



بررسی تاثیر ارتفاع صفحات پیچان بر دنباله استوانه

عبدالامیر بک خوشنویس^{۱*}، مجتبی بلوکی^۲ و میترا یادگاری^۳

^۱ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
^۳ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
 مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۲

چکیده

در این پژوهش، به بررسی تجربی دنباله استوانه با صفحات پیچان در عدد رینولدز $Re = 20000$ پرداخته شده است. روی سیلندر، تعداد ۳ عدد صفحه با گام پیچش ۳D و فواصل مساوی، نصب شده است. ضخامت (ارتفاع) صفحات نصب شده، نسبت به قطر سیلندر برابر با ۰/۱ و ۰/۰۹، ۰/۰۷، ۰/۰۵ H/D است. اثرات صفحات پیچان بر پروفیل‌های سرعت متوسط، شدت اغتشاشات، سرعت نقصانی و عدد استروهال در خط مرکزی سیلندر، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش، نشان می‌دهد که استفاده از صفحات پیچان با ارتفاع‌های مختلف، تاثیرات متفاوتی بر ساختار دنباله دارد، به گونه‌ای که این بررسی را می‌توان در دو محدوده نزدیک به مدل ($x \leq D$) و دور از مدل ($x > D$) در نظر گرفت. نتایج، بیانگر آن است که در ناحیه نزدیک مدل، استفاده از صفحات با ضخامت بیشتر، سبب بهبود دنباله و کاهش نقصان سرعت می‌شود، در حالی که در نواحی دور از مدل، استفاده از صفحه با ارتفاع $H/D = 0.07$ سبب بهبود تا ۳۵٪ در کاهش میزان نقصان سرعت می‌شود، همچنین استفاده از صفحات پیچان، سبب ۱۴٪ کاهش در مقدار حداکثر اغتشاشات در دنباله استوانه می‌شود.

کلمات کلیدی: دنباله؛ صفحات پیچان؛ استوانه دایره‌ای؛ جریان سنج سیم داغ؛ عدد استروهال.

The Investigation of the Effect of the Helical Strakes'height on the Cylindrical Wake

A. Bak Khoshnevis^{1,*}, M. Bolouki², M. Yadegari³

¹ Associate Professor, Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Hakim Sabzevari, University, Sabzevar, Iran.

² M.Sc student, Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Hakim Sabzevari, University, Sabzevar, Iran.

³ PhD student, Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Hakim Sabzevari, University, Sabzevar, Iran.

Abstract

In this study, the wake behind a cylinder with helical strakes at $Re = 20000$ is experimentally investigated. Three helical strakes with a pitch of 3D and equal distances were installed on the cylinder. The ratios of strakes heights (thicknesses) to cylinder diameter (H/D) were 0.1, 0.09, 0.07 and 0.05. The effects of helical strakes on the mean velocity profile, turbulence intensity, velocity defect and Strouhal number of the cylinder on its center line were studied. The results showed that using helical strakes with varying heights results in different effects on the wake structure, which can be demonstrated in near ($x \leq D$) and far ($x > D$) regions downstream, behind the model. In the near regions, planes with higher thickness resulted in improved wake and reduced velocity defect, while in the far regions, using the plane with an H/D of 0.07 led to up to 35% decrease in velocity deficit. Rotating planes helical strakes were also seen to reduce maximum turbulence by 14%.

Keywords: Wake; Helical Strakes; Circular Cylinder; Hot Wire Anemometry; Strouhal Number.

