

بررسی عددی کاهش نویز آیرودینامیکی جریان روی یک سیلندر مربعی با به کارگیری اسپلیتر

Original Article

ناراله عباسی* (استادیار)

محمد سوری (کارشناس)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک

نوشتر حاضر به بررسی عددی اثر اعمال اسپلیتر واقع در ناحیهی دنباله^۱ یک سیلندر مربعی بر کنترل جریان و کاهش نویز آیرودینامیکی می پردازد. بدین منظور سیلندری با مقطع مربعی با ضلع $D = 10 \text{ mm}$ و اسپلیترهایی با ضخامت ثابت ۲ میلی متر و طول های مختلف ($0 < L < D$) لحاظ شده است. استخراج نویز آیرودینامیک با به کارگیری معادلات URANS و استفاده از مدل توربولانسی $k - \omega - sst$ انجام شده است. همچنین به منظور محاسبه نویز آیرودینامیکی جریان از آنالوژی لایت هیل استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی، سطح فشار صوت به دست آمده در موقعیت های مختلف، با نتایج تجربی مقایسه شده که تطابق خوبی مشاهده شده است. نتایج نشان می دهد که با اعمال اسپلیتر با طولی معادل قطر سیلندر، میزان سطح فشار صوتی به اندازه ۱۵٪، ضریب درگ متوسط به اندازه ۱۵٪ و نوسانات ضریب لیفت به اندازه ۵۵٪ کاهش می یابد. بررسی جزئیات ساختار جریان با اعمال اسپلیتر حکایت از کاهش نوسانات جریان با افزایش منطقه ی ویک و همچنین کاهش نیروهای آیرودینامیکی دارد.

واژگان کلیدی: شبیه سازی عددی جریان، سیلندر مربعی، نویز آیرودینامیکی، صفحه ی اسپلیتر.

s_abbasi@arakut.ac.ir
sourimohammad.mech@gmail.com

۱. مقدمه

در یک بررسی تجربی نویز تولید شده توسط جریان گذرا از یک سیلندر مربعی با زاویه حمله های مختلف در رینولدزهای کم را مورد بررسی قرار داد. کارل^[۴] نیز نویز ناشی از یک جریان پایا با ماخ کم حول سیلندر را بررسی کرده است. استخراج صدای تولید شده ناشی از نوسانات جریان و نیروهای وارد بر آن از جمله نتایج تحقیق اوست. ناکاتو و همکاران^[۵] به بررسی تجربی رخدادهای نویز آیرودینامیکی ناشی از جریان در اطراف یک استوانه ی مستطیلی در طیف وسیعی از اعداد رینولدز بالا بین 10^3 تا 5×10^6 پرداختند.

مارگنات^[۶] به مدل سازی عددی جریان و صدای ایجاد شده توسط سیلندر مستطیلی در رینولدز پایین پرداخته است. در جریان های عبوری از یک جسم ضخیم، رینولدز 20000 و بیشتر معمولاً به عنوان رینولدز بالا در نظر گرفته می شود. به عنوان مثال سوهانکر^[۷] جریان گذرا از یک سیلندر مربعی را با رینولدز 10^3 تا 5×10^6 مورد بررسی قرار داده و رینولدزهای بالای 20000 را به عنوان رینولدزهای بالا تقسیم بندی کرده است. در یک جسم ضخیم با هندسه ی ثابت، تغییرات در عدد رینولدز موجب تغییر در فرکانس ریزش های گردابه یی و ویک نیز می شود. آیکارینو و همکاران^[۸] ضمن بررسی عددی با مدل RANS در جریانی گذرا از یک سیلندر مستطیلی، به مقایسه ی نتایج با داده های تجربی پرداخت. آنها مشاهده

مطالعه ی جریان گذرا از اجسام به دلیل کاربرد فراوانشان در صنعت در حال افزایش است. صدا یا نویز نتیجه ی تغییرات یا نوسانات فشار در محیط الاستیک (مثل هوا، آب و جامد) است که به وسیله ی دیواره ی لوزان یا جریان آشفته به وجود می آیند. وقتی شیئی در معرض جریانی قرار می گیرد به دلیل اندرکنش جریان سیال و جسم منجر به ایجاد نویز آیرودینامیکی بر روی آن می شود. وقوع «ریزش گردابه یی^[۲]» و میدان سرعت نوسانی در پشت سازه ها با ایجاد بارگذاری نوسانی روی سطح می تواند منجر به کاهش عمر سازه و افزایش نویز آکوستیکی و درگ شود. بنابراین مطالعه ی نحوه ی رخدادهای نویز آیرودینامیکی و شناسایی پدیده های مرتبط، به منظور استخراج راهکارهای مناسب برای کاهش نویز ضرورت می یابد. با توجه به کاربرد سیلندره های مربعی در بسیاری از صنایع به ویژه در جریان های حول پل ها، ساختمان ها، رایزرهای دریایی، بررسی نویز و ارتعاشات ناشی از جریان حول آنها توجه محققین زیادی را به خود جلب کرده است. بیرمن^[۱] و لین^[۲] در یک بررسی تجربی سطح فشار صوت حاصل از جریان در سیلندر مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند. فوجیتا^[۳]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۷/۲/۲۲، پذیرش ۱۳۹۷/۳/۱۳.

DOI:10.24200/J40.2018.50222.1456

چشمگیر نویز در زمانی که طول ورقه‌ی اسپلیتر (L) با قطر سیلندر (D) برابر باشند از نتایج تحقیق آنهاست. منیش و همکاران^[۱۷] در بررسی‌های تجربی و چاوهران و همکاران^[۱۸] در یک تحقیق عددی به بررسی اثر اسپلیتر با طول‌های مختلف در یک استوانه مربعی پرداختند. آنها در مطالعاتشان صرفاً بر ساختار جریان و ضرایب آیرودینامیکی تمرکز داشته‌اند و به اثرات جریان بر نویز آیرودینامیکی نپرداخته‌اند. نتایج تحقیقات آنها نشان از کاهش ضریب درگ بر اثر اعمال اسپلیتر دارد.

بررسی تاریخی تحقیقات نشان می‌دهد که مطالعات جریان ناپایا در سیلندرهاى مربعی در جریان‌های با رینولدزهای پایین صورت گرفته است و مطالعات در رینولدزهای بالا انجام نشده است. همچنین اثرات به‌کارگیری اسپلیتر بر کنترل نویز آیرودینامیکی ناشی از جریان روی سیلندر مربعی بررسی نشده است. بنابراین در نوشتار حاضر به بررسی نویز آیرودینامیکی تولید شده در یک سیلندر مربعی و اعمال صفحات اسپلیتر با طول‌های مختلف در محدوده‌ی کمتر از طول استوانه برای کنترل آن در رینولدزهای بالا پرداخته می‌شود. همچنین با بررسی جزئیات ساختار جریان ناپایا، دستیابی به درک عمیق‌تری از نحوه‌ی ریزش گردابه‌ها و اثرگذاری اعمال اسپلیتر بر کاهش یا افزایش صدای تولیدی مد نظر است.

