

بررسی عددی تاثیر فینلتهای مستطیل شکل بر نویز لبه فرار صفحه تخت در جریان لایه مرزی آشفته

محمد فرمانی^{*}، علی اکبر دهقان^۲، میلاد ذبیحی نژاد^۱

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

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

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۹)

چکیده

در این پژوهش، اثر فینلتهای مستطیل شکل بر نویز لبه فرار یک صفحه تخت در جریان لایه مرزی آشفته تراکم ناپذیر با عدد ماخ ۰/۰۶ به صورت عددی مطالعه شده است. فینلتهای در بالادست لبه فرار صفحه تخت و با دو فاصله عرضی ۱/۵ و ۰/۹ میلیمتر مدل شده‌اند. برای شبیه‌سازی عددی جریان لایه مرزی آشفته روی صفحه تخت از رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ با مدل آشفته‌ساز جریان ورودی لاند در کد متن‌باز اوپن‌فوم استفاده شده است. ابزار کاوشگر برای داده‌برداری از میدان فشار و سرعت استفاده شده است. کاربرد فینلتهای سبب افزایش چگالی طیفی نوسانات فشار در بازه فرکانسی پایین تا میانی و کاهش آن در فرکانس‌های بالا در موقعیت‌های بین و پایین‌دست فینلتهای شده است. همچنین طول مشخصه عرضی نوسانات فشار افزایش و سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای در محدوده لبه‌فرار صفحه تخت کاهش یافته و کاهش فاصله عرضی فینلتهای سبب تشدید اثر آنها شده است. فینلتهای سبب کاهش سرعت متوسط و افزایش شدت آشفتگی در محدوده پایین‌دست جریان شده و کاهش فاصله عرضی فینلتهای سبب تشکیل یک لایه برشی قویتر بر روی آنها و گسترش محدوده پناهگاه برشی در پایین‌دست فینلتهای شده است. با توجه به نتایج پیش‌بینی نویز دور‌دست با آنالوژی کرل، فینلتهای با فاصله عرضی ۱/۵ میلیمتر سبب کاهش اندک نویز تا حدود ۰/۳ دسی‌بل و فینلتهای با فاصله عرضی ۰/۹ میلیمتر سبب افزایش نویز تا حدود ۱ دسی‌بل در محدوده لبه فرار صفحه تخت شده است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی عددی، فینلت، نویز لبه فرار، لایه مرزی آشفته، صفحه تخت

Numerical study of the effect of rectangular finlets on the turbulent boundary layer trailing edge noise of a flat edge

Mohammad Farmani, Ali Akbar Dehghan and Milad Zabihinejad

Abstract

In this study, the effect of rectangular finlets on the trailing edge noise of a flat plate in an incompressible turbulent boundary layer with Mach number 0.06 has been studied numerically. The finlets are modeled upstream of the trailing edge of the flat plate with two spanwise spacing of 1.5 and 0.9 mm. Large-eddy simulation (LES) approach with Lund inflow generation model in open-source code of OpenFOAM has been used to simulate the turbulent boundary layer flow. Probe utility has been used for pressure and velocity data acquisitions. The finlets have increased the PSD of pressure fluctuations in the low to mid frequencies and decreased it at high frequencies between and downstream of the finlets. Also, the spanwise length scale of the pressure fluctuations increases, but the eddy convection velocity is reduced and their effects have been intensified by the reduction of the spanwise spacing. The mean velocity decreases, but the turbulence intensity increases downstream of the finlets. The reduction of the spanwise spacing of the finlets results in the formation of a stronger shear layer and the extension of the shear sheltering area downstream of the finlets. According to the results of the far-field noise prediction with Curle analogy, finlets with the spacing of 1.5 mm have slightly reduced the noise about 0.3 dB but the finlets with the spacing of 0.9 mm have increased the trailing edge noise of the flat plate about 1.0 dB.

Key words: *Simulation, Finlet, Trailing edge noise, Turbulent boundary layer, Flat plate*

مقدمه

در سال‌های اخیر، بنا به دلایل نظامی و زیست محیطی توجه به موضوع آلودگی صوتی در دنیا بسیار افزایش یافته است. آلودگی صوتی می‌تواند ناشی از مکانیزم‌های متعددی باشد که نویز آیرودینامیکی از جمله این مکانیزم‌هاست. نویز پهن‌بند لبه‌فرار ایرفویل لایه مرزی آشفته یکی از مهمترین شکل‌های نویز آیرودینامیکی است که برای ساکنین همجوار با فرودگاهها آزاردهنده است. مدل‌سازی فیزیک و ساختارهای مرتبط با ایجاد و انتشار نویز لبه‌فرار لایه مرزی آشفته به سبب گسترده وسیع حوزه فرکانسی، از اهمیت بسیار ویژه‌ای در طراحی و ساخت تجهیزات مدرن با حداقل نویز برخوردار است. حضور ساختارهای گردابه‌ای با اندازه‌های مختلف در لایه مرزی آشفته سبب شکل‌گیری حوزه وسیع فرکانسی در نویز لبه‌فرار لایه مرزی آشفته و پهن‌بند بودن این نوع نویز است [۱-۳].

توجه ویژه‌ای که به طراحی و ساخت تجهیزات مدرن با حداقل نویز معطوف شده، منشاء پیدایش تحقیقات گسترده در زمینه روشهای کنترل نویز است. در بین تمام روش‌های کنترل نویز لبه‌فرار لایه مرزی آشفته، استفاده از فینلت‌ها روشی نوین است که از سال ۲۰۱۷ مورد مطالعه قرار گرفته است [۴].

کلارک و همکارانش در سال ۲۰۱۷، با الهام از پیکربندی بال جغد، فینلت‌هایی را طراحی کرده‌اند. آن‌ها با مطالعه تجربی نشان داده‌اند که استفاده از فینلت‌ها نویز لبه‌فرار ایرفویل DU96-W180 را تا ۱۰ دسی‌بل کاهش می‌دهد. همچنین اگر فاصله بین فینلت‌ها کاهش یابد کارایی آن‌ها افزایش می‌یابد، اما اگر فاصله بین فینلت‌ها خیلی کم شود، اثرات نامطلوبی در بازه فرکانس پایین بوجود آمده و سبب افزایش سطح نویز لبه‌فرار می‌گردد [۴].

افشاری و همکاران [۵-۷]، با توجه به مدل تحلیلی راجر-امیت [۱]، اثر فینلت‌ها بر پارامترهای اصلی موثر بر نویز لبه‌فرار در میدان نزدیک به سطح صفحه تخت را به صورتی تجربی مطالعه کرده‌اند. با توجه به مدل تحلیلی راجر-امیت [۱]، پارامترهای اصلی موثر بر نویز لبه‌فرار در میدان نزدیک شامل چگالی طیفی و طول مشخصه عرضی نوسانات فشار سطح و سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای در محدوده لبه‌فرار هستند. نتایج این مطالعه تجربی نشان داد که استفاده از فینلت‌ها در بالادست لبه‌فرار صفحه تخت منجر به کاهش نویز لبه‌فرار در بازه فرکانس میانی تا بالا می‌شود. همچنین علت

اصلی کاهش نویز لبه‌فرار تحت اثر فینلت‌های با فاصله عرضی درشت، کانالیزه شدن بخش زیادی از جریان لایه مرزی است. این در حالیست که کاهش فاصله عرضی فینلت‌ها سبب شکل‌گیری لایه برشی با محتوای انرژی بالا شده و علیرغم اینکه در بازه فرکانسی میانی تا بالا کاهش نویز بیشتر شده اما در بازه فرکانسی پایین تا میانی سطح نویز به‌صورت نامطلوبی افزایش یافته است.

بادلینگ و شارما [۸، ۹]، بر مبنای مدل تجربی کلارک و همکاران [۴]، اثر فینلت‌های نصب شده در لبه‌فرار بر نویز لبه‌فرار لایه مرزی آشفته ایرفویل NACA0012 را به‌صورت عددی مطالعه کرده‌اند. نتایج این مطالعه عددی نشان داده که استفاده از فینلت‌ها در لبه‌فرار سبب شده تا ساختارهای گردابه‌ای بزرگ و همدوس از سطح لبه‌فرار دور شوند و از این طریق نوسانات فشار سطح در محدوده لبه‌فرار کاهش یافته است. بنابراین علت اصلی کاهش نویز لبه‌فرار حذف ساختارهای گردابه‌ای از لبه‌فرار عنوان شده است.

شی و لی [۱۰، ۱۱]، با الگوبری از مطالعه تجربی کلارک و همکاران [۴] و مطالعات عددی بادلینگ و شارما [۸، ۹]، اثر فینلت‌های قرار گرفته در لبه‌فرار ایرفویل NACA0012 در جریان با سرعت بالا و زوایای حمله مختلف را به‌صورت عددی مطالعه کرده‌اند. نتایج این مطالعات عددی نشان داد که استفاده از فینلت‌ها در محدوده نزدیک به لبه‌فرار و روی لبه‌فرار منجر به کاهش سطح نویز لبه‌فرار شده است. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که فینلت‌های لبه‌فرار در سطح بالایی ایرفویل باعث کاهش نویز دوردست در کل بازه فرکانسی شده و فینلت‌های در سطح پایینی ایرفویل باعث کاهش نویز دوردست در بازه فرکانسی میانی تا بالا می‌شود. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که در نزدیکی سطح ایرفویل، سرعت متوسط و شدت آشفتگی جریان کاهش می‌یابد. فرضیات در نظر گرفته شده در پیش‌بینی سطح نویز شامل معادلات سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای و یا محاسبه غیرمستقیم طول مشخصه عرضی نوسانات فشار و عدم داده‌برداری از میدان سرعت و فشار سبب شده تا نتایج صرفاً به لحاظ روند تغییرات و نه اندازه و مقادیر حل قابل استناد باشد.

محدودیت‌های ذاتی مرتبط با مطالعات تجربی سبب شده تا بررسی برخی از پارامترهای جریان لایه مرزی و پارامترهای اصلی موثر بر نویز متاثر از فینلت‌ها مغفول بماند. از اینرو

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ به همراه مدل زیرشبکه‌ای اسماکورینسکی دینامیکی [۱۳]، برای جریان تراکم‌ناپذیر و معادلات مربوط به مدل مرز مرزی لاند [۱۴]، در این بخش ارائه شده است.

معادلات حاکم بر رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

معادلات حاکم بر جریان تراکم‌ناپذیر با توجه به روابط (۱) و (۲) قابل بیان است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j + p \delta_{ij} + 2\mu S_{ij}) = 0 \quad (2)$$

رابطه (۱) معادله بقای جرم و رابطه (۲) معادله مومنتم است که در این معادلات، $(u_i (m/s))$ نشان دهنده بردار سرعت، $(p (pa))$ بیانگر میدان فشار و (S_{ij}) بخش متقارن تانسور نرخ کرنش است [۱۳].

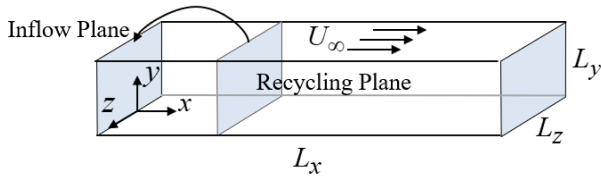
ایده اصلی در حل معادلات جریان با رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ، کاهش هزینه‌های محاسباتی با استفاده از فیلتر پایین‌گذر $G = G(x, \Delta)$ است که $\Delta (m)$ طول قطع‌کننده فیلتر بوده و مقیاس‌های کوچکتر از این طول در محاسبه متغیر عمومی مثل ϕ در نظر گرفته نمی‌شود. اگر ϕ' و $\bar{\phi}$ به ترتیب نشان دهنده مقیاس‌های کوچک و مقیاس‌های فیلتر شده یک متغیر عمومی باشند، با همگشت فیلتر پایین‌گذر G در معادلات (۱) و (۲)، معادلات فیلتر شده رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ برای جریان تراکم‌ناپذیر بدست می‌آیند:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}^r}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (4)$$

شبیه‌سازی‌ها و مطالعات عددی بستر مناسبی برای رفع محدودیت مطالعات تجربی است. از طرفی مطالعات عددی محدود انجام شده در زمینه اثر فینلت‌ها بر نویز لبه فرار لایه مرزی آشفته صرفاً به بررسی اثر فینلت‌ها بر جریان روی لبه‌فرار ایرفویل محدود شده و نتایج بدست آمده متأثر از وجود گرادیان فشار اطراف ایرفویل و پیچیدگی‌های مرتبط با آن، نیز هست.