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۳۲۲۰۷۴۲

آدرس پست الکترونیک: khoshnevis@hsu.ac.ir

۱- مقدمه

جریان اطراف یک استوانه، از مسائل اساسی در زمینه مهندسی است و تحقیقات متعددی در این زمینه وجود دارد. بررسی آیرودینامیک استوانه‌ها از صدسال قبل، مورد مطالعه قرار گرفته است. جریان لزج غیر قابل تراکم، اطراف یک استوانه دایره‌ای از مسائل کلاسیک مکانیک سیالات بشمار می‌رود و علیرغم هندسه ساده، جریان حول آن بسیار پیچیده است. جریان روی استوانه بصورت عملی با بسیاری از کاربردهای مهندسی همچون صنایع هوافضا، اتومبیل‌سازی، ساخت آسمان خراش‌ها، ستون پل‌ها، دودکش‌ها و دکل‌های مخابراتی و... درگیر است. دنباله جریان استوانه می‌تواند باعث نیروهای ناپایایی گردد که توانایی بسیاری در تخریب تمام ساختارهای بدنه‌ای دارد. علت تحقیقات روی این‌گونه پیکربندی، ناشی از علاقه به فهم بارهای روی ساختارها با توجه به حرکت سیال و کنترل بیشتر جریان سیال برای کاهش تاثیرات مخرب نیروهای سیالی است. از آنجایی که روش‌های نظری و محاسباتی، هنوز با طراحی عملی فاصله دارد، از روش‌های تجربی استفاده می‌کنند که یکی از این روش‌ها، استفاده از تونل باد است که جزو روش‌های پیش‌تاز جهت تعیین درست پارامترهای جریان به شمار می‌رود [۱]. نیروهای ناپایدار تشکیل شده در پشت استوانه‌ها، ناشی از گردابه‌های جدا شده از سطح استوانه است که کنترل شدت ریزش این گردابه‌ها، سبب کنترل در شدت نیروهای ناشی از گردابه‌ها نیز است. از نمونه تجهیزاتی که در کاهش نوسانات ناشی از گردابه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌توان به مواردی مانند، سیم اغتشاش ساز، صفحات پیچان یا کابل‌های پیچیده شده حول دودکش و صفحات تثبیت کننده متصل شده به دودکش اشاره کرد. مطالعات فراوانی در زمینه کنترل دنباله سیلندرهای دایروی بر مبنای تصحیح سطح جسم با استفاده از سیم اغتشاش ساز انجام شده است که می‌توان به مطالعات خوشنویس و پدram [۲]، آلام و همکاران [۳]، اکمکی و راکول [۴]، آراجو و همکاران [۵]، خوشنویس و همکاران [۶] و آیدین و همکاران [۷] اشاره کرد. از نقطه نظر عملی، استفاده و اثربخشی صفحات تثبیت کننده دودکش، به جهت باد وابسته است؛ همچنین به جهت مؤثر بودن کابل‌ها، بایستی آنها را با قطرهای بالاتری در نظر گرفت که نتیجتاً در عمل، باعث بروز مشکل در اتصال آنها به دودکش می‌شود؛

بنابراین به نظر می‌رسد که صفحات پیچان، منطقی‌ترین و عملی‌ترین راه‌حل، جهت کاهش نوسانات ناشی از گردابه‌ها می‌باشند [۸]. خوشنویس و همکاران [۹]، به بررسی تاثیر سیم اغتشاش ساز بر دنباله سیلندر دایروی پرداختند، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از سیم اغتشاش ساز، سبب کاهش بیشینه شدت اغتشاشات در دنباله سیلندر می‌شود؛ همچنین نصب سیم اغتشاش ساز روی سیلندر، علاوه بر کاهش میزان نقصان سرعت، کاهش ضریب پسا را نیز به دنبال دارد. خوشنویس و کرمی [۱۰]، به بررسی تاثیر سیم اغتشاش ساز بر دنباله سیلندر دایروی و ایرفویل متقارن و مقایسه آن‌ها با یکدیگر پرداختند، این بررسی نشان داد که عرض پروفیل‌های سرعت با افزایش قطر سیم، افزایش می‌یابد؛ همچنین در مقایسه با ایرفویل، استفاده از سیم اغتشاش ساز با قطر بالاتر، سبب کاهش ضریب پسای ایرفویل می‌شود. خوشنویس و همکاران [۱۱]، به بررسی اثرات جریان باد بر دنباله سیم‌ها و کابل‌های انتقال نیرو و نگه‌دارنده پرداختند، نتایج این بررسی نشان داد که زبری سطح ناشی از دوران سیم‌ها در کابل، سبب افزایش اغتشاشات و مومنتوم جریان شده و جریان جدا شده از سطح را مجدداً به مدل می‌چسباند؛ همچنین مشخص شد که برای یک کابل با مشخصات معین در سرعت‌های بالاتر، مقدار ضریب پسا کمتر از سرعت‌های پایین‌تر است. ژو و همکاران [۱۲]، لرزش‌های ناشی از گردابه‌های یک سیلندر با صفحات پیچان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش که روی یک استوانه دایروی با صفحات پیچان انجام شده بود، نشان داد که استفاده از صفحات پیچان می‌تواند تا ۹۸٪ در کاهش نوسانات ناشی از گردابه‌ها کارایی داشته باشد، همچنین استفاده از صفحات پیچان، سبب پیشگیری از بروز پدیده تشدید می‌شود. جورجکیس و کلیسل [۱۳]، به مقایسه کابل پل‌ها با صفحات پیچان و الگوی حفر شده روی سطح پرداختند. این پژوهش روی یک سیلندر دایروی با قطر ۱۸۰ میلی‌متر انجام شد و تاثیر تصحیح سطح بر مشخصه‌های آیرودینامیکی سیلندر سنجیده شد. نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از الگوی حفر شده سبب تسریع دامنه رینولدز بحرانی می‌شود، از طرفی مشاهده شد که در سرعت‌های بالا، تاثیر صفحات پیچان و الگوی حفر شده بر مقدار نیروی پسا، یکسان بوده و سبب کاهش آن می‌شود.

