رخ می‌دهد. با توجه به شکل ۱۲، با حرکت به سمت پایین دست جریان، لایه برشی قوی‌تر و عریض‌تر شده است (مانند رفتار جریان در پایین دست پله رو به عقب، شکل ۱۳). در نهایت، مشاهده می‌گردد کارایی فینلت‌های ریز در کاهش انرژی آشفته در محدوده لبه فرار مدل (یعنی $\bar{x}/h = 8.6$)، بیشتر به ساختارهای آشفته فرکانس بالای نزدیک سطح، محدود شده است.

بررسی نتایج اندازه‌گیری همزمان فشار ناپایای سطح و سرعت جریان

همانطور که قبلاً بیان شد، اندازه‌گیری همزمان نوسانات ناپایای سرعت و فشار سطح در پایین دست فینلت‌ها، اطلاعات جامع‌تری در رابطه با سهم ساختارهای آشفته مختلف در ایجاد نوسانات فشار سطحی در اختیار قرار خواهد داد. در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ خطوط همتراز همبستگی متقابل زمانی بین نوسانات فشار سطح، و نوسانات سرعت در راستای جریان، در چندین موقعیت طولی مختلف ($\bar{x}/h = 2.5, 4.8, 6.8$ and 8.6) برای حالت مبنا و همچنین در پایین دست فینلت‌های مختلف $s=0$ و $s=2$ ، $s=8$ **Error! Reference source not found.** ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۴، همبستگی متقابل بین سیگنال فشار و سرعت برای حالت مبنا به صورت دو ناحیه با همبستگی مثبت و منفی که تا موقعیت حدود $y/h \approx 3$



شکل ۱۳ - خطوط همتراز تغییرات چگالی طیف توان سرعت نسبت به حالت مبنا (صفحه تخت بدون فینلت) در فرکانس‌های مختلف در پایین دست پله رو به عقب

بعلاوه می‌توان مشاهده نمود که برای نمونه $s=8$ ، محتویات انرژی ساختارهای آشفته فرکانس بالا در نزدیکی سطح مدل در تمامی موقعیت‌های طولی به استثنای موقعیت $\bar{x}/h = 2.5$ ، کاهش پیدا کرده است. افزایش محتویات انرژی پیک مشاهده شده در پروفیل شدت آشفتگی در نواحی بسیار نزدیک به سطح در همین موقعیت طولی (شکل ۱۰) همخوانی داشته و ناشی از لایه برشی ایجاد شده توسط صفحه نازکی است که فینلت‌ها روی آن نصب شده‌اند (شکل ۴).

همچنین نتایج نشان می‌دهد که در پایین دست نمونه $s=8$ ، در موقعیت طولی $\bar{x}/h = 2.5$ و موقعیت عمودی $y/h \approx 1$ ، ساختارهای فرکانس بالا با محتویات انرژی بالا حضور دارند. با این حال، با حرکت به سمت پایین دست جریان، این ناحیه پر انرژی به تدریج از بین می‌رود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای نمونه $s=8$ ، اگرچه حضور فینلت‌ها باعث ایجاد یک لایه برشی بلافاصله بعد از فینلت شده اما، ضعیف بودن لایه برشی (بخاطر عبور بخش کمی از جریان از روی فینلت‌ها) و حضور یک جریان سرعت پایین در خروجی فینلت‌ها، مانع از ادغام شدن گردابه‌های کوچک و تشکیل ساختارهای آشفته همبسته بزرگ در پایین دست فینلت‌ها شده است.

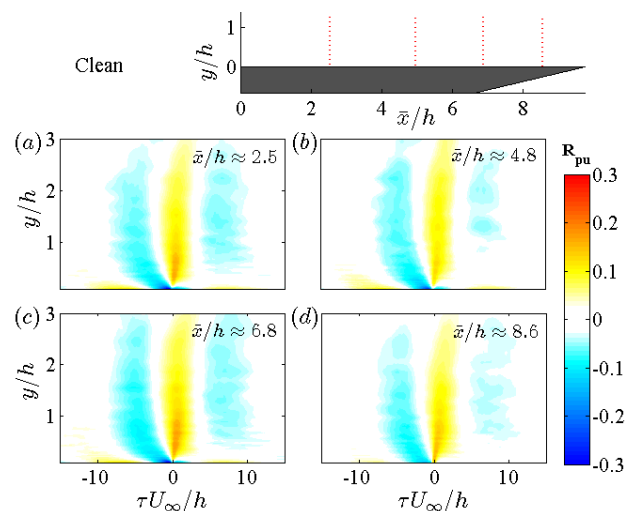
از طرف دیگر، نتایج اختلاف چگالی طیف توان سرعت در پایین دست نمونه $s=2$ در موقعیت طولی $\bar{x}/h = 2.5$ (ارائه

شکل ۱۵ - خطوط همتراز همبستگی متقابل زمانی بین نوسانات فشار سطح و نوسانات سرعت جریان (R_{pu})، در پایین دست فینلت‌ها با فواصل عرضی درشت ($s=8$)