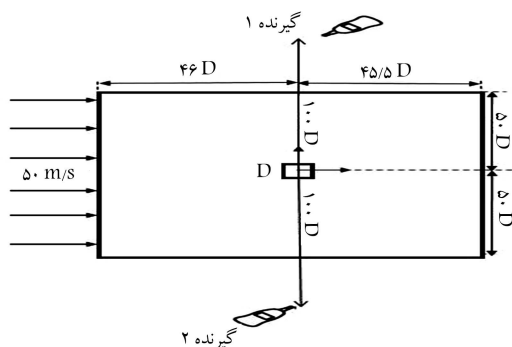
۲. شبیه‌سازی

۲.۱. مدل هندسی

در نوشتار حاضر به بررسی عددی نویز آیرودینامیکی تولید شده از جریان گذرا روی یک سیلندر مربعی خواهیم پرداخت. بدین منظور سیلندری با مقطع مربع با ضلع 10 میلی‌متر در معرض جریانی با سرعت 50 m/s در نظر گرفته شده است. ابعاد و شرایط لحاظ شده برای این سیلندر، مشابه ابعاد مدل اوکتاویانتی و آسای^[۱۹] است که در تحقیق تجربی روی سیلندر انجام داده‌اند. با توجه به این که طول سیلندر 500 میلی‌متر و ضلع آن 10 میلی‌متر است - نسبت طول به قطر خیلی زیاد است - تحلیل جریان به صورت دوبعدی صورت گرفته است. عدد رینولدز و عدد ماخ جریان برای این سیلندر مربعی به ترتیب برابر $10^4 \times 3/3$ و 0.15 است. برای ثبت صدای تولید شده از جریان گذرا از سیلندر از دو گیرنده در موقعیت‌های مختلف استفاده شده است. در شکل ۱ شماتیک سیلندر مربعی مورد بررسی به همراه شرایط مرزی و موقعیت قرارگیری گیرنده‌ها نشان داده شده است.

۲.۲. معادلات حاکم

به منظور تحلیل جریان باید معادلات حاکم - اعم از معادلات پیوستگی، مومنتوم و



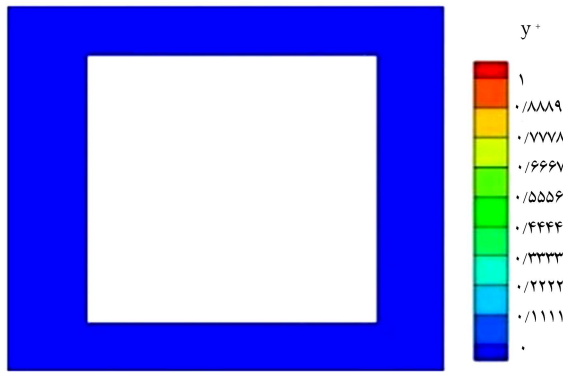
شکل ۱. هندسه و شرایط مرزی.

کردند که مطالعه‌ی عددی پیش‌بینی نسبتاً دقیقی در ریزش‌های گردابه‌ی و نقاط جدایش جریان با روش تجربی دارد. عمده‌ی کاربردهای عملی سیلندرهاى مربعی در رینولدزهای بالا رخ می‌دهد؛ این در حالی است که تحقیقات بسیار کمی پیرامون نویز آیرودینامیکی جریان در اعداد رینولدز بالا انجام شده است. همچنین اطلاعات و تحقیقات تجربی کمی برای اعتبارسنجی نتایج وجود دارد. روکوچو و همکاران^[۹] به بررسی ارتباط بین نوسانات نیروی یک سیلندر مربعی با تولید نویز آیرودینامیکی در اعداد رینولدز بالا پرداختند و مشاهده کردند که با افزایش عدد رینولدز سطح فشار صوتی افزایش می‌یابد.

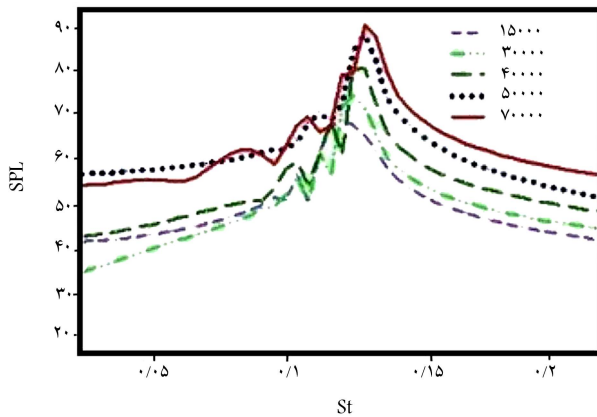
مطالعات مختلفی برای کمک به تغییر یا حذف الگوی ریزش گردابه‌ی ایجاد شده در پشت سیلندر انجام شده است. روش‌های کنترل ریزش گردابه‌ی عمدتاً به دو روش کلی تقسیم می‌شود: ۱. روش غیرفعال کنترلی که از طریق اصلاح شکل جسم یا افزودن جسم خارجی به آن صورت می‌گیرد و منجر به افزایش یا کاهش ریزش گردابه‌ی ایجاد شده می‌شود؛ صفحات اسپلیتر، سیلندرهاى کنترلی، سیم‌های حلقوی از جمله روش‌های کنترل غیرفعال هستند. ۲. روش‌های کنترل فعال - که اخیراً توسعه یافته‌اند - که با اعمال انرژی به میدان جریان ریزش گردابه‌ی را کنترل می‌کنند؛ کنترل فیدبک و سیم‌های محرک آکوستیک، تزریق مکش و دمش، نوسان‌گر دورانی سیلندرها از جمله روش‌های فعال‌اند. روش‌های کنترل غیرفعال در خصوص کنترل جریان کاربرد گسترده دارند و در مقایسه با روش‌های فعال از قابلیت کاربرد ساده‌تر و آسان‌تر برخوردارند. کنترل جریان با به‌کارگیری اجزایی در پایین دست یا بالادست یک جسم، یکی از روش‌های غیرفعال برای کنترل نویز آیرودینامیکی است. در برخی از تحقیقات مشاهده می‌شود که به‌کارگیری هندسه‌های مختلف در پایین دست یک جسم نیز بر کنترل نویز ناشی از جریان تأثیر چشمگیری دارد. دولان^[۱۰] به پیش‌بینی نویز تولید شده در یک استوانه‌ی مربعی با تغییر فاصله‌ی جسم افزوده بر پشت سیلندر پرداخت. از نتایج حاصله مشخص شد با افزودن جسم در پایین دست، نویز آیرودینامیکی کاهش می‌یابد و نیز با فاصله گرفتن از سیلندر درصد کاهش نویز افزایش می‌یابد. چنگ و همکاران^[۱۱] و یوفینگر و همکاران^[۱۲] تأثیر وجود شکل‌های مختلف در پشت یک سیلندر مربعی بر ویک جریان در پشت جسم را مورد بررسی قرار دادند. با اعمال یک گوه چسبیده در پشت آن و در حالت دیگر با یک بیضی چسبیده بر آن، مشخص شد که وجود این گوه در پشت سیلندر مربعی کاهش سطح فشار صوتی را به میزان $4/5$ دسیبل کمتر از جسم بیضی نشان می‌دهد. در میان روش‌های کنترلی غیرفعال، صفحه‌ی اسپلیتری یکی از ایده‌های موفق برای کنترل ریزش گردابه‌ی ایجاد شده در پشت سیلندر است.