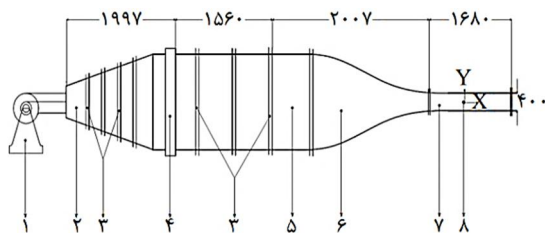
نوسانات سیلندر شده و شدت آن را بصورت چشمگیری کاهش می‌دهد. نتایج این بررسی نشان داد که به جهت تاثیر گذاری بیشتر صفحات پیچان در کاهش نوسانات بهتر است، ارتفاع صفحات، بیشتر از ضخامت لایه مرزی اطراف سیلندر باشد. کنستانتینیدس و آکلی [۱۹]، به بررسی عددی تاثیر صفحات پیچان بر دنباله یک سیلندر صلب در مقایسه با سیلندر صاف پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد، در محدوده نزدیک به مدل، خطوط جریان در جهت Z نیز حرکت می‌کنند که این امر، ناشی از جریان یافتن سیال در لایه‌های صفحات پیچان است. آن‌ها مشاهده کردند که استفاده از صفحات پیچان، سبب محدودیت در تداخل دو لایه برشی جدا شده از سیلندر می‌شود. با توجه به مطالب ارائه شده، مطالعات در زمینه صفحات پیچان عموماً به دو دسته کلی تقسیم بندی می‌شود، نخست تاثیر صفحات پیچان بر لرزش-های استوانه و نیروهای وارده از طرف سیال به مدل، دوم تاثیرات صفحات پیچان بر ساختار جریان اطراف و پشت مدل (دنباله)، بررسی‌ها در زمینه دنباله استوانه با صفحات پیچان، محدود بوده و عموماً نواحی نزدیک به مدل، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است، این در حالی است که در پژوهش حاضر، نواحی دور از مدل نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مطالعه مناطق دورتر، امکان بررسی دنباله و تاثیرات آن، بر سایر اجسام پشت مدل را فراهم می‌نماید.

مطالعات صورت گرفته در این زمینه، اغلب در زمینه بررسی نوسانات ناشی از گردابه‌ها و مقدار نیروی پسای سیلندر با صفحات پیچان بوده است. هدف از این پژوهش، بررسی اثرات نصب صفحات پیچان و همچنین ضخامت آن روی مشخصه‌های دنباله سیلندر دایروی می‌باشد، به گونه‌ای که روند تغییر پروفیل‌های سرعت و اغتشاشات استوانه در حالت صاف و با صفحات پیچان باهم مقایسه شده و میزان تاثیر گذاری ضخامت‌های مختلف صفحات پیچان سنجیده شده است.