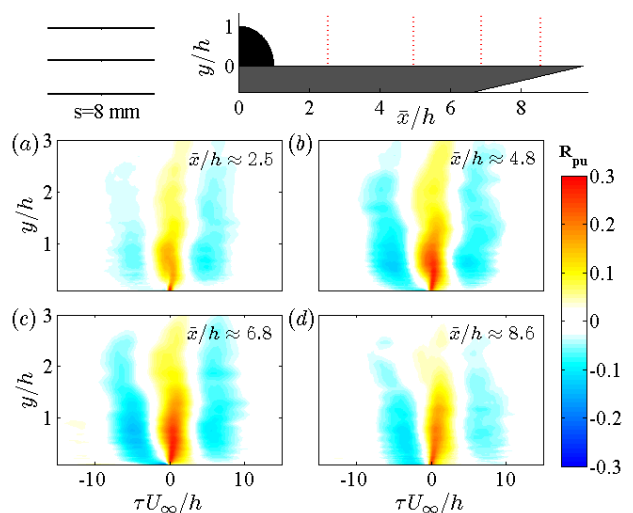
با توجه به شکل ۱۵، الگوی همبستگی متقابل در پایین دست نمونه‌ی $s=8$ مخصوصاً در فواصل عمودی دور از سطح، تا حدودی مشابه صفحه تخت است. مهمترین اثر فینلت‌های درشت ($s=8$)، افزایش اندازه همبستگی و ابعاد ناحیه همبستگی در نزدیکی سطح مدل ($y/h < 2$) است. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که اولاً استفاده از فینلت‌های درشت تنها منجر به تغییر مشخصات جریان در نواحی نزدیک سطح مدل (حداکثر تا ۲ برابر ارتفاع فینلت‌ها) شده و این نتیجه با نتایج سرعت متوسط و شدت آشفتگی (Error! Reference source not found. شکل‌های ۹ و ۱۰) و نتایج چگالی طیف توان سرعت (شکل ۱۱) در رابطه با حداکثر فاصله عمودی از سطح که تحت تاثیر حضور فینلت‌های درشت قرار می‌گیرد، همخوانی مناسبی دارد. ثانیاً نتایج نشانگر حضور ساختارهای آشفته بزرگتر با مقیاس‌های زمانی بزرگتر در پایین دست نمونه-ی $s=8$ است. این رفتار نیز همخوانی خوبی با نتایج مطالعات پیشین در رابطه با افزایش همدوسی عرضی و طول مشخصه در راستای دهانه صفحه تخت در هنگام حضور فینلت‌های درشت دارد [۱۷]. همچنین می‌توان مشاهده نمود که خطوط هم تراز همبستگی متقابل در پایین دست نمونه‌ی $s=8$ ، دارای الگوی تقریباً یکسانی در تمامی موقعیت‌های طولی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حرکت ساختارهای آشفته جریان از بین فینلت‌های درشت (و یا به عبارتی کانالیزه شدن جریان) منجر به ایجاد ساختارهای آشفته بزرگتری شده که تا فواصل طولی زیادی در پایین دست جریان، ساختار خود را حفظ می‌کنند.

برای نمونه‌ی $s=0$ ، مشاهده می‌گردد که در موقعیت طولی $\bar{x}/h = 2.5$ ، بیشترین سطح همبستگی در فواصل عمودی $y/h \approx 1$ (متناسب با ارتفاع فینلت) رخ داده است، شکل ۱۷ (a). با توجه به مطالعات پیشین [45, 46]، پیدایش نواحی مثبت و منفی با همبستگی بالا در موقعیت $y/h \approx 1$ ، نشان‌دهنده حضور ساختارهای گردابه‌ای بزرگ در پایین دست نمونه‌ی $s=0$ است. همانطوری که مشاهده می‌گردد، مقدار تاخیر زمانی بدون بعد ($\tau U_\infty/h$) بین دو ناحیه ماکزیمم و یا مینیمم (نشان داده شده در شکل ۱۷ (a))، حدود $\tau U_\infty/h = 12$ بوده که بیانگر دوره تناوب ریزش گردابه‌ها

(بیش از نیمی از ضخامت لایه مرزی) همبستگی خود را حفظ نموده‌اند، دیده می‌شود. این نشان‌دهنده حضور ساختارهای آشفته بزرگ در لایه مرزی آشفته است که همبستگی خود را تا فواصل زیادی از سطح حفظ می‌کنند. بعلاوه، بیشترین همبستگی، در تاخیر زمانی بدون بعد مثبت ($\tau U_\infty/h > 0$) رخ داده است. این بدان معناست که میدان سرعت نسبت به میدان فشار تاخیر دارد. بنابراین نوسانات فشار سطح، بیشترین همبستگی را با ساختارهای آشفته بالادست داشته و یا به عبارت دیگر، ساختارهای آشفته بالادست نقش مهم‌تری در ایجاد نوسانات فشار سطح دارند.