در نهایت گسترش مطالعات محدود تجربی و عددی انجام شده در زمینه کارایی فینلت‌ها در کنترل نویز لبه فرار باعث می‌شود تا درک دقیق‌تری از مکانیزم تغییر نویز ناشی از کاربرد فینلت‌ها به‌وجود آید. از اینرو و در ادامه تحقیقات پیشین، تحقیق حاضر به مطالعه عددی اثر فاصله عرضی فینلت‌های مستطیل‌شکل بالادست لبه فرار بر نویز لبه فرار لایه مرزی آشفته صفحه تخت اختصاص یافته است. در این مطالعه برای شبیه‌سازی عددی جریان لایه مرزی آشفته تراکم‌ناپذیر از رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ در کد متن‌باز اوپن‌فوم استفاده شده است. در تحقیق انجام شده، از شرط مرزی لاند در ورودی میدان حل برای توسعه جریان لایه مرزی آشفته استاندارد در طول صفحه تخت استفاده شده است. استفاده از این شرط مرزی سبب کاهش وسعت میدان حل و در نتیجه هزینه و امکانات محاسباتی استفاده شده است. اثر فاصله عرضی فینلت‌ها با محاسبه تغییرات سرعت متوسط و شدت آشفتگی جریان و همچنین تغییرات ضریب فشار استاتیکی، چگالی طیفی توان و طول مشخصه عرضی نوسانات فشار سطح، سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای و نحوه تغییر نویز لبه فرار لایه مرزی آشفته در دوردست در موقعیت‌های مختلف طولی صفحه تخت بررسی شده است. به منظور محاسبه پارامترهای جریان لایه مرزی و همچنین پارامترهای موثر بر نویز، داده‌برداری از میدان فشار سطح و میدان سرعت در نقاط کاوشگر تعریف شده در میدان حل به‌صورت همزمان با فرآیند شبیه‌سازی انجام شده است. برای پیش‌بینی نویز دوردست از مدل تحلیلی راجر-امیت [۱] و آنالوژی کرل [۱۲] استفاده شده است. روش عددی بکار رفته در این مطالعه شامل حل عددی مسئله آیروداکوستیکی نویز لبه‌فرار لایه مرزی آشفته با رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ با مدل مرزی لاند و میدان محاسباتی کاهش یافته و داده‌برداری از میدان فشار و جریان همزمان با فرآیند شبیه‌سازی در نرم‌افزار اوپن‌فوم برای نخستین بار در کشور مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱ - شماتیک مفهومی از مدل مرز ورودی لاند

در نهایت پروفیل سرعت در مقطع ورودی بر مبنای رابطه (۹) بدست آید.

$$(u_i)_{inlt} = \left[(U_i)_{inlt}^{Inner} + (u_i')_{inlt}^{Inner} \right] [1 - W(\eta_{inlt})] + \left[(U_i)_{inlt}^{Outer} + (u_i')_{inlt}^{Outer} \right] W(\eta_{inlt}) \quad (9)$$

زیرنویس *inlt* بیانگر مرز ورودی میدان حل و بالانویس‌های *Inner* و *Outer* به ترتیب معرف لایه داخلی و خارجی لایه مرزی است. $w(\eta)$ تابع وزنی است و با توجه به رابطه (۱۰) و ضرایب ثابت $\alpha_1 = 4$ و $\alpha_2 = 0.2$ بدست می‌آید.

$$w(\eta) = \frac{\tanh(\alpha_1)}{2} \times \left\{ 1 + \tanh \left[\frac{\alpha_1(\eta - \alpha_2)}{(1 - 2\alpha_2)\eta_{inlt} + \alpha_2} \right] \right\} \quad (10)$$

نحوه استخراج معادله پروفیل سرعت طبق رابطه (۹) در مراجع [۱۴، ۱۵] توضیح داده شده است.

پارامترهای اصلی موثر بر نویز لبه فرار لایه مرزی آشفته

در این بخش روابط مربوط به محاسبه پارامترهای اصلی موثر بر نویز لبه فرار لایه مرزی آشفته شامل چگالی طیف توان و طول مشخصه عرضی نوسانات فشار سطح، سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای و همچنین روابط مربوط به پیش‌بینی نویز با مدل تحلیلی راجر-امیت [۱] و آنالوژی کرل [۱۲] بیان می‌گردد. طبق روابط بندات و پیرسول [۱۶]، چنانچه پهنای باند فرکانسی برابر با ۱ Hz در نظر گرفته شود، مطابق با رابطه (۱۱)، چگالی طیفی خودکار، $\Phi_{p_i p_i}(\omega)$ ، معادل چگالی طیف توان بوده و تنها دارای اندازه است.

عامل اصلی پیچیدگی در حل دستگاه معادلات (۳) و (۴)، ظهور ترم τ_{ij}^r معروف به تانسور تنش‌های باقیمانده یا زیرشبکه‌ای است که شامل عبارات مجهول اثر مقیاس‌های حل نشده زیرشبکه است.

$$\tau_{ij}^r = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (5)$$

یکی از روش‌های تعیین عبارت τ_{ij}^r ، مدل کردن آن با استفاده از یک لزجت زیرشبکه‌ای (ν_{sgs} (pa.s)) است.

مدل مقیاس زیرشبکه‌ای اسمگورینسکی دینامیکی

مدل‌های لزجت گردابه‌ای مختلفی برای تعیین سهم مقیاس‌های زیرشبکه‌ای وجود دارد. در مدل اسمگورینسکی دینامیکی لزجت زیرشبکه‌ای ν_{sgs} با توجه به رابطه (۶) استخراج می‌شود.

$$\nu_{sgs} = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 \overline{S_{ij} S_{ij}}} = (C_s \Delta)^2 |\overline{S}| \quad (6)$$

در مدل اسمگورینسکی دینامیکی، ضریب ثابت (C_s) طبق رابطه (۷)، به صورت محلی و با استفاده از دو فیلتر شبکه با عرض Δ و فیلتر آزمون با عرض 2Δ ، بدست می‌آید [۱۳].

$$C_s^2 = \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{ij} M_{ij}} \quad (7)$$

$$M_{ij} = 2\overline{\Delta}^2 \left(\left| \widehat{S} \widehat{S}_{ij} - \alpha^2 \widehat{S} \widehat{S}_{ij} \right| \right) \quad (8)$$

که $\alpha \approx 2$ است.

مدل مرز ورودی آشفته لاند

در این مطالعه، به منظور آشفته‌سازی جریان ورودی و تثبیت لایه مرزی آشفته استاندارد روی صفحه تخت از مدل مرزی ورودی آشفته‌ساز لاند استفاده شده است. مطابق شکل ۱ اساس مدل مرز ورودی لاند و همکاران [۱۴]، نمونه‌گیری از پروفیل سرعت در یک مقطع پایین‌دست مرز ورودی، باز مقیاس آن بر مبنای سرعت اصطکاکی، ضخامت لایه مرزی و ضخامت مومنتوم و در نهایت نگاشت آن به مرز ورودی است تا

که $S_{pp}(X, Y, Z, \omega)$ چگالی طیفی فشار آکوستیکی در دوردست بر حسب (dB) ، $\phi_{pp}(\omega)$ و $\Lambda_z(\omega)$ به ترتیب چگالی طیف توان بر حسب (dB/Hz) و طول مشخصه عرضی نوسانات فشار سطح فشار سطح بر حسب (m) در موقعیت طولی لبه فرار است. همچنین X ، Y و Z مولفه‌های بردار مختصات ناظر شنونده در دوردست (\vec{x}) نسبت به موقعیت نقطه میانی خط لبه‌فرار (\vec{y}) است. بعلاوه I و σ به ترتیب انتگرال تابش و فاصله تصحیح شده بواسطه جابجایی امواج صوتی توسط جریان بوده که با توجه به روابط بخش پیوست قابل محاسبه است.

بر طبق آنالوژی صوتی کرل [۱۲]، فشار آکوستیکی دوردست از رابطه (۱۷) قابل محاسبه است.

$$p_a(\vec{x}, t) \approx \frac{1}{4\pi c_0} \oint_S \left(\frac{R_i}{R^2} \frac{\partial (n_j p'_{ij})}{\partial t} \right) \left(t - \frac{R}{c_0} \right) d^2 \vec{y} \quad (17)$$

که R فاصله بین لبه فرار صفحه تخت (\vec{y}) تا موقعیت ناظر شنونده در دوردست (\vec{x}) است. پارامتر c_0 سرعت صوت بر حسب (ثانیه / متر)، t زمان داده‌برداری و S مساحت منبع تولید نویز است. چگالی طیفی فشار آکوستیکی در دوردست با استفاده از رابطه (۱۸) بدست می‌آید.

$$S_{pp}(\vec{x}, \omega) = p_a(\vec{x}, \omega) p_a^*(\vec{x}, \omega) \quad (18)$$

که $p_a(\vec{x}, \omega)$ تبدیل فوریه معکوس سیگنال فشار آکوستیکی دوردست و $p_a^*(\vec{x}, \omega)$ مزدوج مختلط آن است. همچنین $\omega = 2\pi f$ فرکانس زاویه‌ای بر حسب (ثانیه / رادیان) است.

در نهایت سطح فشار و کل سطح فشار صوتی دوردست به ترتیب طبق رابطه (۱۹) و (۲۰) محاسبه می‌شود.

$$SPL(dB/Hz) = 10 \log_{10} \left(\frac{S_{pp}}{P_{ref}^2} \right) \quad (19)$$

$$OASPL(dB) = 10 \log_{10} \sum_{f_{min}}^{f_{max}} \left(\frac{S_{pp} \Delta f}{P_{ref}^2} \right) \quad (20)$$

$$\Phi_{p_i p_i}(\omega) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[P_i^*(\omega, T) P_i(\omega, T) \right] \quad (11)$$

از سوی دیگر چگالی طیفی متقابل، $\Phi_{p_i p_j}(\omega)$ ، تابعی مختلط بوده و به صورت رابطه (۱۲) قابل نمایش است.

$$\Phi_{p_i p_j}(\omega) = \left| \Phi_{p_i p_j}(\omega) \right| \exp \left(i \varphi_{p_i p_j}(\omega) \right) \quad (12)$$

در بیشتر مواقع از مجذور تابع چگالی طیفی متقابل نرمال شده، $\gamma_{i,j}^2(\omega)$ ، به نام تابع همدوسی^۵ استفاده گردیده که با توجه به رابطه (۱۳) بدست می‌آید.

$$\gamma_{i,j}^2(\omega) = \frac{\left| \Phi_{p_i p_j}(\omega) \right|^2}{\Phi_{p_i p_i}(\omega) \Phi_{p_j p_j}(\omega)} \quad (13)$$

طبق رابطه (۱۴)، با استفاده از فاز تابع چگالی طیفی متقابل بین سیگنال فشار دو نقطه در راستای جریان، می‌توان سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای در محدوده لبه‌فرار بر حسب متر بر ثانیه، را محاسبه نمود [۱۷، ۱۸].

$$U_c(\omega, \eta_x) = \frac{\omega \eta_x}{\varphi_{p_i p_j}(\omega)} \quad (14)$$

که η_x فاصله بین دو کاوشگر فشار در راستای جریان بر حسب متر است. با محاسبه توابع همدوسی $\gamma_{i,j}^2(\omega, \eta_z)$ ، به صورت دوه‌دو، بین تمامی کاوشگرهای واقع در راستای عرضی صفحه تخت، طول مشخصه عرضی ساختارهای گردابه‌ای با استفاده از رابطه (۱۵) بدست می‌آید [۱۹].

$$\Lambda_z(\omega) = \sum_{k=1}^{M-1} \frac{(\gamma_k + \gamma_{k+1})(\eta_{z,k+1} - \eta_{z,k})}{2} \quad (15)$$

که η_z فاصله بین دو کاوشگر فشار در راستای عرضی مدل بر حسب متر بوده و M تعداد کل η_z های یکتا است.