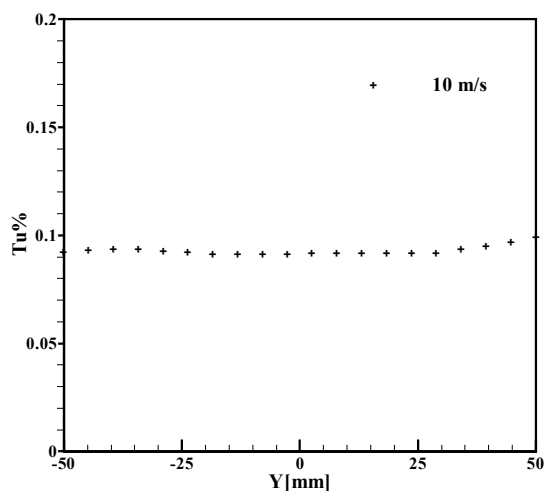
۲- تجهیزات آزمایشگاهی

تمامی آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه تونل باد دانشگاه حکیم سبزواری انجام شده است. تونل باد این آزمایش، از نوع مدار باز و دمشی بوده که اتاقک آزمایش آن از جنس پلکسی گلاس با طول ۱۶۸ cm و مقطع

هوانگ و سورن [۱۴]، ضرائب هیدرودینامیکی دو سیلندر با صفحات پیچان در آرایش‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که سیلندر با صفحات پیچان که در دنباله سیلندر مشابه خود قرار دارد، از مقدار نیروی برای بیشتری نسبت به سیلندر بالا دست برخوردار است؛ همچنین استفاده از صفحات پیچان، سبب افزایش میزان ضریب پسا برای هردو سیلندر پایین دست و بالا دست در مقایسه با سیلندر صاف می‌شود. اکمکی [۱۵] به مقایسه تاثیر وایر کوچک صاف و پیچان بر دنباله سیلندر دایروی در رینولدز زیر بحرانی ۱۰۰۰۰ پرداخت. وی نشان داد که استفاده از وایر پیچان با قطر کمتر، تاثیر بسزایی در شدت و انسجام گردابه‌های کارمن ندارد؛ همچنین در این عدد رینولدز، تاثیر استفاده از وایر پیچان و صاف بر مشخصات دنباله، یکسان بوده و بعنوان مثال، سبب کاهش میزان نوسانات در دنباله می‌شود. وان‌های و همکاران [۱۶]، به بررسی تاثیر شکل مقطع صفحات پیچان بر سرکوب لرزش‌های ناشی از گردابه‌ها برای یک سیلندر انعطاف پذیر بلند پرداختند. آنها صفحات با سطح مقطع مربعی و دایروی با نسبت ابعاد یکسان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از صفحات با مقطع دایروی در مقایسه با صفحات با مقطع مربعی در اعداد رینولدز پایین، از کارایی کمتری در کاهش میزان نیروی پسا برخوردارند، این در حالی است که در رینولدزهای بالا استفاده از صفحات پیچان، سبب کاهش میزان ضریب پسا شده، اما سطح مقطع آن تاثیر بسزایی ندارد. چن و همکاران [۱۷]، به مطالعه عددی سرکوب لرزش‌های ناشی از گردابه‌ها در یک میله انعطاف پذیر با استفاده از صفحات پیچان پرداختند. آنها با بررسی همزمان دینامیک سیالات محاسباتی و دینامیک ساختاری محاسباتی برای یک سیلندر انعطاف پذیر بلند دریافتند که افزایش تعداد و ارتفاع صفحات و کاهش گام پیچش صفحات، سبب افزایش راندمان صفحات پیچان در کاهش فرکانس ریزش گردابه‌ها می‌شود. کوئن و همکاران [۱۸]، کارایی تعداد صفحات پیچان در کاهش نوسانات ناشی از گردابه‌ها را با تعداد ۲ و ۳ عدد صفحه بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که سیلندر با ۲ عدد صفحه پیچان مانند سیلندر صاف، دارای نوسانات سیکلی و منظم اما با شدت کمتر است، از طرفی ۳ عدد صفحه پیچان، سبب بروز بی‌قاعدگی در



شکل ۱- نمای شماتیک تونل مدار باز دمشی شامل اجزاء:
 ۱- فن سانتریفیوژ ۲- دیفیوزر ۳- توری ۴- لانه زنبوری
 ۵- اتاق آرامش ۶- نازل ۷- محفظه آزمون
 ۸- مدل مورد استفاده



شکل ۲- شدت اغتشاشات در اتاقک آزمون

صفحات پیچان، سه پارامتر اساسی وجود دارد که شامل ارتفاع (ضخامت)، گام پیچش و تعداد صفحات روی استوانه است.