شکل ۱۴ - خطوط همتراز همبستگی متقابل زمانی بین نوسانات فشار سطح و نوسانات سرعت جریان (R_{pu})، در چندین موقعیت طولی مختلف ($\bar{x}/h = 2.5, 4.8, 6.8$ and 8.6) برای حالت مینا

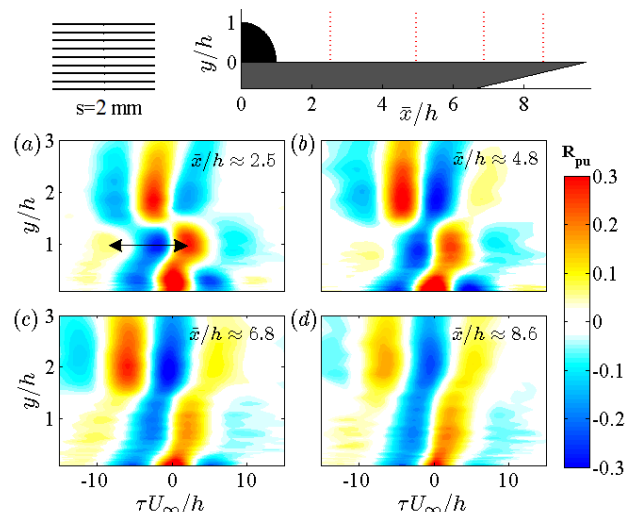


از طرف دیگر، الگوی جریان در پایین دست فینلت‌های ریز با توجه به حضور جریان کم سرعت خروجی در ناحیه دنباله فینلت‌ها و تداخل آن با جریان جدا شده از روی فینلت‌ها، به مراتب از الگوی جریان در پایین دست پله رو به عقب پیچیده‌تر است. با توجه به شکل ۱۶ (a)، برای نمونه‌ی $s=2$ در موقعیت طولی $\bar{x}/h=2.5$ ، سه ناحیه با همبستگی بالا در فواصل مختلف از سطح مدل دیده می‌شود. اولین ناحیه با همبستگی بالا در نواحی نزدیک به سطح مدل ($y/h < 1$) وجود دارد. با مقایسه دو شکل ۱۶ (a) و ۱۷ (a) می‌توان دریافت که میزان سطح همبستگی این ناحیه در هنگام استفاده از نمونه‌ی $s=0$ بسیار پایین بوده و نشان‌دهنده سهم جریان کم مومنتوم خروجی از بین فینلت‌ها در ایجاد نوسانات فشار سطح در پایین دست نمونه‌ی $s=2$ است. دومین ناحیه مربوط به نواحی مثبت و منفی با همبستگی بالا در موقعیت $y/h \approx 1$ بوده که مانند پله رو به عقب، نشان‌دهنده حضور ساختارهای گردابه‌ای بزرگ در پایین دست نمونه‌ی $s=2$ است. در نهایت، سومین ناحیه که در بالای لایه برشی تشکیل شده، بیانگر سهم جریان سرعت بالای دور از سطح، در ایجاد نوسانات فشار سطح است. همانطوری که در شکل‌های ۱۵ **Error! Reference source not found.**

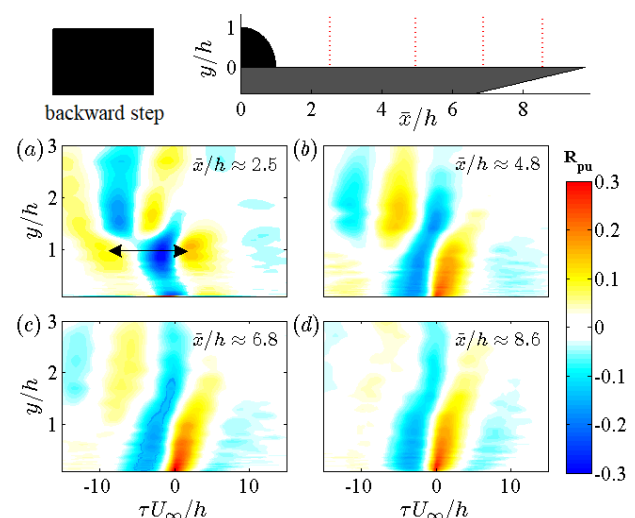
مشاهده می‌گردد، بر خلاف فینلت‌های درشت ($s=8$)، الگوی همبستگی متقابل برای فینلت‌های ریز ($s=2$) و پله رو به عقب ($s=0$)، تابعی از فاصله طولی موقعیت اندازه‌گیری فشار تا لبه فرار فینلت‌ها (\bar{x}/h) است به طوری که با حرکت به سمت پایین دست جریان، نواحی با همبستگی بالا، عریض‌تر شده که نشان‌دهنده حضور ساختارهایی با مقیاس زمانی بزرگتر و یا به عبارتی نشان‌دهنده رشد ساختارهای گردابه‌ای بزرگ است. بعلاوه، در حالی که تغییرات در الگوی همبستگی متقابل میدان فشار و سرعت، ناشی از حضور فینلت‌های درشت، تنها محدود به نواحی نزدیک سطح مدل (حداکثر تا ۲ برابر ارتفاع فینلت‌ها) می‌باشد، برای فینلت‌های ریز ($s=2$) و پله رو به عقب، به دلیل جدایش جریان، تشکیل لایه برشی و ظهور ساختارهای گردابه‌ای بزرگ، این تغییرات تا بیش از ۳ برابر ارتفاع فینلت‌ها (تقریباً بیشتر ضخامت لایه مرزی) ادامه دارد.