علی و همکاران^[۱۳] اثر وجود یک اسپلیتر را بر یک سیلندر مربعی در رینولدز کم ($Re = 150$) مورد بررسی قرار دادند و کاهش سطح صدای تولیدی ناشی از نوسانات جریان را مشاهده کردند. بازگشت لایه‌های برشی به طور قابل توجهی سطح صدای تولیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بررسی آنها نشان داد که بیشترین کاهش سطح فشار صوتی زمانی است که طول اسپلیتر $L = 0.26D$ بوده و فاصله آن تا استوانه‌ی مربعی $G = 0.5/6D$ است. در این حالت سطح فشار صوت 6.3 دسیبل کاهش می‌یابد.

اندرسون و همکاران^[۱۵] به بررسی تجربی تأثیرات اسپلیتر در طول‌های کم و در رینولدزهای $46000 - 27000$ پرداختند. آنها مشاهده کردند که اسپلیترهایی با طول کمتر از $\frac{D}{8}$ نیز می‌توانند تأثیرات زیادی بر ریزش گردابه در منطقه‌ی ویک داشته باشند. از دیگر نتایج حاصله می‌توان به افزایش سطح فشار صوت با افزایش عدد رینولدز اشاره کرد. یو و همکاران^[۱۶] اثر افزودن اسپلیتر بر نویز و فرکانس گردابه در یک سیلندر با مقطع دایره‌ی در رینولدز کم ($Re = 100$) را مورد بررسی قرار دادند. کاهش



شکل ۳. کانتور y^+ در مجاورت دیواره سیلندر مربعی.



شکل ۴. بررسی مستقل شدن نتایج از شبکه بندی.

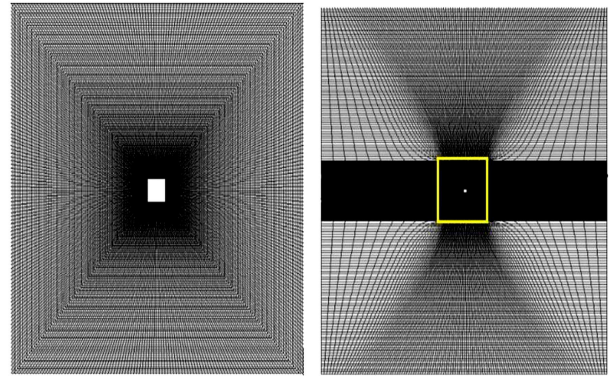
۴.۲. تنظیمات حل

در تحقیق حاضر تحلیل عددی جریان با استفاده از نرم افزار تجاری ANSYS-Fluent صورت گرفته است. حل دقیق زمانی با استفاده از معادلات ناوراستوکس URANS انجام شده است. به منظور تخمین دقیق ادی های ویسکوزیته از مدل توربولانسی $k-\omega-sst$ استفاده شده است. در مرز ورودی، جریان یکنواخت با سرعت 5 m/s و در مرز خروجی جریان، فشار استاتیک خروجی برابر صفر لحاظ شده است. در مرزهای بالا و پایین شرط مرزی دیواره (عدم لغزش) اعمال شده است.

۳. نتایج

۳.۱. بررسی استقلال از شبکه

به منظور اطمینان از صحت شبکه بندی صورت گرفته و تعداد مش های لحاظ شده، استقلال از شبکه برای نتایج تحلیل عددی انجام شده است. بدین منظور شبکه بندی منطقه محاسباتی در اطراف سیلندر در چند حالت انجام شده و سطح فشار صوتی به عنوان یکی از مهمترین نتایج، استخراج و با یکدیگر مقایسه شده است. بدین منظور تعداد المان های 15000 ، 30000 ، 40000 ، 50000 و 70000 در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ نمودار سطح فشار صوتی برحسب عدد اشتروال ($SPL - st$) برای گیرنده ی ۱ در تعداد شبکه های مختلف با استفاده از نرم افزار sigmaplot نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش تعداد شبکه از 15000 تا 50000 نودار سطح فشار صوتی تغییرات محسوسی را در فرکانس های



شکل ۲. نحوه ی شبکه بندی سیلندر مربعی.

معادله ی انرژی (روابط ۱ و ۲) - را حل کرد:

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i u_j - \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

که در آن ρ ، u ، P به ترتیب فشار استاتیکی، سرعت و چگالی سیال است؛ همچنین x_i و x_j جهت جریان و جهت متقابل جریان را نشان می دهند. u_j و u_i مؤلفه های سرعت و سرعت متوسط و $\overline{u_i u_j}$ در رابطه، معرف تنش رینولدز هستند. به منظور تحلیل نویز ناشی از جریان، علاوه بر حل معادلات ناور - استوکس، معادلات اف فوکس ویلیامز - هاوکینز (رابطه ی ۳ و ۴) [۲۰] که اساساً معادله ی موج ناهمگن هستند باید حل شود:

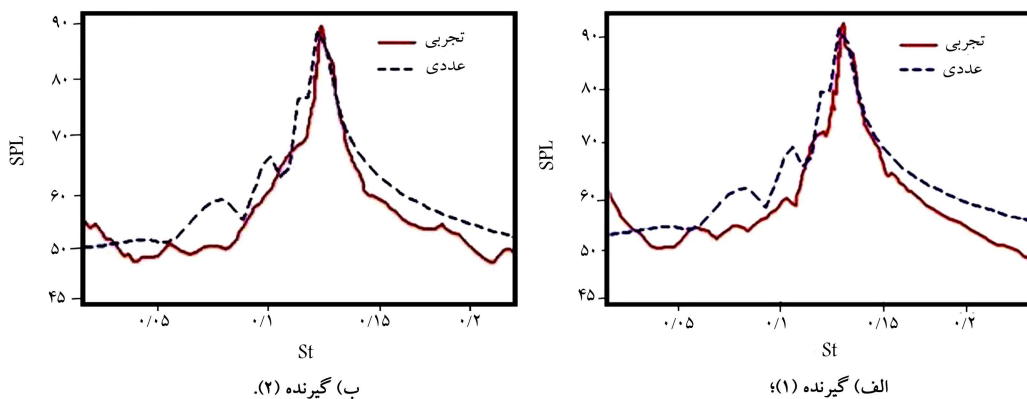
$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} - C_s^2 \Delta^2 (\rho - \rho_0) = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} (X, t) \quad (3)$$

$$T_{ij} = \rho u_i u_j - \tau_{ij} + \delta_{ij} ((\rho - \rho_0) - C_s^2 (\rho - \rho_0)) \quad (4)$$