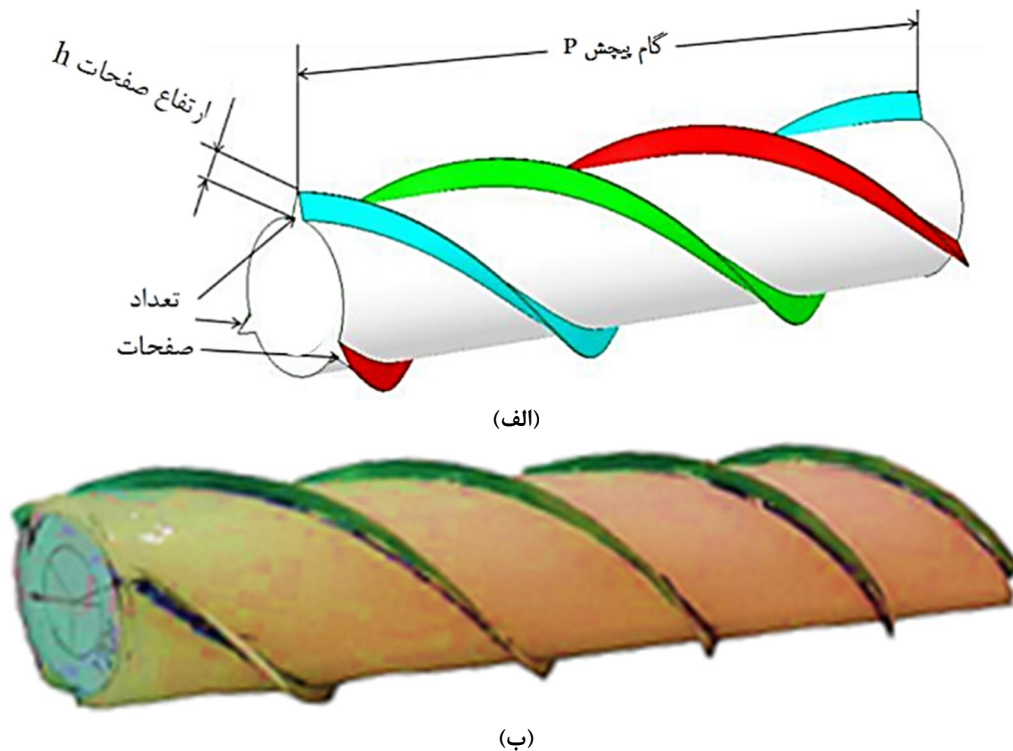
در مدل آزمایش حاضر، مقدار ارتفاع صفحات متغیر مسئله بوده و گام و تعداد صفحات، ثابت باقی می‌ماند. صفحات با ارتفاع‌های ۱/۵، ۲/۱، ۲/۷ و ۳ میلی‌متر انتخاب شده‌اند که با توجه به قطر مدل نسبت ارتفاع صفحات به قطر مدل $(\frac{H}{D})$ به ترتیب برابر با ۰/۰۵، ۰/۰۷، ۰/۰۹ و ۰/۱ است. گام پیچش صفحات در این مسئله برابر با ۳D و تعداد ۳ صفحه با فواصل مساوی است.

به جهت بررسی دنباله استوانه با صفحات پیچان، پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاشات برای هفت موقعیت طولی در پشت استوانه ۱۵، ۱۰، ۵، ۲/۵، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ $x/D=$ اندازه‌گیری و در نهایت، تغییرات فرکانس ریزش گردابه‌ها و