طیف سطح نویز دوردست طبق مدل تحلیلی راجر-امیت [۱] با توجه به پارامترهای موثر بر نویز لبه فرار از رابطه (۱۶) قابل پیش‌بینی است.

$$S_{pp}(X, Y, Z, \omega) = (\omega LZ / (4\pi c_0 \sigma^2))^2 2b |I|^2 l_z(\omega) \phi_{pp}(\omega) \quad (16)$$

بیان مسئله و روش حل عددی

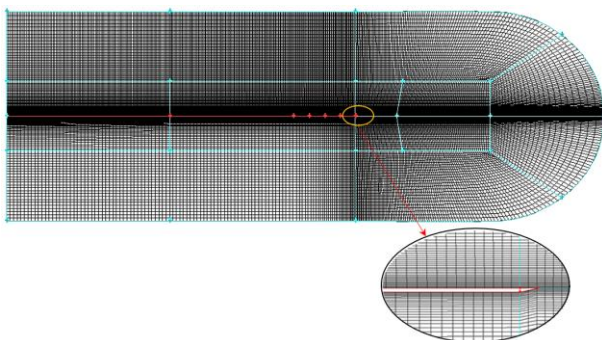
هدف اصلی در این مطالعه بررسی اثر کاربرد فینلت‌های مستطیل‌شکل بر نویز لبه فرار یک صفحه تخت است. از اینرو یک صفحه تخت ۳۰ سانتیمتری با دهانه عرضی ۴ سانتیمتر و ضخامت ۰/۱ میلیمتر، بعنوان هندسه مبنا در نظر گرفته شده است. لبه فرار صفحه تخت با زاویه ۱۲ درجه به صورت اوریب بریده شده تا از نویز ناشی از لبه فرار پخ جلوگیری شود. مطابق شکل ۲ میدان حل ایجاد شبکه به صورت یک هندسه C شکل در نظر گرفته شده که شامل ناحیه دنباله لبه فرار و سطوح بالا و پایین صفحه تخت است.

عدد ماخ و عدد رینولدز جریان بر مبنای طول صفحه به ترتیب برابر با ۰/۰۶ و 4×10^5 است. ابعاد میدان حل در ناحیه دنباله لبه فرار به اندازه $42 \delta_0$ و در راستای عمود بر دیواره به سمت بالا و پایین به اندازه $18 \delta_0$ توسعه یافته است. پارامتر δ_0 ضخامت لایه مرزی آشفته در مرز ورودی روی صفحه تخت است که برابر ۵ میلیمتر انتخاب شده است. این انتخاب امکان بررسی جریان آشفته لایه مرزی در محدوده عدد رینولدز بر پایه ضخامت مومنوم $(Re\theta)$ بین ۷۰۰ تا ۱۶۰۰ را فراهم نموده است. تعیین مقادیر ضخامت لایه مرزی در ورودی میدان حل (δ_0) و ضخامت مومنوم در مرز ورودی (θ) شامل انتخاب مقادیر اولیه در یک بازه معقول با توجه به عدد رینولدز و ضخامت لایه مرزی موردنیاز در محدوده لبه فرار صفحه تخت است چراکه طی فرآیند حل، الگوریتم بازنگاشتی مدل لاند، این مقادیر را در هر گام زمانی تصحیح و به مقدار واقعی و معقول نزدیک خواهد کرد.

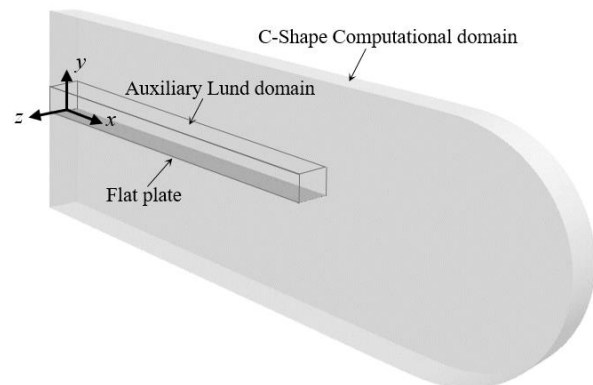
برای سرعت در مرز ورودی و تا ارتفاع $6 \delta_0$ از شرط مرزی نگاشت داده‌های ثابت در زمان متغیر^۶ و در فواصل دورتر از شرط مرزی دیریکله^۷ استفاده شده است، چراکه شبیه‌سازی‌های اولیه نشان‌دهنده یکنواخت بودن پروفیل سرعت در ارتفاع‌های بیش از $6 \delta_0$ نسبت به سطح صفحه تخت است. همچنین در مرز ورودی ناحیه زیرین صفحه از شرط مرزی دیریکله استفاده شده چون آشفته بودن جریان لایه مرزی در این ناحیه مورد نیاز نبوده است. شرط مرزی سرعت برای مرز فوقانی و خروجی از نوع نیومن^۸ $(\partial u_i / \partial n = 0)$ و برای صفحه تخت از نوع دیواره بدون لغزش $(u_i = 0)$ انتخاب شده است. به منظور ایجاد شرایط شبیه‌سازی عرض نامحدود برای صفحه تخت، مرزهای طرفین از نوع متناوب انتخاب شده است. شرط مرزی فشار در مرز فوقانی از نوع دیریکله با فشار ثابت و برابر با فشار محیط $(p = 0)$ و برای سایر مرزها از نوع نیومن $(\partial p / \partial n = 0)$ انتخاب شده است.

برای ایجاد شبکه محاسباتی منطبق با معیارهای معرفی شده جهت رهیافت گردابه بزرگ در مرجع [۲۰] و متناسب با امکانات محاسباتی موجود، سطح جانبی میدان حل طبق شکل ۳ به ۱۷ بلوک تقسیم شده و نقاطی برای کنترل کشیدگی شبکه در نظر گرفته شده است. در نهایت با تکرار شبکه محاسباتی سطح جانبی در راستای عرضی، میدان حل با تعداد $138 \times 110 \times 794$ نقطه شبکه محاسباتی و با استفاده از سلول‌های شش وجهی به صورت سازمان یافته و با نرخ کشیدگی ۱/۰۵ شبکه‌بندی شده است.

بر این مبنا پارامترهای شبکه شامل $\Delta x^+ = 30$ ، $\Delta z^+ = 11$ و $\Delta y_{wall}^+ \approx 0.7$ در محدوده معیارهای ارائه شده برای شبکه‌بندی میدان حل در رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ با دقت بالا در مرجع [۲۰]، بدست آمده است.



شکل ۳ - بلوک‌بندی سطح جانبی و نمای کلی شبکه محاسباتی



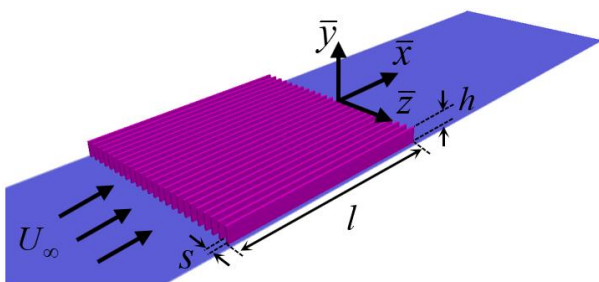
شکل ۲ - میدان حل محاسباتی C شکل

محاسباتی ریز از دقت کافی برای حل جریان لایه مرزی آشفته با استفاده از رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ برخوردار است. پارامتر مهم دیگری که بر نتایج حل در رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ با دقت بالا تاثیر دارد، اندازه گام زمانی حل است که در این مطالعه $(\Delta t = 10^{-5} \text{ Sec})$ در نظر گرفته شده است. این گام زمانی معادل با گام زمانی بی‌بعد شده $\Delta t^+ = \Delta t u_\tau^2 / \nu \approx 0.14$ است که بر مبنای مطالعه چوبی و معین [۲۳]، برای حل دقیق جریان آشفته روی دیواره مناسب است.

مطابق شکل ۵ در این مطالعه از فینلت‌های مستطیل شکل در بالادست لبه فرار صفحه تخت استفاده شده است. این مدل از فینلت‌ها باعث شده تا دقت و ساختار شبکه محاسباتی بدون تغییری بماند و شبکه محاسباتی با حذف سلول‌های شامل این فینلت‌ها از میدان حل، ایجاد شود. به منظور بررسی اثر فاصله عرضی فینلت‌ها بر نویز لبه فرار صفحه تخت از دو فاصله عرضی $1/5$ و $1/9$ استفاده شده است.

فینلت‌ها فقط بر روی سطح فوقانی صفحه تخت در محدوده $x/L = 72\%$ تا $x/L = 82\%$ مدل شده‌اند. مطابق با پیشنهاد مرجع [۵] ارتفاع فینلت‌ها (h) در حدود 0.12 برابر ضخامت لایه مرزی در لبه فرار صفحه تخت ($\delta = y^+ \approx 500$) انتخاب شده است. همچنین طول فینلت‌ها (l) برابر $14 \times h$ و ضخامت آنها (t_f) در حدود $0.14 \times h$ در نظر گرفته شده است.

شبکه محاسباتی برای صفحه تخت مجهز به فینلت‌ها از طریق حذف بلوک‌های شامل فینلت‌ها ایجاد شده است. از آنجا که شبکه محاسباتی برای صفحه تخت مبنا با توسعه شبکه محاسباتی صفحه جانبی میدان حل بدست آمده، لذا برای تولید شبکه محاسباتی صفحه تخت مجهز به فینلت‌ها تنها نیاز به حذف بلوک‌های شامل این فینلت‌ها است. این روش باعث شده

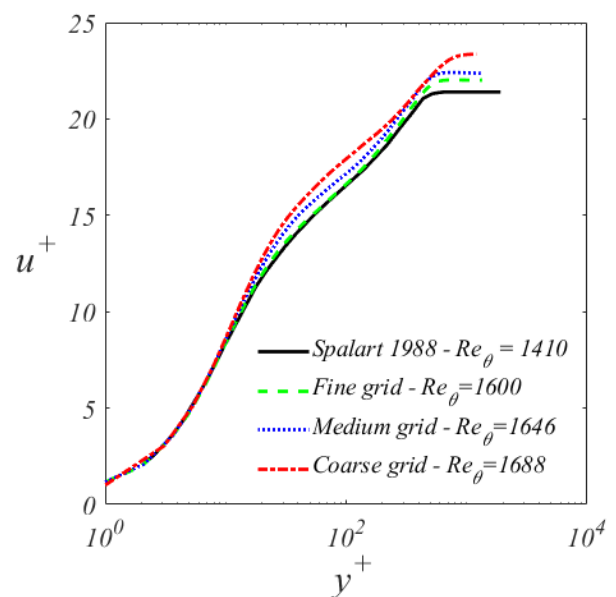


شکل ۵ - مدل صفحه تخت مجهز به فینلت‌های مستطیل شکل

دقت شبکه محاسباتی نتیجه یک مطالعه استقلال نتایج حل از شبکه محاسباتی بوده که بر روی میدان حل کمکی (شکل ۲ و با سه شبکه محاسباتی درشت با 1253376 ، شبکه محاسباتی متوسط با 3840000 و شبکه محاسباتی ریز با 5641440 سلول انجام شده است. در مرز ورودی از شرط مرزی بازنگاشتی لاند استفاده شده و صفحه بازنگاشت سرعت در موقعیت $48\delta 0$ در پایین دست لبه حمله قرار گرفته تا نوسانات ناشی از فرآیند بازمقیاس مدل لاند بر روند حل حداقل باشد [۲۱]. در مطالعه حاضر، دقت شبکه محاسباتی در ناحیه محدود به میدان حل اولیه در مقایسه با سایر بلوک‌های میدان حل کلی، بیشترین تاثیر را بر نتایج حل نهایی جریان لایه مرزی آشفته دارد. بنابراین مطالعه استقلال نتایج از دقت شبکه محاسباتی بر روی میدان حل اولیه انجام شده است.