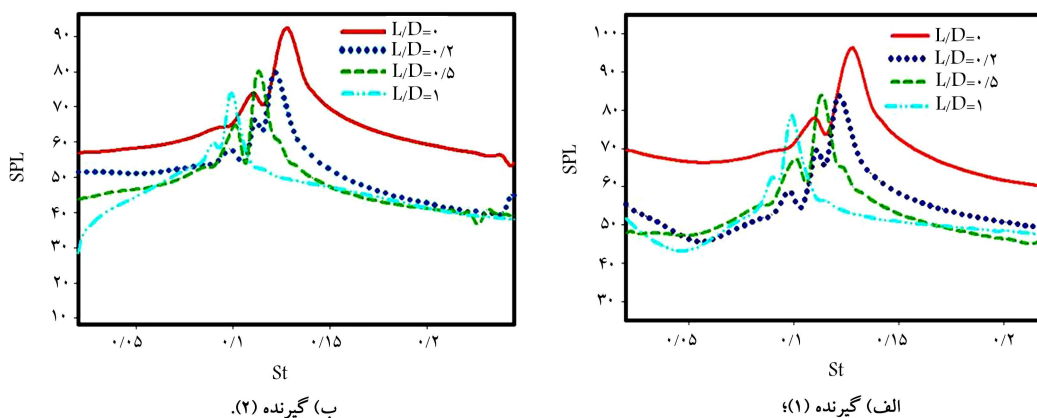
در روابط فوق C_s سرعت صوت در میدان دور دست است. T_{ij} تانسور تنش لایت هیل است. همچنین ρ ، δ_{ij} ، τ_{ij} به ترتیب معرف تنش ویسکوز، دلتای کرونگر، تراکم لحظه یی و فشار هستند.

۳.۲. شبکه بندی

با توجه به این که هدف از تحقیق حاضر، بررسی نویز ناشی از جریان سیال گذرا بر سیلندر مربعی است، تخمین دقیق آشفستگی های جریان از اهمیت زیادی برخوردار است. برای تخمین درست گرادیان های شدید سرعت نیز، شبکه بندی دقیق به ویژه در نزدیکی دیواره لازم و ضروری است. در شکل ۲ نحوه ی شبکه بندی جریان در اطراف استوانه ی مربعی نشان داده شده است. به منظور نمایش بهتر شبکه بندی در اطراف سیلندر، بزرگ نمایی آن در سمت راست نشان داده شده است. شبکه بندی انجام شده به نحوی است که y^+ در مجاورت دیواره کمتر از ۱ است. در شکل ۳ کانتور y^+ در نمای نزدیک سیلندر مربعی نشان داده شده است.



شکل ۵. نمودار مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی.



شکل ۶. مقایسه‌ی تراز شدت صوت در حالت‌های مختلف.

می‌یابد، به گونه‌ی که در $L/D = 1$ نسبت به حالت $L/D = 0.2$ ، کاهش در شدت نویز تولید شده 7% بیشتر می‌شود. مشخص است که بیشینه شدت صوت با افزودن اسپلیتر در عدد اشتروهال کمتری رخ می‌دهد. بنابراین افزودن اسپلیتر موجب کاهش فرکانس ریزش‌های گردابه‌ی در ناحیه‌ی ویک می‌شود. بنابراین اعمال اسپلیتر منجر به کاهش همزمان شدت صوت و فرکانس ریزش گردابه‌ی می‌شود.

مقایسه‌ی نمودارها برای گیرنده‌های ۱ و ۲ نشان‌گر یکسان بودن رفتار جریان در اثر اعمال اسپلیتر در این دو موقعیت است. با توجه به یکسان بودن فاصله‌ی گیرنده‌ها از منبع صوت، سطح فشار صوت در نسبت‌های مختلف L/D یکسان است. به‌منظور مقایسه‌ی میزان تغییرات سطح فشار صوتی و فرکانس ریزش گردابه‌ی با اعمال اسپلیتر نمودار تغییرات این پارامترها در L/D های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش نسبت L/D عدد اشتروهال و تراز شدت صوت هر دو کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۷ الف، با افزایش L/D شیب نمودار کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش L/D نویز آیرودینامیکی کاهش می‌یابد اما این کاهش یکنواخت نیست، بلکه در مقادیر کم L/D میزان کاهش نویز بیشتر است؛ اما با افزایش طول اسپلیتر شیب نمودار کاهش می‌یابد، به‌طوری که افزودن اسپلیتری با $L/D = 0.2$ منجر به کاهش حدود 10° دسیبل در تراز شدت صوت می‌شود. این در حالی است که در $L/D = 1$ میزان کاهش در حدود 19° دسیبل است که با توجه به طول اضافه شدن این تغییر تناسب خطی ندارد.

همان‌طور که مشاهده شد جدایش جریان در رینولدزهای خاص در جریان حول یک سیلندر منجر به وقوع ریزش گردابه‌ی می‌شود. ریزش گردابه‌ی در پشت

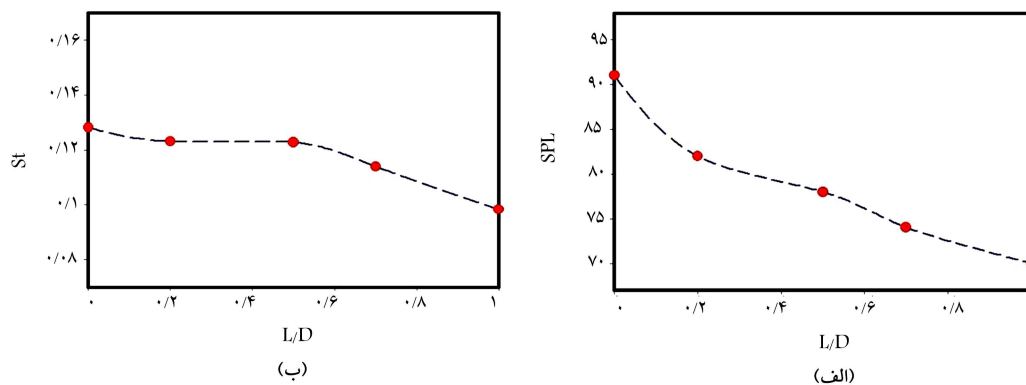
مختلف نشان می‌دهند. این در حالی است که با افزایش تعداد المان‌ها از 50000 تا 70000 تغییر چندانی در نتایج مشاهده نمی‌شود. بنابراین تعداد 50000 المان برای تحلیل عددی حاضر انتخاب شده است.