در نهایت، این مشاهدات، نتایج قبلی را تایید می‌کند که مهمترین مکانیزم موثر در تولید نوسانات فشار سطح برای فینلت‌های درشت، جریان کم مومنتوم خروجی از بین فینلت-

است. این مقدار متناظر با فرکانس 138 Hz است که تا حدود زیادی در توافق با فرکانس ماکزیمم طیف فشار سطح مشاهده شده در مرجع [۱۷]، یعنی 130 Hz ($fh/U_\infty = 0.078$) است. همچنین در موقعیت $y/h > 1$ ، نواحی مثبت و منفی با همبستگی نسبتاً بالا دیده می‌شود که با توجه به حضور آن‌ها در بالای لایه برشی، بیانگر سهم جریان سرعت بالای موجود در بالای ناحیه دنباله پله رو به عقب، در ایجاد نوسانات فشار سطح است [۴۷].

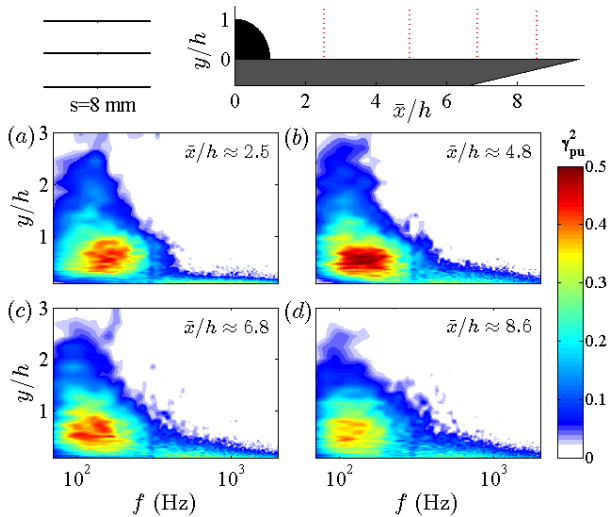


شکل ۱۶ - خطوط همتراز همبستگی متقابل زمانی بین نوسانات فشار سطح و نوسانات سرعت جریان (R_{pu})، در پایین دست فینلت‌ها با فواصل عرضی ریز ($s=2$)



شکل ۱۷ - خطوط همتراز همبستگی متقابل زمانی بین نوسانات فشار سطح و نوسانات سرعت جریان (R_{pu}) در پایین دست پله رو به عقب

شکل ۱۸ - خطوط همتراز تابع همدوسی بین نوسانات فشار سطح و نوسانات سرعت در راستای جریان (γ_{pu}^2) ، در چندین موقعیت طولی مختلف (برای $\bar{x}/h = 2.5, 4.8, 6.8$ and 8.6) در حالت مبنا



شکل ۱۹ - خطوط همتراز تابع همدوسی بین نوسانات فشار سطح و نوسانات سرعت در راستای جریان (γ_{pu}^2) ، در پایین دست فینلت‌ها با فواصل عرضی درشت ($s=8$)

با توجه به شکل ۱۹، به ازای استفاده از فینلت‌های درشت ($s=8$)، در حالی که میزان همدوسی بین سیگنال فشار و سرعت، γ_{pu}^2 ، در فواصل دور از سطح تغییر چندانی نداشته، در نواحی نزدیک سطح ($y/h < 1.5$) و در محدوده فرکانس‌های $80 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$ افزایش چشمگیری داشته است. این رفتار به همراه نتایج خطوط همتراز متقابل (شکل ۱۵)، نشان‌دهنده نقش فینلت‌های درشت در ایجاد یک ساختار آشفته با همبستگی بالا در پایین دست فینلت‌ها است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که این ساختارهای آشفته تشکیل شده، ساختار خود را تا فواصل زیادی بعد از فینلت‌ها حفظ می‌کند.

از طرف دیگر برای نمونه‌ی $s=2$ ، شکل ۲۰، مشابه نتایج

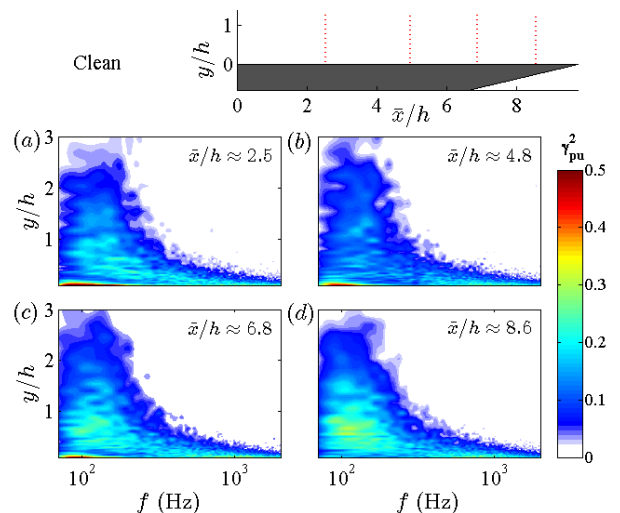
همبستگی متقابل (Error! Reference source not found. شکل ۱۶)، حضور فینلت‌های ریز، منجر به تقسیم لایه