شکل ۱ نمای تونل باد مدار باز دمشی $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ است. ابعاد (بر حسب میلیمتر) آن را نشان می‌دهد. دستگاه جریان سنج سیم داغ، یکی از ابزارهای اصلی اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال است. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد این دستگاه، کاربرد آن انجام آزمایش جریان‌های آشفته گاز یا مایع است. باد سنج استفاده شده در این پژوهش، از نوع دما ثابت است که توانایی اندازه‌گیری سرعت متوسط، اغتشاشات و فرکانس ریزش گردابه‌ها از پشت استوانه را دارد. طراحی مناسب کانال، سبب ایجاد شدت اغتشاشات جریان آزاد در حدود ۰/۱٪ در جهت جریان شده است که در شکل ۲ میزان اغتشاشات اندازه‌گیری شده جریان ورودی در اتاق آزمون در شرایط آزمایش، نمایش داده شده است. پراب یک بعدی استفاده شده در این آزمایش‌ها، ساخت شرکت فراسنجش صبا بوده و دارای حسگری به طول ۱/۲۵ میلی‌متر و قطر $5\ \mu\text{m}$ است. برای حرکت پراب در نقاط مختلف از یک مکانیزم دقیق با سه درجه آزادی استفاده شده است. دقت این مکانیزم انتقال پراب ۰/۱ mm است. جابجایی این مکانیزم، توسط نرم افزار کنترل شده و موقعیت پراب در هر لحظه قابل ثبت است؛ همچنین این مکانیزم به منظور افزایش دقت داده برداری روی قاب‌های جداگانه‌ای از بدنه تونل باد نصب شده است تا از انتقال لرزش‌های احتمالی بدنه تونل به پراب، جلوگیری به عمل آید. در طی این پژوهش تجربی، آزمایش‌ها در دمای تقریباً یکنواخت هوای محیط انجام شده است. تغییرات دمای محیط در حدود ± 3 درجه سلسیوس بوده که به سبب تهویه هوای داخل اتاقک آزمایش، تغییرات دمایی اندکی در هنگام و در طی فرآیند کالیبراسیون پراب سیم داغ، تغییرات دمایی در حدود $\pm 0/5$ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد.

۳- شرح مسأله

استوانه استفاده شده در آزمایش‌ها از جنس تفلون پلی تترا فلئور اتیلن بوده و دارای طول ۳۹۰mm و قطر ۳۰ mm است. صفحات پیچان مورد استفاده در این آزمایش از جنس کاغذ ضخیم، انتخاب شده است که در برابر جریان باد، دچار تغییر شکل نشود و شکل پذیری مناسب، جهت پیچش را داشته باشد. تصویری از استوانه با صفحات پیچان بصورت شماتیک (الف) و مدل اصلی (ب) نمایش داده شده است. در بحث



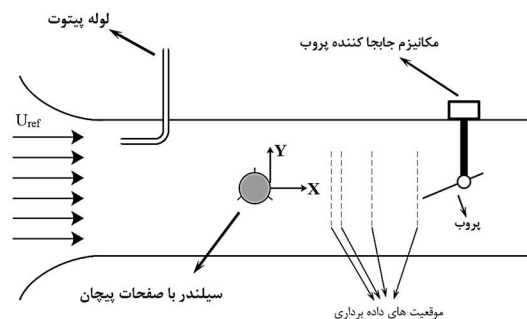
شکل ۳- طرحواره مدل مورد آزمایش؛ الف) نمونه شماتیک و ب) نمونه اصلی

۴- اعتبار سنجی

در ابتدا، به منظور صحت عملکرد دستگاه تونل باد و جریان سنج سیم داغ، یک نمونه داده برداری صورت گرفته و با کار مطعمنی [۲۰] مقایسه شده است. نمودارهای سرعت متوسط و شدت اغتشاشات برای یک استوانه دایره‌ای در عدد رینولدز ۱۲۰۰۰ در ایستگاه $x/D = 2$ در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتیجه کار حاضر و کار مطعمنی [۲۰] مشاهده می‌شود؛ همچنین نتایج پروفیل سرعت متوسط با رابطه ارائه شده توسط شلختینگ [۲۱] در شکل ۶ مقایسه شده است که در این رابطه سرعت جریان آزاد، U سرعت محلی، y ارتفاع هر نقطه و b_h عرض دنباله است. لازم به ذکر است که رابطه (۱) از جایگزینی مقادیر بدست آمده از آزمایش حاضر ($C_D=1/22$ و $x=450\text{ mm}$) بدست آمده است.

$$\frac{(U_{ref} - U)}{U_{ref}} = 0.3815 \left(1 - \left(\frac{y}{b_h} \right)^{\frac{3}{2}} \right)^2 \quad (1)$$

تغییرات ضریب پسا، اندازه‌گیری و محاسبه شده است. شکل ۴ طرحواره‌ای از محل نصب مدل و موقعیت‌های داده برداری را نمایش می‌دهد. نتایج حاصل از سیلندر با صفحات پیچان با سیلندر صاف در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ مقایسه و بررسی شده است. عدد رینولدز بر اساس قطر استوانه صاف و سرعت جریان آزاد ($Re = U_{ref} \cdot D/v$) محاسبه شده است.