۲.۳. اعتبارسنجی نتایج

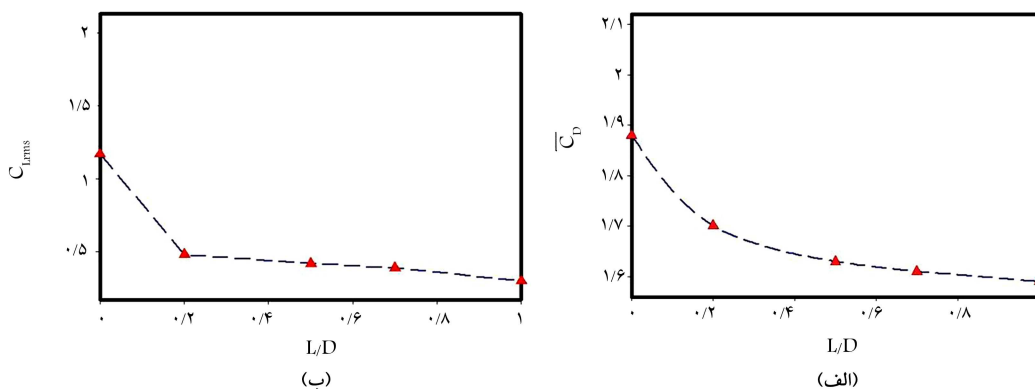
به‌منظور اعتبارسنجی، نتایج تحقیق حاضر با نتایج تجربی پیشین^[۱۹] مقایسه شده است. در شکل ۵ نمودار سطح فشار صوت برحسب عدد اشتروهال حاصل از حل عددی حاضر در مقایسه با نتایج تجربی در موقعیت گیرنده‌ی ۱ و ۲ نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود تطابق خوبی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد. مشخص است که بیشترین شدت صوت در هر دو روش عددی و تجربی در عدد اشتروهال 0.13 رخ می‌دهد.

۳.۳. تأثیر اسپلیتر بر نویز

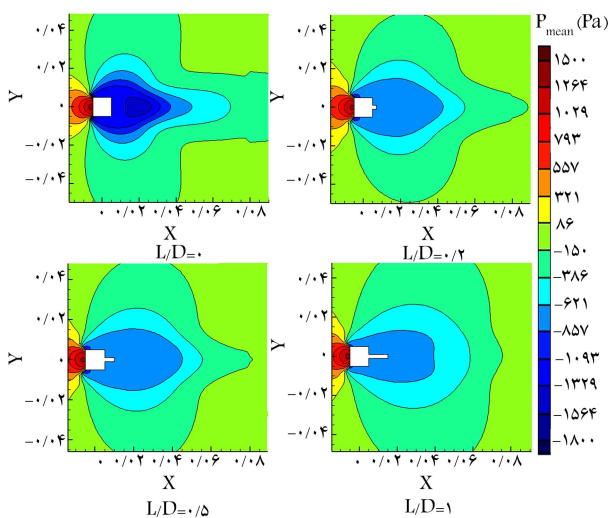
به منظور بررسی اثر طول اسپلیتر بر نویز ناشی از جریان، اسپلیترهایی با طول‌های مختلف در نظر گرفته شده است؛ D طول سیلندر مربعی و L طول اسپلیتر است. در شکل ۶ اثر وجود اسپلیتر با طول‌های مختلف بر ایجاد نویز آیرودینامیکی، در قالب نمودار تراز شدت صوت برحسب عدد اشتروهال برای گیرنده‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، با افزودن اسپلیتر با طول $L/D = 0.2$ میزان سطح فشار صوتی 12% کاهش می‌یابد. همچنین مشخص است که هرچه طول اسپلیتر اضافه شده (تا طول $1D$) بزرگ‌تر می‌شود نویز آیرودینامیکی بیشتر کاهش



شکل ۷. نمودار شدت صوت و عدد اشتروهال بر حسب طول اسپلیتر (L/D).



شکل ۸. نمودار ضرایب درگ و لیفت متوسط بر حسب طول اسپلیتر (L/D).



شکل ۹. کانتور متوسط فشار استاتیکی در حالت‌های مختلف سیلندر مربعی.

شده (P_{mean}) زمانی نشان داده شده است. مشخص است با اعمال اسپلیتر فشار پایین دست نسبت به حالت بدون اسپلیتر افزایش یافته و اختلاف فشار بالادست و پایین دست کاهش می‌یابد. این امر منجر به کاهش مقدار متوسط ضریب درگ می‌شود.

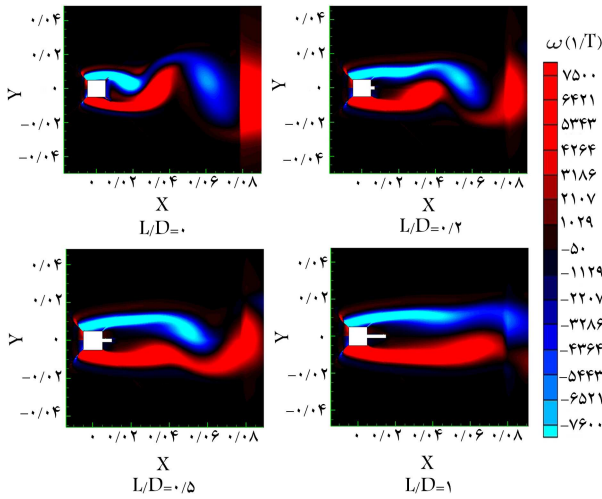
در شکل ۱۰ کانتور تنش‌های رینولدز (Re_{ij}) در حالت‌های سیلندر بدون اسپلیتر و با اسپلیتر با طول‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل مشخص

سیلندر ناشی از تداخل لایه‌های برشی با علامت مختلف است که از دو طرف سیلندر خارج می‌شود. ریزش گردابه‌ها در پشت یک سیلندر به صورت دوره‌یی منجر به نوسان میدان جریان و نیروهای اعمال شده بر استوانه و ایجاد ارتعاشات سازه‌یی می‌شود. بنابراین بررسی مقادیر C_L و C_D با افزودن اسپلیتر اهمیت زیادی دارد. با توجه به ماهیت نوسانی مقادیر C_L و C_D در یک استوانه مربعی، به منظور تسهیل در مقایسه‌ی نتایج، مقادیر متوسط درگ و نوسانات لیفت آن با استفاده از روابط ۵ و ۶ در حالت‌های مختلف سیلندر مربعی ($\frac{L}{D}$ ‌های مختلف) قابل استخراج است. در شکل ۸ مقادیر متوسط ضرایب درگ و نوسانات لیفت در $\frac{L}{D}$ ‌های مختلف نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش طول اسپلیتر، مقادیر C_{Lrms} و $\overline{C_D}$ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش طول اسپلیتر ضرایب لیفت و درگ کاهش بیشتری خواهد داشت:

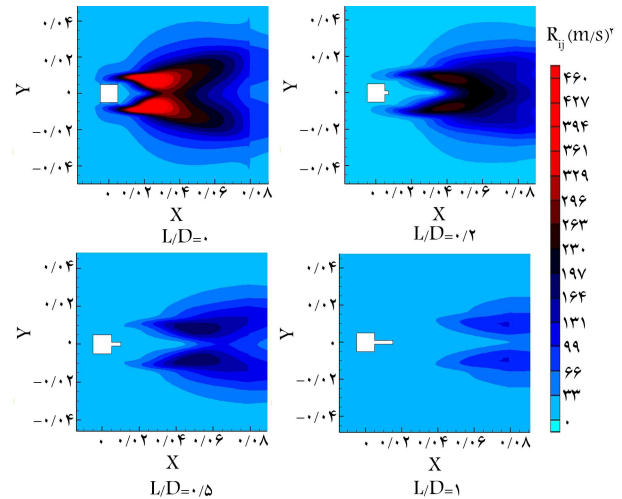
$$\overline{C_D} = \frac{\sum C_D(t)t}{\sum t} \quad (5)$$

$$C_{(Lrms)} = \sqrt{\frac{\sum_i (C_{Li} - \overline{C_L})^2}{N}} \quad (6)$$

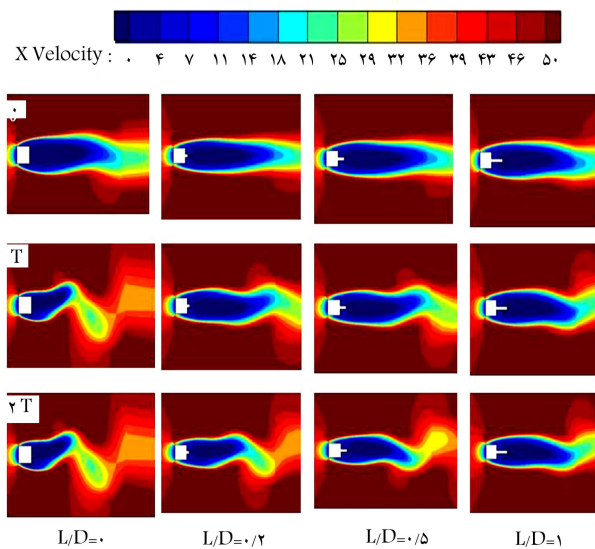
کاهش نویز آیرودینامیکی و مقادیر نیروهای لیفت و درگ ناشی از تغییر ساختار جریان در اثر اعمال اسپلیتر در ناحیه‌ی ویک سیلندر مربعی است. در ادامه به بررسی اثر وجود اسپلیتر با طول‌های مختلف بر ساختار جریان ناپایا، ساختار جریان ویک و ریزش‌های گردابه‌یی ایجاد شده در سیلندر مربعی با استفاده از نرم‌افزار Tecplot خواهیم پرداخت. در شکل ۹ کانتور مقادیر فشار استاتیکی متوسط‌گیری



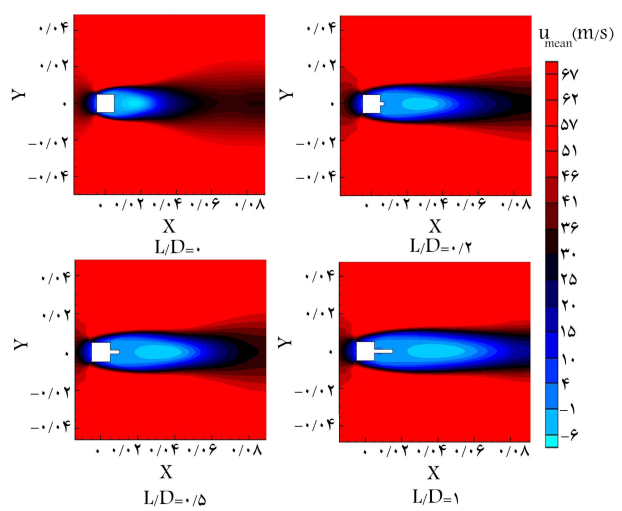
شکل ۱۲. مقایسه‌ی کانطور ورتیسیتی در حالت‌های مختلف سیلندر مربعی.



شکل ۱۰. کانطور تنش رینولدز در حالت‌های مختلف سیلندر مربعی.



شکل ۱۳. کانطور سرعت لحظه‌یی در سیلندر مربعی در حالت‌های مختلف.

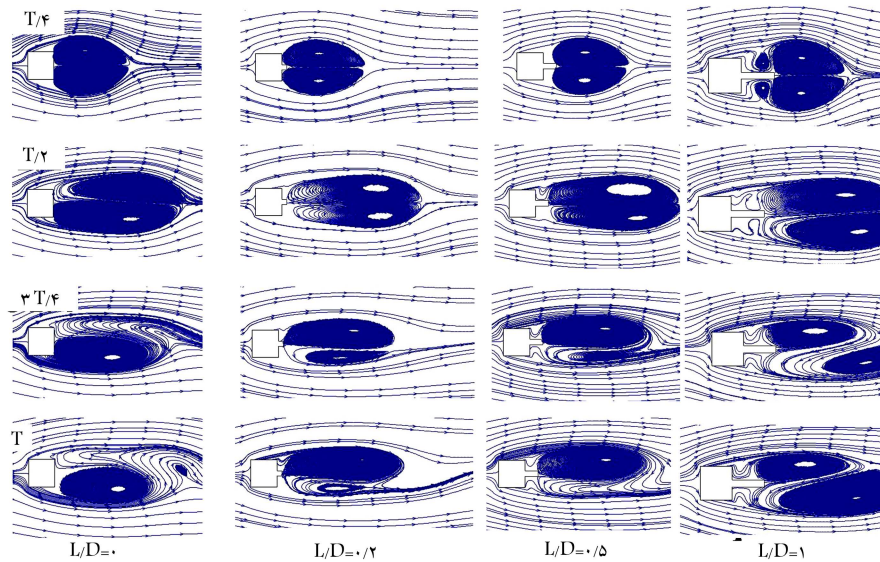


شکل ۱۱. کانطور متوسط سرعت در حالت‌های مختلف سیلندر مربعی.