در شکل ۴ نتایج مربوط به سرعت متوسط بی‌بعد شده با سرعت اصطکاکی ($u^+ = \bar{u}/u_\tau$) بر حسب فاصله بی بعد شده از سطح صفحه تخت ($y^+ = \nu y/u_\tau$) برای هر سه شبکه محاسباتی درشت، متوسط و ریز در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی عددی مستقیم [۲۲] ارائه شده است. u_τ (m/sec) سرعت اصطکاکی و ν (m²/sec) ویسکوزیته سینماتیک است.

مقایسه نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که پارامترهای شبکه



شکل ۴ - پروفیل سرعت متوسط بر حسب فاصله از دیواره در

موقعیت $x/L = 98\%$ برای شبکه‌های مختلف و مقایسه با

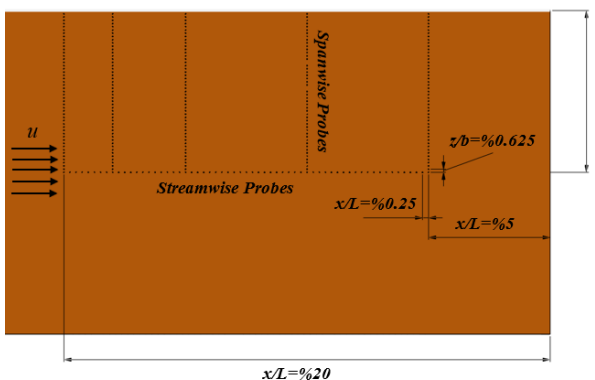
نتایج شبیه‌سازی مستقیم عددی [۲۲]

بین و پایین دست فینلت‌ها، تعداد ۶۰ کاوشگر در راستای جریان و در محدوده $x/L = 80\%$ تا $x/L = 95\%$ تعریف شده است. همچنین در هریک از موقعیت‌های طولی ۸۰، ۸۲، ۸۵، ۹۰ و $x/L = 95\%$ ، تعداد ۸۰ کاوشگر در راستای عمود بر صفحه تخت برای داده برداری از میدان سرعت جریان لایه مرزی و تعداد ۵۰ کاوشگر فشار روی سطح و در راستای دهانه صفحه تخت ($b/8 < z < b/2$) برای محاسبه طول مشخصه عرضی نوسانات فشار تعریف شده است.

نتایج

در این بخش نتایج مربوط به اثر فاصله عرضی فینلت‌ها بر ضریب فشار استاتیکی بررسی شده است. سپس با استفاده از داده‌های ذخیره شده توسط کاوشگرهای فشار، چگالی طیفی توان نوسانات فشار سطح در موقعیت‌های مختلف طولی صفحه تخت و طول مشخصه عرضی نوسانات فشار سطح و همچنین سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای در محدوده لبه فرار، تحت تاثیر فینلت‌ها با فواصل عرضی مختلف مقایسه شده است. در ادامه با استفاده از داده‌های میدان سرعت در محدوده بین فینلت‌ها و پایین دست آن‌ها، پروفیل سرعت متوسط و شدت آشفتگی و همچنین سطوح هم‌تراز معیار کیو تحت تاثیر فینلت‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در نهایت با استفاده از نتایج نویز پیش‌بینی شده مدل تحلیلی راجر-امیت [۱] و آنالوژی کرل [۱۲]، به ترتیب طیف نویز دوردست و اندازه سطح کل نویز، تحت تاثیر حضور فینلت‌ها بررسی شده است. توزیع ضریب فشار استاتیک بر روی خط میانه عرضی صفحه تخت مجهز به فینلت‌ها در مقایسه با صفحه تخت مینا

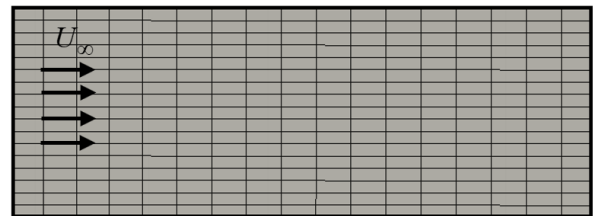


شکل ۷ - آرایش نقاط کاوشگر روی سطح مدل صفحه تخت

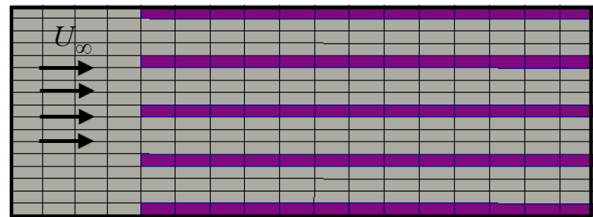
تا شبکه محاسباتی با کیفیت و دقت یکسان و بدون نگرانی از تغییر نتایج ناشی از تغییر شبکه محاسباتی تولید شود.

در شکل ۶ (الف)، نمای فوقانی شبکه محاسباتی روی صفحه تخت مینا و در شکل ۶ (ب و پ) نماهای فوقانی و جانبی صفحه تخت مجهز به فینلت‌ها نشان داده شده است. نمای فوقانی نشان‌دهنده بلوک‌های حذف شده و نمای جانبی نشان‌دهنده حفظ کیفیت شبکه محاسباتی از طریق حذف بلوک فینلت‌ها است.

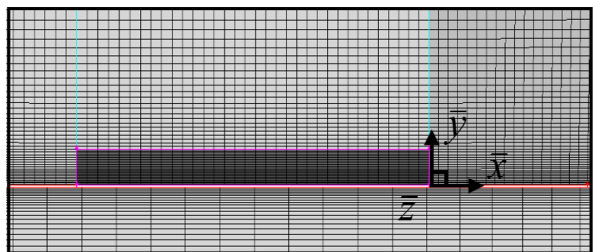
داده برداری از مقادیر فشار و سرعت طی مدت زمان انجام شبیه‌سازی، با استفاده از ابزار کاوشگر^۹ در نرم افزار اوپن‌فوم انجام شده است. با توجه به الگوی ارائه شده در مطالعات تجربی گذشته [۵] و مطابق با شکل ۷ نقاط کاوشگر فشار به صورت آرایه‌های L شکل بر روی سطح صفحه تخت و همچنین نقاط کاوشگر سرعت در راستای عمود بر صفحه تخت چیده شده است. برای محاسبه سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای در



الف



ب



پ

شکل ۶ - نماهای نزدیک از شبکه محاسباتی. (الف) نمای فوقانی صفحه تخت مینا، (ب) نمای فوقانی صفحه تخت مجهز به فینلت‌های مستطیل شکل، (پ) نمای جانبی از فینلت‌های مستطیل شکل

گردایان فشار در این محدوده کاهش می‌یابد. این یافته نشان می‌دهد که با کاهش فاصله عرضی بین فینلت‌ها، گستره حباب جریان برگشتی^{۱۰} در پایین دست فینلت‌ها افزایش می‌یابد. برای فینلت با فاصله عرضی ($S = 0.9mm$)، شیب گردایان فشار، کمتر از حالت $S = 1.5mm$ بوده و ماکزیمم ضریب فشار در محدوده نزدیک به $\bar{x}/h_F \approx 11$ رخ داده است. این بدان معناست که نقطه اتصال مجدد به محدوده پایین دست تری منتقل شده و به عبارتی جریان در فاصله دورتری از فینلت‌ها به سطح باز می‌گردد.

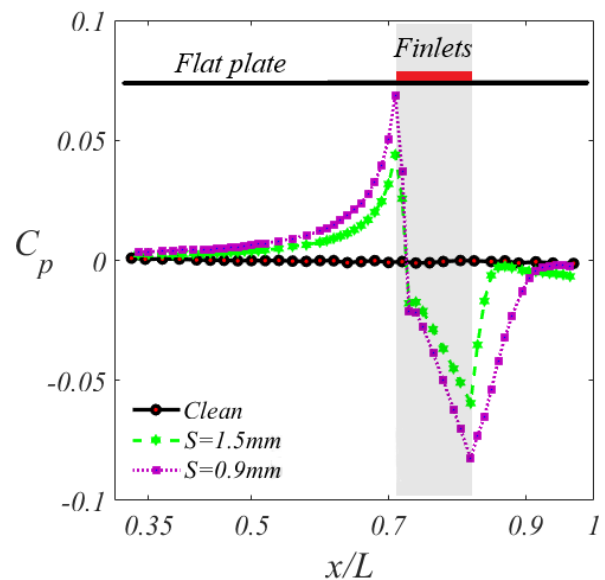
تغییرات چگالی طیفی فشار سطح تحت اثر فینلت‌ها بر روی خط میانه عرضی صفحه تخت، در موقعیت‌های بالادست نزدیک لبه حمله فینلت‌ها ($x/L = 70\%$)، بین فینلت‌ها و نزدیک به لبه فرار آن‌ها ($x/L = 80\%$)، پایین دست و نزدیک به لبه فرار فینلت‌ها ($x/L = 85\%$) و نزدیک به لبه فرار صفحه تخت ($x/L = 95\%$) در شکل ۹ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که مقدار چگالی طیفی فشار سطح در موقعیت بالادست و نزدیک به لبه حمله فینلت‌ها برای هر دو فاصله عرضی در بازه فرکانسی پایین تا فرکانس ۴۰۰۰ هرتز در مقایسه با حالت صفحه تخت مینا افزایش یافته و با کاهش فاصله بین فینلت‌ها مقدار این افزایش اندکی بیشتر شده است. تغییر خطوط جریان ناشی از حضور فینلت‌ها و شکل‌گیری یک ناحیه جدایش در لبه حمله فینلت‌ها سبب پیدایش گردابه‌های بزرگی شده که نوسانات فشار القایی ناشی از این گردابه‌ها منجر به افزایش چگالی طیفی فشار سطح در این بازه فرکانسی شده و این پارامتر در موقعیت طولی مورد بحث، بسیار موثرتر از پارامتر فاصله بین فینلت‌ها است.

در محدوده فرکانس‌های بیش از ۴۰۰۰ هرتز مقدار چگالی طیفی فشار سطح نسبت به حالت مینا، کاهش یافته است. علت این کاهش با توجه به پدیده اثر برا^{۱۱} یا "کوندا" بیان شده است [۹]. بر مبنای این اثر، گردابه‌های کوچک تحت اثر گردابه‌های بزرگ، تمایل به جدا شدن از سطح صفحه تخت دارند.