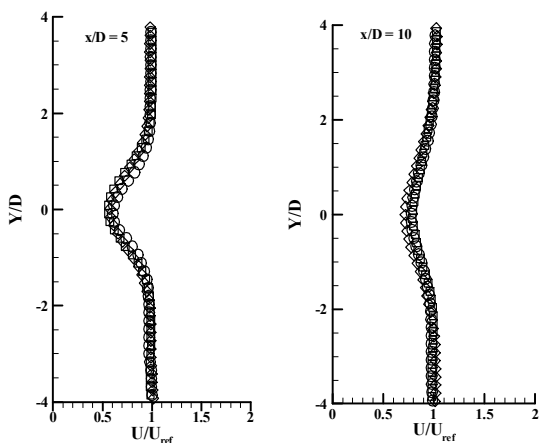
شکل ۴- طرحواره محل نصب مدل و ایستگاه‌های داده برداری

$H/D = .05, 0.07, 0.09, .1$ و صفحات با ضخامت‌های 20000 پرداخته شده است.

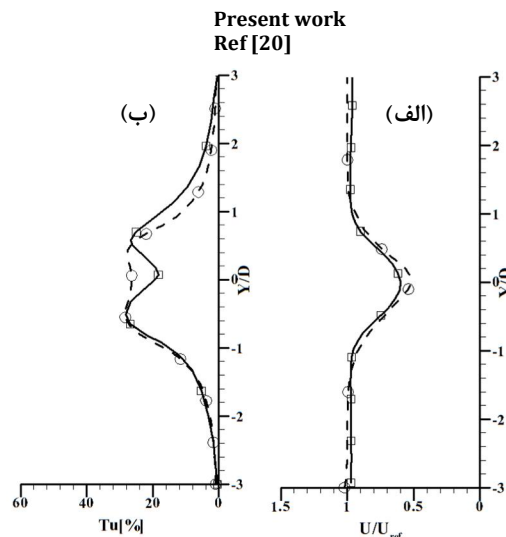
۵-۱- بررسی جریان در راستای سیلندر

تمامی اندازه‌گیری‌ها در این پژوهش، در وسط مدل سیلندری موجود صورت گرفته است، با توجه به ماهیت پیشی صفحات در خط مرکزی استوانه، تغییرات پروفیل سرعت بازای یک گام پیشی (۹۰ میلی‌متر) به طرفین در راستای محور Z برای عدد رینولدز 20000 با صفحات پیچان با ضخامت $H/D=0.05$ و در ایستگاه‌های 10 و 5 $x/d=$ مورد بررسی قرار گرفت.

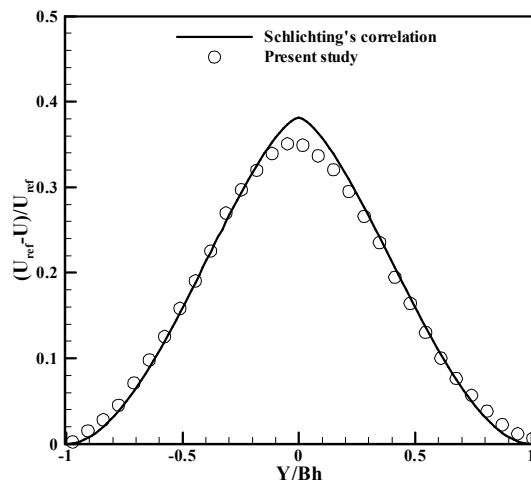
همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، پروفیل‌های سرعت بازای یک گام پیشی، مطابقت خوبی با پروفیل خط مرکزی دارد، بگونه‌ای که در ایستگاه $x/d=5$ بیشینه خط داخل دنباله بر اساس پروفیل خط مرکزی، برابر با $6/55\%$ و در ایستگاه $x/d=10$ این مقدار، برابر با $9/3\%$ است که مطابقت خوبی با بررسی آزمایشگاهی ژو و همکاران [۱۲] و مطالعات عددی کنستانتینیدس و اُکلی [۱۹] دارد. این موضوع نشان دهنده ثابت بودن رژیم جریان، بازای هرگام در طول استوانه است که نقاط متناظر هندسی، دارای دنباله یکسان می‌باشند؛ لذا با توجه به تعداد صفحات پیچیده شده دور استوانه، نقطه متناظر هندسی با نقطه مرجع اندازه‌گیری بازای هر $1/3 P$ تکرار خواهد شد که این مقدار، برابر با یک قطر (1D) سیلندر خواهد بود.