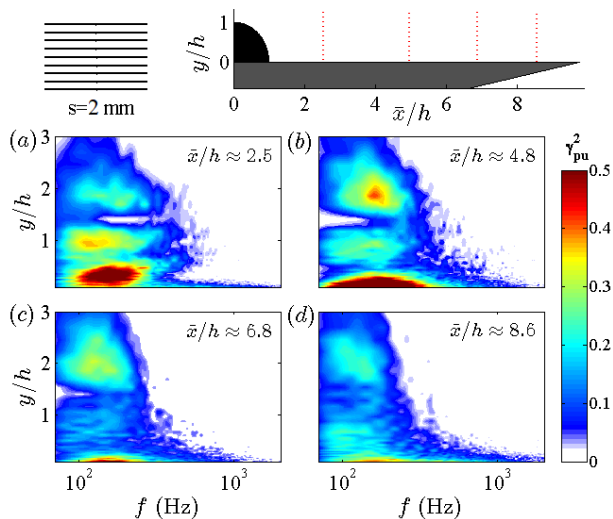
مرزی به سه ناحیه (در موقعیت طولی $\bar{x}/h = 2.5$) در راستای عمود به دیوار شده است. در نواحی نزدیک به سطح ($0 < y/h < 0.6$)، تابع همدوسی در فرکانس‌های پایین نسبت به حالت مبنا و حتی فینلت‌های درشت ($s=8$)، افزایش یافته است. همانطوری که درباره همبستگی متقابل هم بیان شد، این ناحیه در پایین دست پله رو به عقب وجود نداشته و

هاست. این در حالی است که برای فینلت‌ها با فواصل عرضی ریز، ساختارهای گردابه‌ای تشکیل شده بواسطه جدایش جریان سهم موثری بر نوسانات فشار سطح در پایین دست فینلت‌ها دارد.

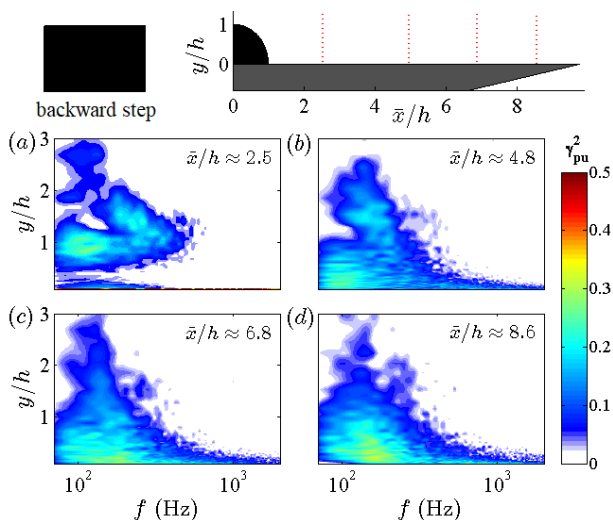
همانطوری که قبلا بیان شد، چگالی طیفی متقابل از طریق تبدیل فوریه همبستگی متقابل، R_{pu} ، بدست آمده و اطلاعات خوبی در رابطه با فرکانس پدیده‌های جریان که مسئول تولید فشار سطح هستند فراهم می‌نماید. بنابراین در مطالعه حاضر برای تعیین میزان تاثیر رفتارهای ناپایای مختلف در لایه مرزی بر میدان فشار القا شده روی سطح در حوزه فرکانس، تابع همدوسی بین نوسانات فشار سطح و میدان سرعت (γ_{pu}^2) با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شده است.

در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱، خطوط همتراز همدوسی بین نوسانات فشار سطح، p' ، و نوسانات سرعت در راستای جریان، u' ، در چندین موقعیت طولی مختلف ($\bar{x}/h = 2.5, 4.8, 6.8$ and 8.6) در پایین دست فینلت‌های مختلف ($s=0, s=2, s=8$) ارائه شده است. همانطوری که دیده می‌شود برای حالت مبنا، شکل ۱۸، همدوسی بین فشار و سرعت، با افزایش فاصله از سطح مدل (y/h) و افزایش فرکانس، در تمامی موقعیت‌های طولی کاهش یافته است. بعلاوه، در موقعیت طولی $\bar{x}/h = 8.6$ یک پیک پهن باند در موقعیت عمودی $y/h \approx 0.6$ ($y^+ = 375$) در فرکانس حدود $f \approx 120 \text{ Hz}$ دیده می‌شود که با فرکانس ماکزیمم طیف فشار سطح برای صفحه تخت یعنی 124 Hz (ارائه شده در مرجع [۱۷]) همخوانی خوبی دارد.





شکل ۲۰ - خطوط همتراز تابع همدوسی بین نوسانات فشار سطح و نوسانات سرعت در راستای جریان (γ_{pu}^2)، در پایین دست فینلت‌ها با فواصل عرضی ریز ($s=2$)



شکل ۲۱ - خطوط همتراز تابع همدوسی بین نوسانات فشار سطح و نوسانات سرعت در راستای جریان (γ_{pu}^2)، در پایین دست پله رو به عقب

از طرف دیگر، الگوی جریان مشاهده شده در پایین دست نمونه‌ی $s=2$ و $s=8$ ، پیشنهاد می‌دهد که طول عمر ساختارهای آشفته تشکیل شده بواسطه تداخل لایه مرزی با فینلت‌های ریز ($s=2$)، در مقایسه با نمونه‌ی درشت ($s=8$) کمتر بوده به طوری که ماهیت این ساختارها با حرکت به سمت پایین دست تغییر می‌کند. در نهایت، نکته قابل توجه دیگر اینکه استفاده از فینلت ریز ($s=2$)، منجر به کاهش همدوسی فشار و سرعت (نسبت به حالت مینا، شکل ۱۸) در