در موقعیت بالادست نزدیک لبه حمله فینلت‌ها (70% $x/L =$)، شکل‌گیری گردابه‌های بزرگتر سبب انحراف و جدایش گردابه‌های کوچک از سطح صفحه تخت شده و

در فاصله طولی $98\% \leq x/L \leq 35\%$ نسبت به مرز ورودی، در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸ در بالادست فینلت‌ها تا $50\% \leq x/L$ ضریب فشار استاتیک برای فینلت‌ها تغییر قابل توجهی در مقایسه با صفحه تخت مینا ندارد. در محدوده $50\% \leq x/L$ تا لبه حمله فینلت‌ها (72% $x/L =$)، گردایان فشار معکوس نشان دهنده کاهش سرعت جریان بوده و با کاهش فاصله عرضی فینلت‌ها، گردایان فشار القایی افزایش یافته به نحوی که بیشترین مقدار گردایان فشار برای حالت $S = 0.9mm$ ایجاد شده است. وجود گردایان فشار معکوس بیانگر تغییر خطوط جریان قبل از رسیدن به فینلت‌ها است. در محدوده قرارگیری فینلت‌ها ($82\% \leq x/L \leq 72\%$)، با توجه به کانالیزه شدن بخشی از جریان که بین فینلت‌ها جاری است و افزایش ضخامت لایه مرزی روی دیواره فینلت‌ها، گردایان فشار مطلوب رخ داده است. از طرفی با افزایش فاصله عرضی فینلت‌ها، اثر آن‌ها کاهش یافته است. در محدوده پایین دست فینلت‌ها ($82\% \leq x/L \leq 98\%$)، گردایان فشار معکوس سبب می‌گردد تا مجدداً جریان به رفتار مشابه جریان روی صفحه تخت مینا نزدیک شود. ملاحظه می‌شود که هرچه فاصله عرضی بین فینلت‌ها کاهش یابد، شیب تغییر



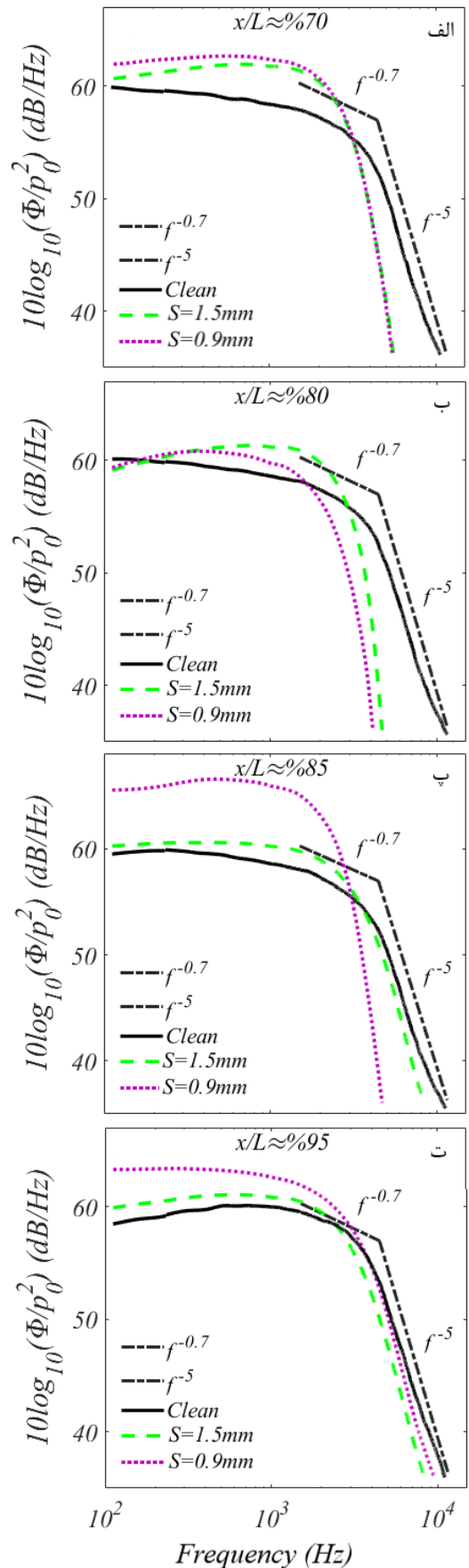
شکل ۸ - توزیع ضریب فشار استاتیک بر روی خط میانه عرضی صفحه تخت مجهز به فینلت‌ها در مقایسه با صفحه تخت مینا در فاصله $98\% \leq x/L \leq 35\%$.

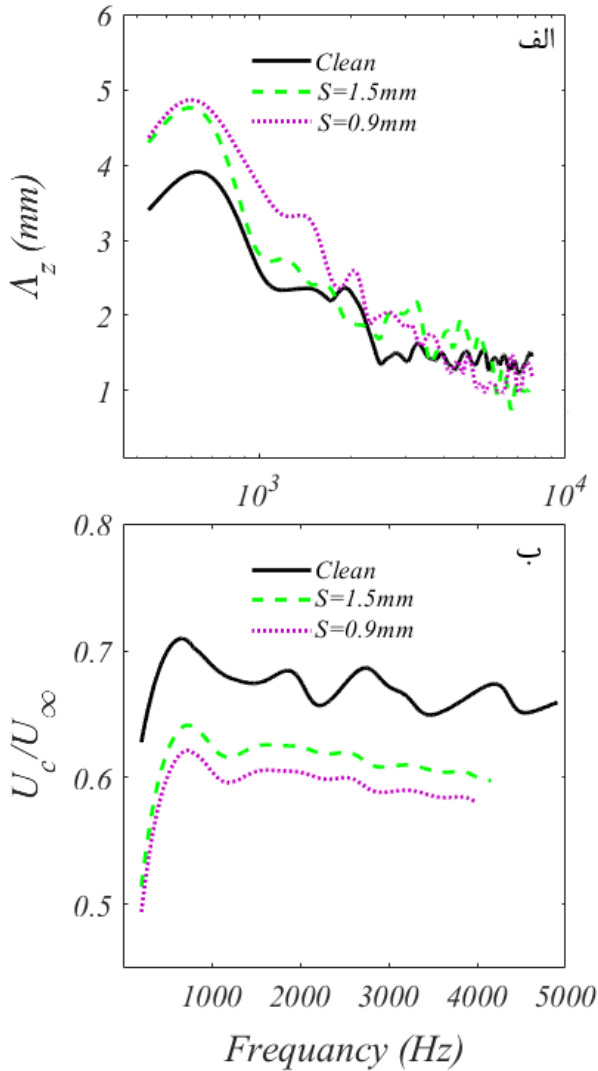
شکل ۹ - تغییرات چگالی طیفی فشار سطح در موقعیت‌های الف)
 (ب) $x/L = 70\%$ ، (پ) $x/L = 80\%$ ، (ت) $x/L = 85\%$ و
 (ث) $x/L = 95\%$

لذا نوسانات فشار سطح القایی ناشی از گردابه‌های کوچک کاهش یافته است. همچنین با توجه به اینکه فواصل بین فینلت‌ها تأثیری بر انرژی القایی گردابه‌های بزرگ نداشته، لذا در محدوده لبه حمله فینلت‌ها، اثر برا و در نتیجه نوسانات القایی گردابه‌های کوچک متأثر از فاصله بین فینلت‌ها نیست.

تغییر چگالی طیفی فشار سطح در موقعیت بین فینلت‌ها و نزدیک به لبه فرار آن‌ها ($x/L = 80\%$) در شکل ۹ (ب) نشان داده شده است. اندازه چگالی طیفی فشار سطح در فرکانس‌های پایین نسبت به موقعیت بالادست لبه حمله فینلت‌ها ($x/L = 70\%$) کاهش یافته و فاصله بین فینلت‌ها پارامتر کاملاً موثری بر اندازه چگالی طیفی فشار سطح در این موقعیت است. در واقع حضور فینلت‌ها سبب افزایش سطح خیس در تماس با جریان شده و اثر تلفات دیواره را افزایش می‌دهند. با کاهش فاصله بین فینلت‌ها، ساختارهای جریانی با سائزی کوچکتر در کانال‌های بین فینلت‌ها جریان داشته که تحت اثر تلفات دیواره، انرژی آنها تحلیل رفته و در نتیجه چگالی طیفی فشار سطح از تراز پایین‌تری برخوردار خواهد بود. در نهایت می‌توان استنباط کرد که قرارگیری فینلت‌ها در محدوده‌ای که لبه فرار صفحه تخت را شامل شود، علی‌رغم اینکه افزایش نسبتاً کمی در چگالی طیفی فشار سطح ایجاد می‌کند، امکان کاهش موثر چگالی طیفی فشار سطح در محدوده فرکانس‌های میانی و بالا را فراهم ساخته است.

تغییر چگالی طیفی فشار سطح در موقعیت پایین دست و نزدیک به لبه فرار فینلت‌ها ($x/L = 85\%$) در شکل ۹ (پ) نشان داده شده است. روند تغییر چگالی طیفی فشار سطح با توجه به فاصله بین فینلت‌ها متفاوت است. برای حالت $S = 1.5mm$ فاصله فینلت‌ها به گونه‌ای است که بخش کمی از جریان در لبه حمله فینلت‌ها از سطح جدا شده و بیشتر جریان در فضای کانال‌های بین فینلت‌ها در جریان است. بنابراین چگالی طیفی فشار سطح نزدیک به حالت مبنا است و اختلاف اندکی که در این نتایج وجود دارد را می‌توان ناشی از اثرات دنباله جریان بین فینلت‌ها در پایین دست آن‌ها و اثر نسبتاً ضعیف لایه برشی روی لبه بالایی فینلت‌ها دانست. برای





شکل ۱۰ - الف) طول مشخصه نوسانات فشار سطح در راستای عرضی، ب) سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای در محدوده لبه فرار صفحه تخت ($x/L = 95\%$)

کاربرد فینلت‌ها باشد. دلیل افزایش در محدوده فرکانسی کمتر از ۴۰۰۰ هرتز، ریزش ساختارهای همبسته بزرگ در پایین دست فینلت‌ها است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که ابعاد ساختارهای همبسته فرکانس پایین در پایین دست فینلت‌ها با کاهش فاصله عرضی آن‌ها افزایش یافته و فرکانس ریزش بزرگترین گردابه‌ها نسبت به حالت مبنا کاهش یافته است.

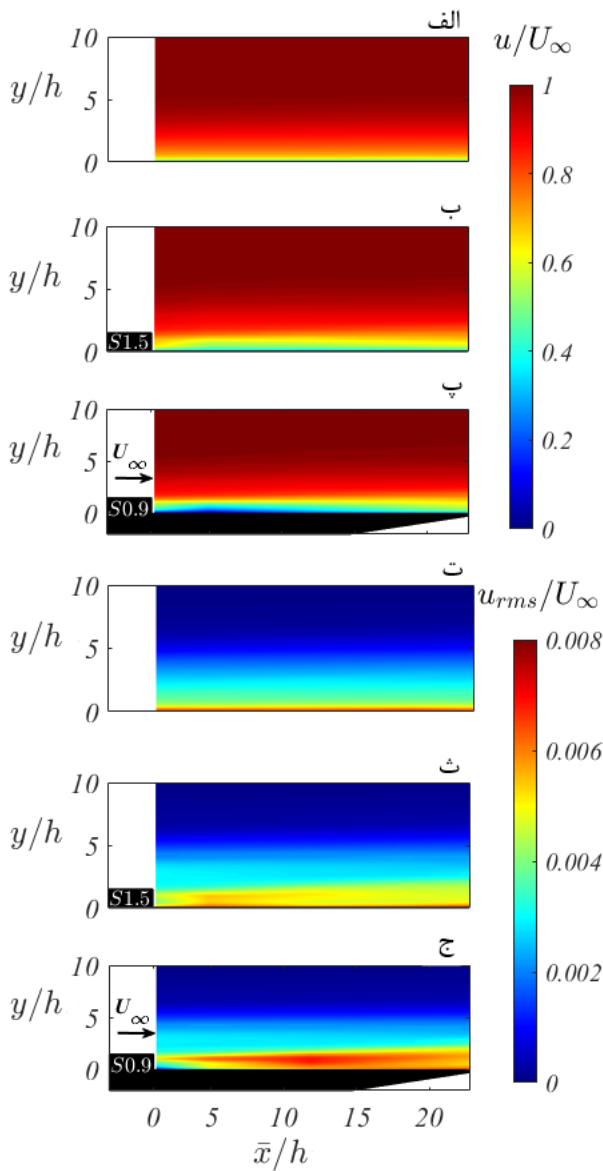
با توجه به شکل ۱۰ (ب)، سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای، در پایین دست فینلت‌ها کاهش یافته و کاهش فاصله عرضی بین فینلت‌ها منجر به کاهش بیشتر سرعت جابجایی در محدوده لبه فرار صفحه تخت شده است. این نتیجه می‌تواند