در شکل ۱۲ به بررسی کانطورهای ورتیسیتی ω حالت‌های مختلف پرداخته شده است. کانطورهای ورتیسیتی در حالت بدون اسپلیتر، ورتیسیتی بصورت فشرده و نزدیک سیلندر باقی می‌ماند. در حالی‌که با اعمال اسپلیتر، با کشیده شدن لایه‌های برشی و امتداد منطقه‌ی ویک، مناطق با ورتیسیتی مثبت و منفی به سمت پایین دست کشیده می‌شوند که این امر موجب عدم ایجاد ریزش گردابه‌یی شده است. صفحات اسپلیتر به لایه‌های برشی اجازه می‌دهند که قبل از تشکیل گردابه با مقیاس بزرگ به پایین دست منتقل شوند بنابراین زمان بیشتری برای تشکیل گردابه نیاز است و این امر منجر به کاهش فرکانس گردابه می‌شود. با افزودن اسپلیتر لایه‌های برشی به صورت متناوب در دو طرف صفحه به سمت مرکز کشیده شده و تعامل بین قسمت‌های بالا و پایین صفحه آزاد است و لایه‌های برشی توسط صفحات از بین می‌روند که از تشکیل خیابان کارمن جلوگیری می‌شود. به منظور بررسی ساختار جریان با گذر زمان، کانطور سرعت برای $\frac{L}{D}$ های مختلف در دوره‌های مختلف زمانی $3T - 0$ (T) زمان یک دوره تشکیل گردابه در حالت بدون اسپلیتر است) در شکل ۱۳ نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود صفحات اسپلیتر مانع شکستن لایه‌های برشی می‌شوند و این امر منجر به توسعه و کشیده شدن لایه‌های برشی و منطقه‌ی ویک

است که در حالت بدون اسپلیتر، مقادیر تنش رینولدز در موقعیت‌های نزدیک به سیلندر که محل تشکیل گردابه‌ها و رشد نوسانات است افزایش یافته است. همچنین مشخص است که با افزودن اسپلیتر در پشت سیلندر مربعی، لایه‌های برشی مثبت و منفی که از سطح بالا و پایین سیلندر خارج می‌شوند قبل از این که به سمت یکدیگر جذب شوند توسعه یافته و قبل از این که بچرخند به سمت پایین دست جریان هدایت می‌شوند. در شکل مقادیر بزرگ تنش‌های رینولدز (در حالت بدون اسپلیتر) نشان‌دهنده‌ی لایه‌های برشی جدا شده است. با افزودن اسپلیتر مشخص است نقاط کانونی که نشان‌گر بیشترین تنش‌های رینولدز است به محلی در پایین دست منتقل شده و مقدار تنش‌های رینولدز نیز کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۱ میدان‌های بردار سرعت متوسط‌گیری شده (u_{mean}) در حالت‌های مختلف نشان داده شده است. مشخص است که با اعمال اسپلیتر، منطقه‌ی ویک در پایین دست سیلندر ناشی از تداخل صفحه با جریان حالت کشیده‌تری می‌گیرد که نشان از ضعیف شدن ریزش گردابه‌یی است. در حالی‌که این منطقه در جهت عمودی در تمامی حالت‌ها یکسان است. با توجه به قرارگیری صفحات اسپلیتر در مرکز تقارن سیلندر مربعی ساختار ویک متقارنی در پایین دست سیلندر ایجاد شده است.



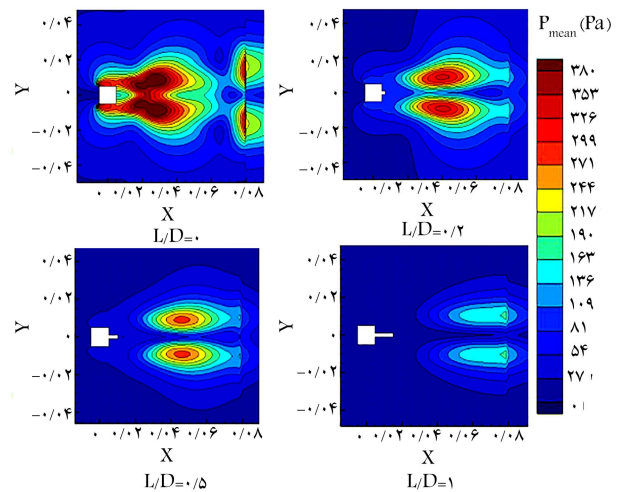
شکل ۱۴. مقایسه‌ی نمودار خطوط جریان در حالت‌های مختلف سیلندر مربعی.

گردابه و نوسانات مشاهده می‌شود. با افزودن اسپلیتر حتی به اندازه $L/D = 0/2$ علاوه بر کاهش میزان نوسانات، محدوده‌ی وقوع نوسانات کوچک‌تر و از سطح استوانه و قسمت یک آن نیز دورتر شده است، به نحوی که در $L/D = 1$ محدوده‌ی بسیار کوچکی از جریان تحت نوسان قرار گرفته است. بررسی مقادیر نوسانات نشان می‌دهد که در این حالت بیشینه نوسانات فشار استاتیک از حدود 400 (در حالت بدون اسپلیتر) به کمتر از 220 رسیده است. نتایج به دست آمده از این کانتور و نمودارهای شکل ۸ نشان‌دهنده‌ی کاهش دامنه‌ی نوسانات جریان با اعمال اسپلیتر است. وقوع نوسانات جریان با دامنه کمتر منجر به کاهش دامنه‌ی نویز آیرودینامیکی و سطح فشار صوتی می‌شود (شکل ۷).

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی عددی اثر قرارگیری صفحات اسپلیتر در ناحیه‌ی یک سیلندر مربعی بر روی ریزش گردابه‌ی و نویز آیرودینامیکی تولید شده در رینولدز $10^4 \times 3/3$ پرداختیم. شبیه‌سازی جریان با استفاده از معادلات URNS و به‌کارگیری مدل توربولانسی $k - \omega - sst$ و محاسبات نویز آیرودینامیکی ناشی از جریان با استفاده از آنالوژی لایت‌هیل انجام شد. سیلندر با مقطع مربعی با قطر $(D = 10 \text{ mm})$ و اسپلیتر با ضخامت ثابت 2 میلی‌متر و طول‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور اعتبارسنجی، سطح فشار صوت به دست آمده در موقعیت‌های مختلف، با نتایج تجربی مقایسه شده و تطابق خوبی مشاهده شده است. با بررسی ساختار جریان ناپایا و نویز آیرودینامیکی اثرات زیر برای صفحات اسپلیتر شناسایی می‌شود:

- افزودن اسپلیتر با طولی برابر با $(1D)$ منجر به کاهش همزمان شدت صوت به اندازه حدود 15% و کاهش فرکانس ریزش گردابه‌ی به اندازه 30% می‌شود.
- افزودن اسپلیتر منجر به کاهش مقادیر متوسط درگ و نوسانات لیفت می‌شود و هرچه طول اسپلیتر بیشتر شود این مقادیر بیشتر کاهش می‌یابند.
- به‌طور کلی با افزودن اسپلیتر ریزش گردابه با فاصله‌ی بیشتری از سیلندر رخ می‌دهد.



شکل ۱۵. کانتور نوسانات فشار استاتیک در حالت‌های مختلف سیلندر مربعی.