بیانگر سهم جریان کم مومنتوم خروجی از بین فینلت‌ها در ایجاد نوسانات فشار سطح است. همچنین می‌توان مشاهده نمود که این ناحیه با حرکت به سمت پایین دست جریان، در راستای فرکانس عریض‌تر شده و به سطح مدل نزدیک‌تر شده است. دومین ناحیه با همدوسی بالا در موقعیت عمودی $y/h \approx 1$ رخ داده و با توجه به حضور این ناحیه در پایین دست نمونه‌ی $s=0$ (Error! Reference source not found. شکل ۲۱)، علت آن پدیده شبه-پریودیک^{۲۳} ریزش گردابه‌ها از لبه بالایی فینلت‌هاست. ماکزیمم همدوسی، γ_{pu}^2 ، در این ناحیه در محدوده فرکانسی $f = 100-150 \text{ Hz}$ رخ داده که متناسب با نتایج مرجع [۱۷] در رابطه با فرکانس ماکزیمم طیف فشار سطح و ماکزیمم همدوسی عرضی است. این نتایج، تایید کننده‌ی این فرضیه است که برای فینلت‌های ریز، ساختارهای آشفته فرکانس پایین بزرگ با ابعادی متناسب با ارتفاع فینلت‌ها، منبع مهمی برای ایجاد نوسانات فشار سطح هستند. در نهایت، در نقاط خیلی دورتر از سطح ($y/h \approx 2$)، ناحیه سوم با همدوسی بالا وجود دارد. این ناحیه که در خطوط همتراز همبستگی متقابل (شکل ۱۶) به صورت نواحی مثبت و منفی با همبستگی نسبتاً بالا دیده شد، بیانگر سهم نسبتاً زیاد جریان واقع در بالای لایه برشی، در ایجاد نوسانات فشار سطح است. نکته قابل توجه دیگر، پررنگ‌تر بودن سهم این ناحیه برای نمونه‌ی $s=2$ نسبت به پله رو به عقب است. دلیل این امر در نمونه‌ی $s=2$ می‌تواند به خاطر وجود جریان خروجی کم سرعت در نزدیکی سطح و عدم امکان نزدیک شدن جریان واقع در بالای لایه برشی به سطح مدل تا موقعیت طولی $\bar{x}/h = 8.6$ باشد.

نتایج نشان داد که در حالی که مهمترین مکانیزم موثر بر نوسانات فشار سطح برای فینلت‌های درشت، جریان کم مومنتوم خروجی از بین فینلت‌هاست، برای فینلت‌های ریز، ساختارهای گردابه‌ای تشکیل شده بواسطه جدایش جریان سهم موثری بر نوسانات فشار سطح در پایین دست فینلت‌ها دارد.

پی‌نوشت‌ها

- ۱ Stall
- ۲ Blunt trailing edge
- ۳ Eddy
- ۴ Passive
- ۵ Trailing edge serrations
- ۶ Trailing edge brushes
- ۷ Porous trailing edge
- ۸ Airfoil shape optimization
- ۹ Finlet
- ۱۰ Marine Rotor
- ۱۱ Spanwise length scale
- ۱۲ Eddy convection velocity
- ۱۳ Power spectral density
- ۱۴ Cross correlation
- ۱۵ Coherence function
- ۱۶ Sensing area
- ۱۷ Pin-hole mask
- ۱۸ Attenuation effects
- ۱۹ Auto-spectral density
- ۲۰ Cross-spectral density
- ۲۱ Coanda effect
- ۲۲ Recirculation
- ۲۳ Quasi-periodic

منابع و مراجع

- [۱] T. F. Brooks, D. S. Pope and M. A. Marcolini, "Airfoil self-noise and prediction," *National Aeronautics and Space Administration, Office of Management, Scientific and Technical Information Division*, 1989.
- [۲] S. Oerlemans, M. Fisher, T. Maeder and K. Kögler, "Reduction of wind turbine noise using optimized airfoils and trailing-edge serrations," *AIAA Journal*, vol. 47, no. 6, 1470-148, 2009.
- [۳] W. K. Blake, "Mechanics of flow-induced sound and vibration V2: Complex flow-structure interactions, 2nd edn ed.," Academic Press, 2017.
- [۴] A. Powell, "On the aerodynamic noise of a rigid flat plate moving at zero incidence," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 31, no. 12, 1649-1653, 1959.
- [۵] M. V. M. Fink, "Experimental evaluation of theories for trailing edge and incidence fluctuation

فرکانس‌های میانی و بالا شده که همخوانی مناسبی با نتایج [۱۷] در رابطه با همدوسی عرضی نوسانات فشار دارد.