حالت $S = 0.9mm$ شرایط نسبت به حالت قبل متفاوت است و یک اکستریم نسبی در فرکانس ۶۳۰ هرتز مطابق با عدد اشتروهل $fh/U_\infty \approx 0.69$ وجود دارد که این نتیجه مطابق با نتایج مطالعه تجربی [۵] است. کوچکتر شدن فرکانس اکستریم چگالی طیفی فشار سطح نشان دهنده بزرگتر شدن اندازه ساختارهای گردابه‌ای در لایه مرزی آشفته در پایین دست فینلت‌ها با فاصله بین آن‌ها ریز است. بعلاوه اگرچه حضور فینلت‌های با فاصله عرضی ریز در بالادست لبه فرار مدل منجر به کاهش قابل توجه طیف فشار سطح در محدوده پایین دست لبه فرار فینلت‌ها در فرکانس‌های بالا شده، اما همزمان باعث ایجاد یک افزایش نامطلوب در طیف فشار سطح در فرکانس‌های پایین و میانی شده است.

نتایج شکل ۹ (ت) نشان دهنده تغییر چگالی طیفی فشار سطح تحت اثر فینلت‌ها در موقعیت پایین دست نسبتاً دور از آن‌ها و نزدیک به لبه فرار صفحه تخت ($x/L = 95\%$) است. همانگونه که مشاهده شده، برای هر دو حالت روندی متناسب با حالت صفحه تخت مبنا وجود دارد که نشان از کاهش کارایی فینلت‌ها در تغییر چگالی طیفی فشار سطح است. نکته قابل توجه در این نتایج، افزایش مقادیر چگالی طیفی فشار سطح با کاهش فاصله بین فینلت‌ها در محدوده فرکانس پایین تا میانی (۴۰۰۰ هرتز) است. علت این افزایش به وجود و گستره حساب جریان برگشتی در پایین دست فینلت‌ها مرتبط است. مطابق با نتایج ارائه شده در مطالعات گذشته [۵، ۲۴]، حذف اثر حساب وجود فاصله‌ای در پایین دست نقطه اتصال لایه برشی به سطح است.

طول مشخصه نوسانات فشار سطح در راستای عرضی و سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای در محدوده لبه فرار ($x/L = 95\%$) در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۰ (الف)، استفاده از فینلت‌ها سبب افزایش طول مشخصه نوسانات فشار در راستای عرضی مدل در محدوده نزدیک به لبه فرار صفحه تخت در بازه فرکانسی کمتر از ۴۰۰۰ هرتز شده در حالیکه تغییرات طول مشخصه عرضی ساختارهای گردابه‌ای کوچک در این موقعیت چندان قابل توجه نیست. افزایش طول مشخصه در راستای عرضی می‌تواند نشان‌دهنده شکل‌گیری ساختارهای گردابه‌ای بزرگتر تحت اثر



شکل ۱۱ - کانتور سرعت متوسط و شدت آشفتگی در پایین دست فینلت‌ها در مقایسه با حالت مبنا. الف، ت) حالت مبنا، ب، ث) $S = 1.5 \text{ mm}$ ، پ، ج) $S = 0.9 \text{ mm}$.

برگشتی در پشت لبه فرار فینلت‌ها که به واسطه اثر "کوندا" شکل گرفته به گونه‌ای است که در ترکیب با جریان لایه مرزی خروجی از بین فینلت‌ها تغییر قابل ملاحظه‌ای بر کانتور شدت آشفتگی در موقعیت خط میانی بین فینلت‌ها در ناحیه پایین دست آنها ایجاد نشده است.

با توجه به شکل ۱۱ (پ و ج) با کاهش فاصله عرضی فینلت‌ها و برای حالت $S = 0.9 \text{ mm}$ ، ضمن کاهش بیشتر سرعت متوسط، یک لایه برشی قوی‌تر در موقعیت تقریبی

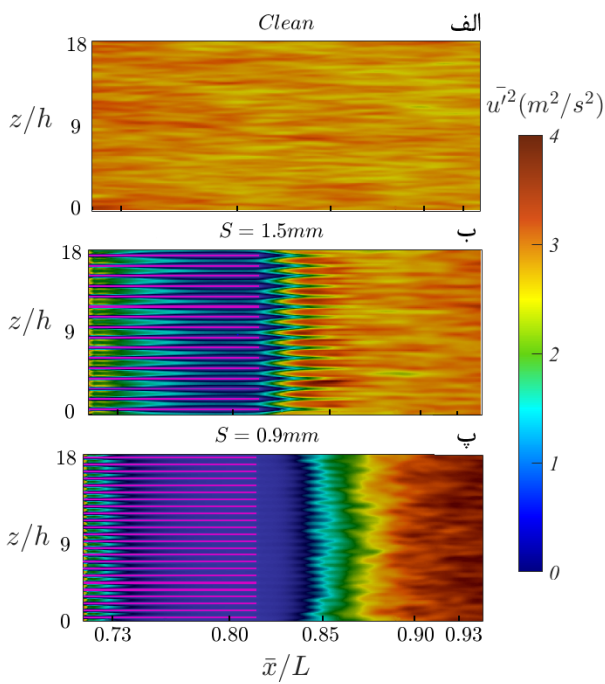
بیانگر افزایش فاصله نقطه اتصال مجدد لایه برشی در پایین دست فینلت‌ها با کاهش فاصله بین آن‌ها باشد. بنابراین اثر جریان کانالیزه شده بین فینلت‌ها و لایه برشی تشکیل شده در سطح بالایی آن‌ها، با کاهش فاصله عرضی فینلت‌ها بیشتر شده و تا محدوده وسیع‌تری در ناحیه پایین دست فینلت‌ها توسعه خواهد یافت.

در شکل ۱۱ کانتور سرعت متوسط و شدت آشفتگی در پایین دست فینلت‌ها با فواصل عرضی در مقایسه با حالت مبنا (صفحه تخت بدون فینلت) ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فینلت‌ها سبب کاهش سرعت متوسط و افزایش شدت آشفتگی در محدوده نزدیک به سطح صفحه تخت و پایین دست فینلت‌ها شده است. از آنجا که در حضور فینلت‌ها جریان به دویخش جریان عبوری از بین فینلت‌ها و جریان عبوری از روی فینلت‌ها تقسیم می‌شود لذا کاهش سرعت متوسط در نزدیکی سطح را می‌توان نتیجه افزایش سطح دیواره‌ها دانست. افزایش سطح دیواره‌ها منجر به افزایش اثر تلفات اصطکاکی شده و با کاهش فاصله بین فینلت‌ها، جریان کانالیزه شده با سرعت کمتری از بین فینلت‌ها خارج شده و در پایین دست فینلت‌ها جریان می‌یابد. از طرفی با کاهش فاصله عرضی و مومنتوم جریان کانالیزه شده، شدت آشفتگی جریان در پایین دست فینلت‌ها به واسطه تراکم بیشتر فینلت‌ها و افزایش سهم جریان منحرف شده در لبه حمله فینلت‌ها و در نتیجه شکل‌گیری لایه برشی موثرتر در جریان عبوری از روی آن‌ها، افزایش یافته است.

نتایج شکل ۱۱ (ب و ث) نشان می‌دهد که حباب جریان برگشتی در پایین دست فینلت‌ها در حالت $S = 1.5 \text{ mm}$ چندان گسترده و قابل توجه نیست. با توجه به شکل می‌توان استنباط کرد که انحراف جریان لایه مرزی تحت اثر حضور فینلت‌ها با فاصله عرضی ۱/۵ میلی‌متر، منجر به ایجاد لایه برشی ضعیفی بر روی لبه بالای فینلت‌ها شده و بیشتر ساختارهای همبسته جریان لایه مرزی از بین فینلت‌ها عبور می‌کند. کاهش سرعت متوسط در این حالت ناشی از افزایش اثر اصطکاک دیواره فینلت‌ها بر جریان عبوری از بین آن‌ها است.

در این حالت علیرغم اینکه اختلاط جریان کانالیزه شده و لایه برشی، سبب افزایش شدت آشفتگی شده، اما حباب جریان



شکل ۱۲ - کانتور شدت آشفتگی (u'^2) در فاصله نزدیک به سطح فینلت‌ها ($y/h_F \approx 0.05$) در محدوده قرارگیری و پایین دست فینلت‌ها ($0.7 < x/L < 0.95$). (الف) حالت مبنا، (ب) فاصله عرضی بین فینلت‌ها $S = 1.5mm$ و (پ) فاصله عرضی بین فینلت‌ها $S = 0.9mm$.

نزدیک به سطح، عدم وجود جریان کم مومنوم خروجی از بین فینلت‌ها نشان دهنده حرکت بخشی از ساختارهای جریان کانالیزه شده به سمت لبه بالایی فینلت‌ها به جای طی مسیر کانال بین فینلت‌ها است. این ناحیه در واقع ناحیه پناهگاه برشی^{۱۲} است که در مرجع [۴] بعنوان مکانیزم کاهش آلودگی صوتی به آن اشاره شده است.

تغییر در ساختارهای همدوس جریان تحت اثر فینلت‌ها، با مقایسه سطوح همتراز معیار کیو در شکل ۱۳ شکل ۱۳ مورد ارزیابی قرار گرفته است.

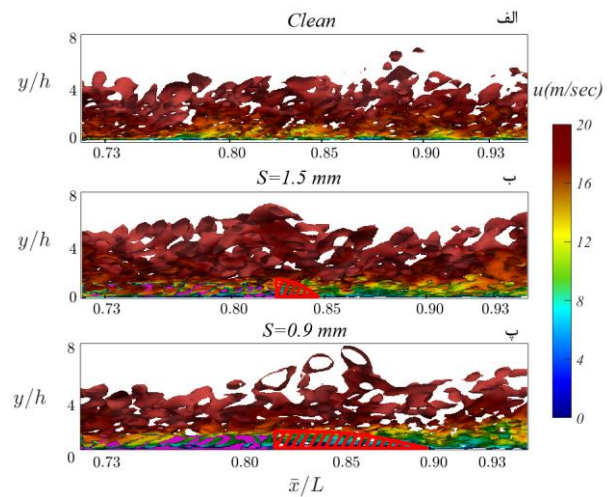
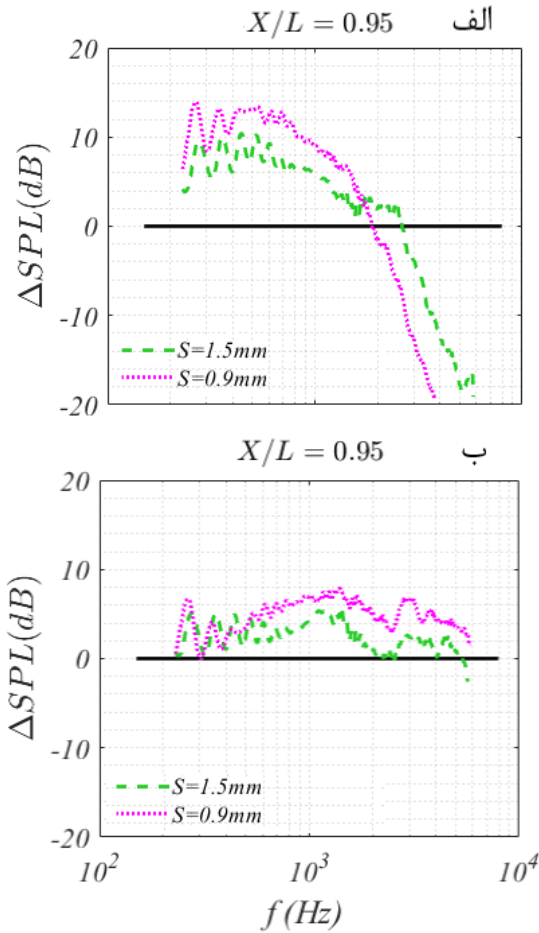
نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فینلت‌ها سبب افزایش ضخامت لایه مرزی شده و کاهش فاصله بین فینلت‌ها سبب ایجاد ساختارهای همدوس بزرگتری در ناحیه دنباله فینلت‌ها شده است. از طرفی با کاهش فاصله عرضی فینلت‌ها (با رنگ صورتی نشان داده شده) و افزایش اثر اصطکاک دیواره فینلت‌ها،