در امتداد جریان می‌شود. بدین صورت از انتقال ممتوم، از جریان آزاد به منطقه‌ی یک، نیز جلوگیری می‌شود. بررسی کانتورهای سرعت در گذر زمان، نشان می‌دهد که با اعمال اسپلیتر فرایند ایجاد تا اضمحلال گردابه‌ها در زمان بیشتری رخ می‌دهد. همچنین با افزایش طول اسپلیتر زمان یک دوره تشکیل گردابه افزایش می‌یابد. این نتیجه کاملاً منطبق با نتایج به دست آمده در شکل ۶ است. به عبارت دیگر با اعمال اسپلیتر و افزایش زمان رخداد گردابه، فرکانس ایجاد گردابه‌ها کاهش یافته و بنابراین عدد اشتروال کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۴ توپولوژی خطوط جریان در یک دوره تشکیل گردابه برای حالت‌های مختلف نشان داده شده است. در این شکل رخداد گردابه‌های ایجاد شده در نوک صفحه‌ی اسپلیتر با اعمال اسپلیتر کاملاً مشخص است.

در شکل ۱۵ کانتور مقادیر نوسانات فشار استاتیک $(P_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N P_n^2}{N}})$ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در حالت بدون اسپلیتر مقادیر نوسانات به شدت زیاد است و حوزی وسیعی از میدان جریان در پشت سیلندر ناشی از وقوع

L : طول اسپلیتر؛
 Exp : روش تجربی؛
 Num : روش عددی؛
 Re : عدد رینولدز؛
 SPL : تراز شدت صوت؛
 St : عدد اشتروهاال؛
 CD : ضریب درگ؛
 CL : ضریب لیفت؛
 \overline{CD} : ضریب درگ متوسط‌گیری شده؛
 $CLrms$: ضریب نوسانات لیفت؛
 U_{rms}^* : تنش رینولدز؛
 P_{rms} : نوسانات فشار؛
 T : دوره تناوب؛
 ω : ورتیسیتی.

به عبارت دیگر با افزودن اسپلیتر گردابه در نوک اسپلیتر ایجاد می‌شود که موجب افزایش طولی گردابه و همچنین افزایش زمان تشکیل یک چرخه گردابه می‌شود. با افزودن اسپلیتر با طولی برابر با ضلع سیلندر اختلاف فشار متوسط‌گیری شده جلو و پشت سیلندر حدود ۰.۴٪ کاهش می‌یابد که این امر منجر به کاهش متوسط درگ در حدود ۱۶٪ می‌شود. بررسی ساختار جریان نشان می‌دهد که افزودن اسپلیتر موجب می‌شود که لایه‌های برشی به صورت متناوب در دو طرف صفحه به سمت مرکز کشیده شده و لایه‌های برشی توسط صفحات از بین بروند و از تشکیل خیابان کارمن جلوگیری شود. افزودن اسپلیتر با طول (1D) موجب کاهش تنش رینولدز در حدود ۶۰٪ می‌شود. همچنین نوسانات فشار در حدود ۵۰٪ کاهش یافته است.

فهرست علائم
 D : ضلع مربع؛

پانویس‌ها

1. wake
2. vortex shedding

منابع (References)

1. Bearman, P.W. and Obasaju, E.D. "An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders", *J. Fluid Mech*, **119**, pp.297-321 (1982).
2. Lyn, D.A., Einav, S., Rodi, W. and et al. "A laser-doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristic flow near wake of a square cylinder", *J. Fluid Mech*, **304**, pp. 285-319 (1995).
3. Fujita, H., Sha, W. and Suzuki, H. "Experimental investigations and prediction of aero-dynamic sound generated from square cylinders", *In 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, P.2369 (1998).
4. Curle, N. "The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **231**, pp. 505-514 (1955).
5. Nakato, S.N. "Characteristics of aerodynamic sound from rectangular cylinder with various angle of attack (in Japanese)", *J. Jpn. Soc. Civ. Eng*, **696**, pp.145-155 (2002).
6. Margnat, F. "Hybrid prediction of the aerodynamic noise radiated by a rectangular cylinder at incidence", *Comput. Fluids*, **109**, pp. 13-26 (2015).
7. Sohankar, A. "Flow over a bluff body from moderate to high Reynolds numbers using large eddy simulation", *Computers and Fluids*, **35**(10), pp. 1154-1168 (2006).
8. Iaccarino, G., Ooi, A., Durbin, P.A. and et al. "Reynolds averaged simulation of unsteady separated flow", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **24**, pp. 147-156 (2003).
9. Akira Rokugou. "Numerical analysis of aerodynamic sound radiated from rectangular cylinder", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, **96**, pp. 2203-2216 (2008).
10. Doolan, C.J. "Computational bluff body aerodynamic noise prediction using a statistical approach", *Appl. Acoust*, **71**, pp. 1194-1203 (2010).
11. Cheng, M. and Liu, G. "Effects of afterbody shape on flow around prismatic cylinders", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, **84**, pp. 181-196 (2000).
12. Uffinger, T., Becker, S. and Antonio, D. "Investigations of the flow field around different wall-mounted square cylinder stump geometries", in: 14th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, pp.7-10 (2008).
13. Ali, M.S.M., Doolan, C.J. and Wheatley, V. "The sound generated by a square cylinder with a splitter plate at low Reynolds number", *J. Sound Vib*, **330**, pp. 3620-3635 (2011).
14. Ali, M.S.M., Doolan, C.D. and Wheatley, V. "Aeolian tone generated by a square cylinder with a splitter plate", *In: Proceedings of 20th International Congress on Acoustics*, ICA, Sydney, Australia, pp. 23-27 August, pp. 1-8 (2010).
15. Anderson, A. and Szewczyk, A.A. "Effects of a splitter plate on the near wake of a circular cylinder in 2 and 3-dimensional flow configurations", *Experiments in Fluids*, **23**, pp.1961-1967 (1997).

16. You, D.H., Choi, H., Choi, M.R. and et al. "Control of flow-induced noise behind a circular cylinder using splitter plates", *AIAA J.*, **36**(11), pp.1961-1967 (1998).
17. Chauhan, M.K., More, B.S., Dutta, S. and et al. , "Experimental investigation of flow over a square cylinder with an attached splitter plate at intermediate Reynolds number", *Journal of Fluids and Structures*, **76**, pp. 319-335 (2018).
18. Chauhan, M.K., More, B.S., Dutta, S. and et al. "Effect of attached type splitter plate length over a square prism in subcritical reynolds number", *In: FMFP - Contemporary Research. In: Lecture Notes in Mech. Eng*, **1**(122), pp. 1283-1292 (2017).
19. Octaviany, R. and Asai, M. "Effects of short splitter plates on vortex shedding and sound generation in low past two side-by-side square cylinders", *Experiments in Fluids*, **57**(9), p.143 (2016)
20. Lighthill, M.J. "On sound generated aerodynamically", I. General Theory. *Proc. Roy.Soc. London*, A211, page 564 (1952).