نتیجه‌گیری

نوفه لبه‌فرار لایه مرزی آشفته یکی از منابع اصلی نوفه آیرودینامیکی بوده و در دهه‌های گذشته مطالعات گسترده‌ای روی آن انجام گرفته است. از میان روش‌های غیرفعال مختلفی که برای کاهش نوفه لبه‌فرار پیشنهاد شده، جدیدترین روش، استفاده از فینلت‌های کاهش‌دهنده نوفه است. در مطالعه حاضر، به منظور بررسی نحوه تاثیر فینلت‌های کاهش‌دهنده نوفه بر میدان جریان آشفته در محدوده لبه فرار مدل، یک صفحه تخت مجهز به سنسورهای اندازه‌گیری فشار ناپایای سطح، طراحی و ساخته شده است. همچنین جهت مطالعه ساختار جریان لایه مرزی در پایین دست فینلت‌ها، از جریان-سنج سیم داغ یک بعدی استفاده شده است. بررسی‌های انجام شده شامل بررسی مقادیر سرعت متوسط، شدت آشفتگی و تغییرات چگالی طیف توان سرعت در پایین دست فینلت‌ها است. همچنین، به منظور دستیابی به درک روشن‌تری از نحوه تاثیرگذاری فینلت‌ها روی ساختار جریان لایه مرزی، با استفاده از داده‌برداری همزمان نوسانات سرعت و فشار سطح در نقاط مختلف لایه مرزی، رفتار همبستگی متقابل و تابع همدوسی بین نوسانات فشار سطح و میدان سرعت مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج نشان داد که پروفیل سرعت متوسط و شدت توربولانس در پایین دست تمامی فینلت‌ها در نزدیکی سطح مدل، کاهش قابل توجهی یافته است. با این وجود، با کاهش فاصله عرضی بین فینلت‌ها در نمونه $s=2$ ، شدت توربولانس در $y/h \approx 1$ ، به خاطر آشفتگی ایجاد شده بواسطه لایه برشی افزایش یافته است. بعلاوه، نتایج چگالی طیف توان سرعت نشان داد که برای فینلت‌های ریز، جدایش جریان در پشت فینلت‌ها و ظهور یک ناحیه با محتویات انرژی بالا در محدوده $0.5 < y/h < 2$ ، مسئول افزایش نامطلوب انرژی در فرکانس‌های پایین و کاهش کارایی فینلت‌ها در فرکانس‌های بالاست. نتایج همبستگی متقابل و تابع همدوسی بین نوسانات فشار سطح و میدان سرعت نیز پیشنهاد داد که طول عمر ساختارهای توربولانسی تشکیل شده در پایین دست فینلت‌های ریز، در مقایسه با فینلت‌های درشت کمتر است. همچنین،

- performance of trailing edge noise-reducing finlets," vol. 53, no. 9, 2021.
- [۱۸] A. Afshari, A. A. Dehghan, M. Azarpeyvand and M. Szöke, "Three-dimensional surface treatments for trailing edge noise reduction," in: *23rd International Congress on Sound and Vibration, ICSV*, 2016.
- [۱۹] I. Clark, W. N. Alexander and W. J. Devenport, "Bio-inspired finlets for the reduction of marine rotor noise," in: *23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2017, pp. 3867.
- [۲۰] Y. Shi and S. Lee, "Numerical study of 2-D finlets using RANS CFD for trailing edge noise reduction," in: *2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2018, pp. 2812.
- [۲۱] A. Bodling and A. Sharma, "Numerical investigation of low-noise airfoils inspired by the down coat of owls," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 14, no. 1, 016013, 2018.
- [۲۲] A. Bodling and A. Sharma, "Numerical investigation of noise reduction mechanisms in a bio-inspired airfoil," *Journal of Sound and Vibration*, 2019.
- [۲۳] M. Mosallem, "Numerical and experimental investigation of beveled trailing edge flow fields," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 20, no. 3, 273-279, (2008).
- [۲۴] J. B. Barlow, W. Rae and A. Pope, "Low-speed wind tunnel testing," *John Wiley & Sons*, in, Wiley, New York, 1999.
- [۲۵] A. Afshari, A. A. Dehghan, V. Kalantar and M. Farmani, "Experimental investigation of surface pressure spectra beneath turbulent boundary layer over a flat plate with microphone," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 263-272, 2017
- [۲۶] A. Afshari, A. A. Dehghan and M. Farmani, "Experimental investigation of trailing edge noise by measuring unsteady surface pressures," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 6, pp. 61-70, 2017.
- [۲۷] G. Corcos, "Resolution of pressure in turbulence," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 35, no. 2, 192-199, 1963.
- [۲۸] G. Schewe, "On the structure and resolution of wall-pressure fluctuations associated with turbulent boundary-layer flow," *Journal of Fluid Mechanics*, 134 311-328, 1983.
- [۲۹] M. Goody, "Empirical spectral model of surface pressure fluctuations," *AIAA Journal*, 42(9) 1788-1794, 2004.
- noise," *AIAA Journal*, vol. 13, no. 11, 1472-1477, 1975.
- [۶] J. Yu and C. W. Tam, "Experimental investigation of the trailing edge noise mechanism," *AIAA Journal*, vol. 16, no. 10, 1046-1052, 1978.
- [۷] M. Roger and S. Moreau, "Trailing edge noise measurements and prediction for subsonic loaded fan blades," *AIAA Paper*, p. 246, 2002.
- [۸] B. Lyu, M. Azarpeyvand and S. Sinayoko, "Prediction of noise from serrated trailing edges," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 793, pp. 556-588, 2016.
- [۹] M. Herr and W. Dobrzynski, "Experimental investigations in low-noise trailing edge design," *AIAA Journal*, vol. 43, no. 6, pp. 1167-1175, 2005.
- [۱۰] A. Finez, E. Jondeau, M. Roger and M. C. Jacob, "Broadband noise reduction with trailing edge brushes," in: *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Stockholm, Sweden, 2010, pp. 3980.
- [۱۱] T. Geyer, E. Sarradj and C. Fritzsche, "Measurement of the noise generation at the trailing edge of porous airfoils," *Experiments in Fluids*, vol. 48, no. 2, 291-308.
- [۱۲] 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*, 850, pp. 83-119, 2018.
- [۱۳] T. Göçmen and B. Özerdem, "Airfoil optimization for noise emission problem and aerodynamic performance criterion on small scale wind turbines," *Energy*, vol. 46, no. 1, 62-71, 2012.
- [۱۴] R. Jones, C. J. Doolan and M. Teubner, "Minimization of trailing edge noise by parametric airfoil shape modifications," in: *17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (32nd AIAA Aeroacoustics Conference)*, pp. 2782, 2011.
- [۱۵] I. A. Clark, W. N. Alexander, W. Devenport, S. Glegg, J. W. Jaworski, C. Daly and N. Peake, "Bioinspired trailing-edge noise control," *AIAA Journal*, vol. 55, no. 3, pp. 740-754, 2017.
- [۱۶] A. Afshari, A. A. Dehghan, M. Dehghani Mohammad-abadi and M. Dehghan Manshadi, "Semi-empirical Investigation of the effect of finlet on the turbulent boundary layer trailing edge noise," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 8, pp. 1951-1965, 2020.
- [۱۷] A. Afshari, A. A. Dehghan and A. J. A. J. O. M. E. Ayoobi, "Experimental investigation of the