$y/h_F \approx 1$ تشکیل شده است. در این حالت، ماکزیمم شدت آشفتگی در موقعیت طولی دورتری نسبت به لبه فرار فینلت‌ها ($\bar{x}/h_F \approx 11$) رخ داده است. اختلاف مشاهده شده در موقعیت و اندازه ماکزیمم شدت آشفتگی در حالت فاصله عرضی 0.9 میلی‌متر نسبت به فاصله عرضی 1.5 میلی‌متر، با مشاهدات مربوط به موقعیت و اندازه ماکزیمم ضریب فشار برای این نمونه‌ها (شکل ۸ تطابق خوبی دارد).

به منظور مشاهده بهتر اثر فاصله عرضی بین فینلت‌ها بر روی لایه مرزی آشفتگی در محدوده پایین دست فینلت‌ها ($0.7 < x/L < 0.95$)، کانتور شدت آشفتگی (u'^2) در یک موقعیت بسیار نزدیک به سطح ($y/h_F \approx 0.05$) در شکل ۱۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که حضور فینلت‌ها سبب ایجاد کانال‌هایی شده و در نتیجه سطح خیس و استهلاک انرژی بواسطه اصطکاک افزایش می‌یابد. همچنین شدت آشفتگی جریان لایه مرزی کانالیزه شده با عبور از بین فینلت‌ها کاهش یافته و هرچه فاصله عرضی فینلت‌ها کمتر شده، لایه مرزی دیواره فینلت‌ها در فاصله نزدیکتری از لبه جلویی آنها به هم رسیده است.

با توجه به شکل ۱۲ شکل ۱۲ (ب)، برای فاصله عرضی 1.5 میلی‌متر لایه مرزی دیواره فینلت‌ها، تقریباً پس از طی نیمی از طول آنها، به هم رسیده و اثرات اصطکاک از این محدوده به بعد بر کل جریان کانالیزه شده در نزدیکی سطح تاثیر گذاشته و مومنوم جریان را بیش از حالت قبل کاهش می‌دهد. بعلاوه شدت آشفتگی پس از اتصال لایه برشی به سطح و اختلاط با جریان کانالیزه شده در محدوده 85% $x/L \approx$ افزایش یافته است.

در نهایت با توجه به شکل ۱۲ (پ)، مشاهده می‌شود که با کاهش فاصله عرضی بین فینلت‌ها به 0.9 میلی‌متر، جریان کانالیزه شده تقریباً در تمام طول کانال بین فینلت‌ها تحت اثر اصطکاک قرار گرفته و کاهش مومنوم بیشتری نتیجه می‌شود در حالیکه شدت آشفتگی پس از نقطه اتصال لایه برشی به سطح و اختلاط با جریان کانالیزه شده در محدوده 90% $x/L \approx$ بطور قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین برای این فاصله عرضی در بخشی از ناحیه پایین دست فینلت‌ها و



شکل ۱۳ - سطوح همتراز معیار کیو ($Q=1 \times 10^5$)، رنگ آمیزی شده با مقادیر سرعت لحظه‌ای در محدوده $0.71 < x/L < 0.95$.
(الف) حالت مبنا، (ب) فاصله عرضی بین فینلت‌ها $S = 1.5 \text{ mm}$ و (پ) فاصله عرضی بین فینلت‌ها $S = 0.9 \text{ mm}$.

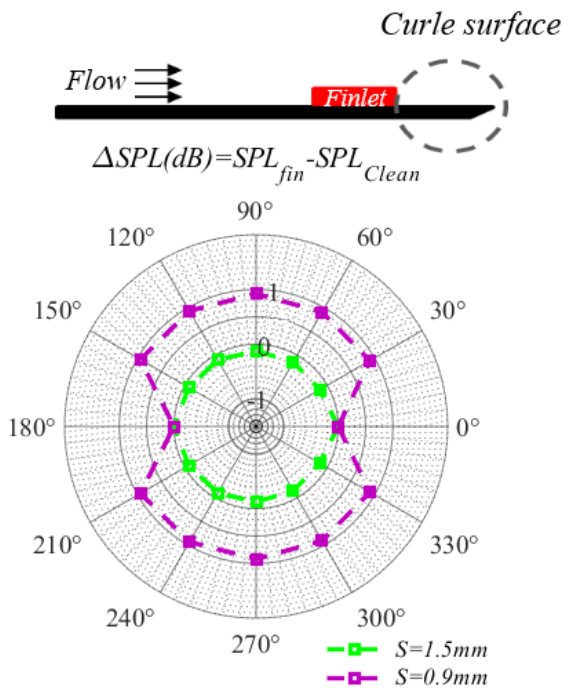
ساختارهای همدوس کوچک بین فینلت‌ها حذف شده و ساختارهای بزرگ با تراکم کمتری دیده می‌شود.

از آنجا که سطوح همتراز معیار کیو نشان‌دهنده نواحی از جریان است که نرخ چرخش بیشتر از نرخ کرنش باشد، بنابراین کاهش تراکم ساختارهای همدوس بین فینلت‌ها می‌تواند بدرستی حذف ساختارهای همبسته کوچک بین فینلت‌ها و کاهش مومنتوم جریان را نشان دهد. همچنین با کاهش فاصله عرضی فینلت‌ها، گستره اثر جریان کم مومنتوم خروجی از بین فینلت‌ها بیشتر شده و حباب جریان برگشتی در پشت فینلت‌ها (ناحیه قرمز رنگ هاشور خورده) تا محدوده دورتری در پایین دست فینلت‌ها توسعه می‌یابد و نقطه اتصال لایه برشی از لبه فرار فینلت‌ها فاصله گرفته است.

اختلاف نوپز دوردست لبه فرار صفحه تخت مجهز به فینلت‌ها با حالت مبنا (صفحه تخت بدون فینلت) که با استفاده از مدل تحلیلی راجر-امیت [۱] در فاصله عمودی $y' = 1 \text{ m}$ از سطح مدل پیش‌بینی شده، مطابق شکل ۱۴ ارائه شده است. بنابراین مقادیر مثبت نشان‌دهنده افزایش و مقادیر منفی نشان‌دهنده کاهش نوپز است.

شکل ۱۴ - اختلاف سطح نوپز پیش‌بینی شده با مدل تحلیلی راجر-امیت [۱] در فاصله عمودی $y' = 1 \text{ m}$ از سطح مدل با دو طول مختلف، (الف) $L = 0.27 \text{ m}$ ، (ب) $L = 0.3 \text{ m}$.

در شکل ۱۴ موقعیت فینلت‌ها نسبت به لبه حمله ثابت مانده ولیکن فاصله بین لبه فرار صفحه تخت تا لبه فرار فینلت‌ها در شکل ۱۴ (الف) به اندازه ۳ سانتیمتر کاهش یافته است. با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که کاربرد فینلت‌های مورد بررسی سبب ایجاد اثرات نامطلوب و افزایش نوپز دوردست لبه فرار در بازه فرکانسی پایین تا میانی شده و با کاهش فاصله عرضی بین فینلت‌ها این اثر نامطلوب تشدید شده است. همچنین می‌توان استنباط کرد که ترکیب گردابه‌های کوچک بواسطه اثر "کوندا"، گردایان فشار و لایه برشی ناشی از حضور فینلت‌ها، سبب شکل‌گیری گردابه‌های بزرگتر با محدوده فرکانسی پایین تا میانی شده است. در نتیجه محتوای انرژی ساختارهای گردابه‌ای در این محدوده فرکانسی افزایش یافته است. با افزایش فاصله لبه فرار صفحه تخت تا لبه فرار فینلت‌ها



شکل ۱۵ - اختلاف اندازه سطح فشار صوتی لبه فرار صفحه تخت تحت اثر فینلت‌ها

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به مطالعه عددی اثر فاصله عرضی فینلت‌های مستطیل شکل بالادست لبه فرار، بر نویز لبه فرار لایه مرزی آشفته صفحه تخت اختصاص یافته است. بدین منظور شبیه‌سازی عددی جریان لایه مرزی آشفته تراکم‌ناپذیر در اطراف صفحه تخت با رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ و شرط مرز ورودی لاند در کد متن‌باز اوپن‌فوم انجام شده است. نتایج نشان داد که استفاده از فینلت‌ها سبب ایجاد گردایان فشار معکوس در لبه حمله فینلت‌ها و پایین‌دست آن‌ها شده و با کاهش فاصله عرضی بین فینلت‌ها این اثر تشدید می‌شود. بعلاوه چگالی طیفی نوسانات فشار سطح تحت اثر فینلت‌ها در بازه فرکانسی پایین تا میانی افزایش و در بازه فرکانس بالا کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش فاصله عرضی فینلت‌ها طول مشخصه عرضی نوسانات فشار سطح افزایش و سرعت جابجایی ساختارهای گردابه‌ای کاهش می‌یابد. نتایج همچنین نشان داد که استفاده از فینلت‌های مورد بررسی سبب کاهش سرعت متوسط و افزایش شدت آشفتگی جریان لایه مرزی در پایین‌دست فینلت‌ها و قبل از رسیدن به لبه فرار صفحه تخت می‌شود. بعلاوه نتایج سطوح هم‌تراز معیار کیو و شدت آشفتگی

(افزایش طول صفحه تخت از ۲۷ به ۳۰ سانتیمتر)، اثر گردایان فشار معکوس و لایه برشی در پایین‌دست فینلت‌ها کاهش یافته است. در نتیجه از شدت اثرات نامطلوب کاسته شده و حداکثر اختلاف سطح نویز از حدود ۱۵ دسی‌بل در فرکانس ۷۰۰ هرتز به حدود ۵ دسی‌بل تقلیل یافته است.

از طرفی در محدوده فرکانس‌های بالا، روندی متفاوت مشاهده شده است. در این محدوده فرکانسی سطح نویز کاهش یافته و با کاهش فاصله عرضی بین فینلت‌ها، گستره بازه فرکانسی و میزان کاهش سطح نویز، افزایش یافته است. لیکن با افزایش فاصله لبه فرار صفحه تخت تا فینلت‌ها، به دلیل افزایش محدوده طولی پایین‌دست نقطه تماس مجدد لایه برشی تا لبه فرار صفحه تخت، محتوای انرژی جریان روی سطح افزایش یافته است. در نتیجه منابع تولید نویز تقویت شده و اثرات نامطلوبی در اندازه سطح صوت پدیدار شده است.