Department of Mechanical Engineering, in, Stanford University, 1978.

[۴۶] M. Cassiani, G. Katul and J. Albertson, "The effects of canopy leaf area index on airflow across forest edges: large-eddy simulation and analytical results," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 126, no. 3, pp. 433-460, 2008.

[۴۷] C. Markfort, F. Porté-Agel and H. Stefan, "Canopy-wake dynamics and wind sheltering effects on Earth surface fluxes," *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 14, no. 3, pp. 663-697, 2014.

[۴۸] Y. Z. Liu, F. Ke, H. P. Chen and H. J. Sung, "A wall-bounded turbulent mixing layer flow over an open step: I. Time-mean and spectral characteristics," *Journal of Turbulence*, vol. 7, no. 65, 2006.

[۴۹] M. Kiya and K. Sasaki, "Structure of a turbulent separation bubble," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 137, pp. 83-113, 1983.

[۵۰] N. Cherry, R. Hillier and M. Latour, "Unsteady measurements in a separated and reattaching flow," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 144, pp. 13-46, 1984.

[۵۱] I. Lee, H. J. Sung, "Multiple-arrayed pressure measurement for investigation of the unsteady flow structure of a reattaching shear layer," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 463, pp. 377-402, 2002.

[۳۰] R. Maryami, S. A. Showkat Ali, M. Azarpeyvand and A. Afshari, "Turbulent flow interaction with a circular cylinder," *Physics of Fluids*, vol. 32, no. 1, 015105, 2020.

[۳۱] Q. Leclère, A. Pereira, A. Finez and P. Souchotte, "Indirect calibration of a large microphone array for in-duct acoustic measurements," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 365, pp. 48-59, 2016.

[۳۲] R. Maryami, M. Azarpeyvand, A. Dehghan and A. Afshari, "An experimental investigation of the surface pressure fluctuations for round cylinders," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 141, no. 6, 061203, 2019.

[۳۳] R. Maryami, A. A. Dehghan and A. J. A. J. O. M. E. Afshari, "Experimental investigation of the turbulence effect of incoming flow on the unsteady pressure field and the flow noise around circular cylinder", vol. 52, no. 4, 923-942, 2018.

[۳۴] A. Afshari, A. A. Dehghan, V. Kalantar and M. Farmani, "Analytical and experimental investigation of remote microphone system response for prediction of surface pressure fluctuations", *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 10, 155-162, 2016.

[۳۵] J. S. Bendat, A. G. Piersol, "Random data: analysis and measurement procedures," *John Wiley & Sons*, 2011.

[۳۶] S. Yavuzkurt, "A guide to uncertainty analysis of hot-wire data, ASME, Transactions," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 106 (1984), pp. 181-186, 1084.

[۳۷] F. E. Jørgensen, "How to measure turbulence with hot-wire anemometers: a practical guide, Dantec dynamics," 2001.

[۳۸] A. Saeidinezhad, A. A. Dehghan and M. Dehghan Manshadi, "The nose shape effect on the flow field around a submersible model," *Phd Thesis, Yazd University*, 2015.

[۳۹] P. Bradshaw and F. Wong, "The reattachment and relaxation of a turbulent shear layer," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 52, no. 1, pp. 113-135, 1972.

[۴۰] D. Etheridge and P. Kemp, "Measurements of turbulent flow downstream of a rearward-facing step," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 86, no. 345-566, 1978.

[۴۱] J. Kim, S. Kline and J. Johnston, "Investigation of separation and reattachment of a turbulent shear layer: flow over a backwardfacing step," *Report MD-37, thermosciences Division*,