با توجه به تغییرات مشاهده شده در طیف فشار صوت و در شکل ۱۴ (الف) و (ب) به نظر می‌رسد که استفاده از فینلت‌ها با فاصله عرضی مناسب (در این مطالعه ۱/۵ میلی‌متر) و با حداقل فاصله نسبت به لبه فرار صفحه تخت، علیرغم ایجاد اثرات نامطلوب در بازه فرکانسی پایین تا میانی، می‌تواند منجر به کاهش سطح نویز لبه فرار صفحه تخت گردد.

در ادامه، اختلاف اندازه نویز دوردست لبه فرار صفحه تخت در حضور فینلت‌ها با فواصل عرضی مختلف نسبت به حالت مبنا ارائه شده است. در شکل ۱۵ نویز لبه فرار با استفاده از آنالوژی کرل [۱۲] برای آرایه‌ای قطبی از شنونده‌های واقع در در فاصله عمودی $y' = 1m$ از لبه فرار مدل پیش‌بینی شده است. سطح بالایی مدل شامل محدوده بین لبه فرار فینلت‌ها تا لبه فرار صفحه تخت بعنوان سطح تولید نویز در آنالوژی کرل تعریف شده است.

نتایج شکل ۱۵ نشان داده که استفاده از فینلت‌های مستطیل شکل با فاصله عرضی ۱/۵ میلی‌متر، نه تنها سطح نویز دوردست لبه فرار صفحه تخت را افزایش نداده بلکه سطح نویز دوردست را اندکی (حدود ۰/۳ دسی‌بل) کاهش داده است. لیکن با کاهش بیشتر فاصله عرضی فینلت‌ها به ۰/۹ میلی‌متر، سطح نویز دوردست لبه فرار صفحه تخت در حدود ۱ دسی‌بل افزایش یافته است. بنابراین می‌توان فاصله عرضی ۱/۵ میلی‌متر را بعنوان فاصله عرضی مناسب در این مطالعه در نظر گرفت.

همچنين $I = I_1 + I_2$ انتگرال تابش است که I_1 و I_2 به ترتيب مولفه پخش امواج آکوستيکی حول لبه فرار و لبه حمله را محاسبه می کنند. انتگرال تابش با توجه به روابط ذیل قابل محاسبه است.

$$\bar{K} = \omega c / 2U, \bar{K}_{x'} = \omega c / 2U_c, \bar{K}_{y'} = 0$$

$$\alpha = U / U_c, \bar{\mu} = \bar{K}M / \beta^2, \bar{\kappa} = \sqrt{\bar{\mu}^2 - \bar{K}_{y'}^2} / \beta^2$$

I_1 برابر است با:

$$I_1 = (e^{2ic} / iC) \left\{ (1+i) e^{-2ic} \sqrt{B/B-C} E^* [2(B-C)] - (1+i) E^* [2B] \right\}$$

که

$$B = \bar{K}_{x'} + M\bar{\mu} + \bar{\kappa}, C = \bar{K}_{x'} - \bar{\mu}((x'/\sigma) - M)$$

و

$$I_2 = H \left(\left\{ e^{4i\bar{\kappa}} [1 - (1+i) E^* [4\bar{\kappa}]] \right\}^c - e^{2iD} + i [D + \bar{K} + M\bar{\mu} - \bar{\kappa}] G \right)$$

که در اینجا

$$G = \left((1+\varepsilon) e^{i(2\bar{\kappa}+D)} \sin(D-2\bar{\kappa}) / (D-2\bar{\kappa}) + (1-\varepsilon) e^{i(-2\bar{\kappa}+D)} \sin(D+2\bar{\kappa}) / (D+2\bar{\kappa}) + \left(\frac{(1+\varepsilon)(1-i)}{2(D-2\bar{\kappa})} e^{i(4\bar{\kappa})} E^* [4\bar{\kappa}] \right) - \left(\frac{(1-\varepsilon)(1+i)}{2(D+2\bar{\kappa})} e^{-i(4\bar{\kappa})} E^* [4\bar{\kappa}] \right) + \frac{e^{2iD}}{2} \sqrt{\frac{2\bar{\kappa}}{D}} E^* [2D] \left[\frac{(1-\varepsilon)(1+i)}{(D+2\bar{\kappa})} - \frac{(1+\varepsilon)(1-i)}{(D-2\bar{\kappa})} \right] \right)$$

9

نشان داد که با کاهش فاصله عرضی فینلت‌ها، نقطه اتصال لایه برشی به سطح و محدوده پناهگاه برشی متاثر از حضور فینلت‌ها به موقعیت‌های پایین دست تر انتقال می یابد. در نهایت پیش بینی طیف نويز دور دست لبه فرار صفحه تخت با مدل تحلیلی راجر- امیت نشان داد که کاربرد فینلت‌های مورد بررسی سبب ایجاد اثرات نامطلوب و افزایش نويز در بازه فرکانسی پایین تا میانی شده و با کاهش فاصله عرضی بین فینلت‌ها این اثر نامطلوب تشدید شده است. از طرفی در محدوده فرکانس‌های بالا، روندی متفاوت مشاهده شده است. در این محدوده فرکانسی سطح نويز کاهش یافته و با کاهش فاصله عرضی بین فینلت‌ها، گستره بازه فرکانسی و میزان کاهش سطح نويز، افزایش یافته است. در نهایت پیش بینی نويز دور دست با آنالوژی کرل نشان داد که استفاده از فینلت‌های مستطیل شکل با فاصله عرضی ۱/۵ میلی‌متر، نه تنها سطح نويز دور دست لبه فرار صفحه تخت را افزایش نداده بلکه سطح نويز دور دست را اندکی (حدود ۰/۳ دسی بل) کاهش داده است. لیکن با کاهش بیشتر فاصله عرضی فینلت‌ها به ۰/۹ میلی‌متر، سطح نويز دور دست لبه فرار صفحه تخت در حدود ۱ دسی بل افزایش یافته است. بنابراین می توان فاصله عرضی ۱/۵ میلی‌متر را بعنوان فاصله عرضی مناسب در این مطالعه در نظر گرفت.

پی‌نوشت‌ها

- ۱ Dynamic Smagorinsky sub-grid model
- ۲ Low-pass filtering
- ۳ Cut off length
- ۴ Eddy-viscosity
- ۵ Coherence function
- ۶ Time Varying Mapped Fixed Value (TVMF)
- ۷ Dirichlet
- ۸ Neumann boundary condition
- ۹ Probe
- ۱۰ Recirculation Bubble
- ۱۱ Lifting effect
- ۱۲ Shear Sheltering

پیوست

با توجه به مدل تحلیلی راجر-امیت [۱]، σ فاصله تصحیح شده به صورت زیر تعریف می شود.

$$\sigma = \sqrt{x'^2 + \beta^2 z'^2}, \beta^2 = 1 - M^2, M = U / C_0$$

- [9] Bodling, A. & Sharma, A., "Numerical investigation of noise reduction mechanisms in a bio-inspired airfoil", Journal of Sound and Vibration, 453: p. 314-32, 2019.
- [10] Shi, Y., & Lee, S. "Numerical study of 3-D finlets using Reynolds-averaged Navier-Stokes computational fluid dynamics for trailing edge noise reduction", International Journal of Aeroacoustics, 19(1-2): p. 95-118, 2020.
- [11] Shi, Y., & Lee, S. "Numerical Study of 2-D Finlets Using RANS CFD for Trailing Edge Noise Reduction", in 2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2018.
- [12] Curle, N., "The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound", Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 231(1187): p. 505-514, 1955.
- [13] Lilly, D. K., "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method", J Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 3(4): p. 633-635, 1992.
- [14] Lund, T. S., Wu, X., & Squires, K. D., "Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations", Journal of computational physics, 140(2): p. 233-258, 1998.
- [۱۵] فرمانی، محمد؛ دهقان، علی اکبر؛ و افشاری، عباس «تحلیل عددی پارامترهای موثر بر آلودگی صوتی لبه‌فرار جریان لایه مرزی آشفته». نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۲۰۲۱، ۵۳(شماره ۱ (چاپ ویژه): صفحات ۴۵۲-۴۳۷.
- [16] Bendat, J.S. and A.G. Piersol, "Random data: analysis and measurement procedures", Vol. 729.: John Wiley & Sons, 2011.
- [17] Brooks, T.F. and T. Hodgson, "Trailing edge noise prediction from measured surface pressures", Journal of sound and vibration, 78(1): p. 69-117, 1981.
- [18] Corcos, G., "Resolution of pressure in turbulence", The Journal of the Acoustical Society of America, 35(2): p. 192-199, 1963.
- [19] Herrig, A., et al., "Broadband airfoil trailing-edge noise prediction from

$$D = \bar{k} - \bar{\mu}x' / \sigma, H = \frac{(1+i)(1-\theta^2)e^{-4i\bar{k}}}{2\sqrt{\pi}(\alpha-1)\bar{K}\sqrt{B}}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1+1/(4\bar{k})}}, \theta = \sqrt{B/A}, A = \bar{K} + M\bar{\mu} + \bar{k}$$

و E^* به صورت ترکیبی از انتگرال فرنل سینوسی و کسینوسی قابل محاسبه است.

$$E^*(x') = \int_0^{x'} \frac{e^{-it}}{\sqrt{2\pi t}} dt$$

همچنین علامت $\{ \}^c$ در روابط فوق به معنای ضرب قسمت موهومی عبارت داخل کروشه در ε است.

منابع و مراجع

- [1] Roger, M., Moreau, S., & Wang, M. "An analytical model for predicting airfoil self-noise using wall-pressure statistics", in Annual Research Brief, Center for Turbulence Research, Stanford University, p. 405-414, 2002.
- [2] Brooks, T.F., D.S. Pope, and M.A. Marcolini, "Airfoil self-noise and prediction", 1989.
- [3] Oerlemans, S., et al., "Reduction of wind turbine noise using optimized airfoils and trailing-edge serrations", AIAA journal, 47(6): p. 1470-1481, 2009.
- [4] Clark, I. A., et al., "Bioinspired Trailing-Edge Noise Control", AIAA Journal, 55(3): p. 740-754, 2017.
- [5] Afshari, A., et al., "Trailing-edge flow manipulation using streamwise finlets", Journal of Fluid Mechanics, 870: p. 617-650, 2019.
- [6] Afshari, A., et al., "Semi-empirical Investigation of the Effect of Finlet on the Turbulent Boundary Layer Trailing Edge Noise", Modares Mechanical Engineering, 20(8): p. 1951-1965, 2020.
- [۷] افشاری، عباس؛ و همکاران، «بررسی تجربی عملکرد فینلت‌های کاهش دهنده نویز لبه فرار». نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۲۰۲۱.
- [8] Bodling, A., & Sharma, A. "Numerical investigation of low-noise airfoils inspired by the down coat of owls", Bioinspiration & biomimetics, 14(1): p. 016013, 2018.

- measured surface pressures and spanwise length scales*”, International Journal of Aeroacoustics, 12(1-2): p. 53-82, 2013.
- [20] Wagner, C., Hüttl, T., & Sagaut, P., “*Large-eddy simulation for acoustics*”, Vol. 20: Cambridge University Press, 2007.
- [21] Simens, M. P., et al., “*A high-resolution code for turbulent boundary layers*”, Journal of Computational Physics, 228(11): p. 4218-4231, 2009.
- [22] Spalart, P. R., “*Direct simulation of a turbulent boundary layer up to $R_\theta = 1410$* ”, Journal of Fluid Mechanics, 187(-1): p. 61, 1988.
- [23] Choi, H., & Moin, P., “*Effects of the Computational Time Step on Numerical Solutions of Turbulent Flow*”, Journal of Computational Physics, 113(1): p. 1-4, 1994.
- [24] Farabee, T. M., “*Measurements of Fluctuating Wall Pressure for Separated/Reattached Boundary Layer Flows*”, Journal of Vibration and Acoustics, 108(3): p. 301-307, 1986.