شکل ۷- تغییرات سرعت متوسط بی بعد در راستای محور Z



شکل ۵- مقایسه پروفیل سرعت متوسط بی بعد و شدت اغتشاشات برای الف) نتایج مطالعه حاضر و ب) نتایج مطعنی [۲۰]



شکل ۶- مقایسه سرعت متوسط با رابطه شلیختینگ [۲۱]

مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین کار حاضر با رابطه شلیختینگ [۲۱] وجود دارد.

۵- تحلیل نتایج

همان طور که اشاره شد، در این پژوهش به بررسی تاثیر صفحات پیچان بر دنباله سیلندر دایروی در عدد رینولدز

هستیم، بگونه‌ای که مقدار نقصان سرعت، روند کاهشی افزایش دارد. علت این امر را می‌توان در تاثیر صفحات پیچان دانست. طبق مطالعات عددی کنستانتینیدس و اُکلی [۱۹]، جریان کانال یافته در لابلای صفحات روی استوانه در جهت z نیز حرکت می‌کند. همین امر، سبب افزایش نقصان سرعت در ایستگاه‌های نزدیک مدل می‌شود. در ایستگاه‌های نزدیک به مدل ($x \leq D$) به سبب کم بودن فشار، اختلاف فشار زیاد با جریان پتانسیل بوجود می‌آید. در این حالت تغییرات سرعت از داخل دنباله به جریان پتانسیل در طرفین مدل، بسیار شدید است؛ به عبارتی سرعت در بالا و پایین مدل، گرادیان شدیدی پیدا می‌کند که همین امر، سبب تجاوز سرعت در طرفین مدل از سرعت جریان آزاد می‌شود. تدریجاً با دور شدن از مدل ($x > D$)، این اثر از بین می‌رود که در شکل ۸ کاملاً مشهود است. با دور شدن از مدل ($x > D$) تدریجاً تاثیرات صفحات پیچان بر گردابه‌ها کمتر شده و دنباله به جریان آزاد رسوخ می‌کند، همانطور که مشاهده می‌شود، در ایستگاه ۴ و ۵ صفحات پیچان نسبت به سیلندر صاف، از کارایی کمتری برخوردار هستند. علت این امر، در تاثیرات گردابه‌ها می‌تواند باشد. در ایستگاه‌های اولیه، مقدار سرعت اندازه‌گیری شده برآیندی از سرعت U و V است [۱]، با دور شدن از مدل و از ایستگاه ۴ و ۵ به بعد، این اثر از بین می‌رود. این پدیده را می‌توان، متأثر از تغییرات رفتار جریان شامل از بین رفتن جریان‌های برگشتی، یکنواخت شدن جریان و کم شدن اثرات جدایی جریان از موقعیت‌های ابتدایی به انتهای داده‌برداری دانست. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از صفحات پیچان، سبب از بین رفتن سریعتر دنباله در مقایسه با سیلندر صاف می‌شود، با توجه به شکل ۸ تاثیر گذاری صفحات پیچان در نواحی دور از مدل، تقریباً یکسان بوده و بطور متوسط سبب کاهش ۱۴ درصدی در مقدار کمینه سرعت، در دنباله می‌شوند. این مقدار در حداکثر خود برای سیلندر با صفحات پیچان با نسبت ارتفاع $H/D=0.5$ برابر با $0.35/4$ است.

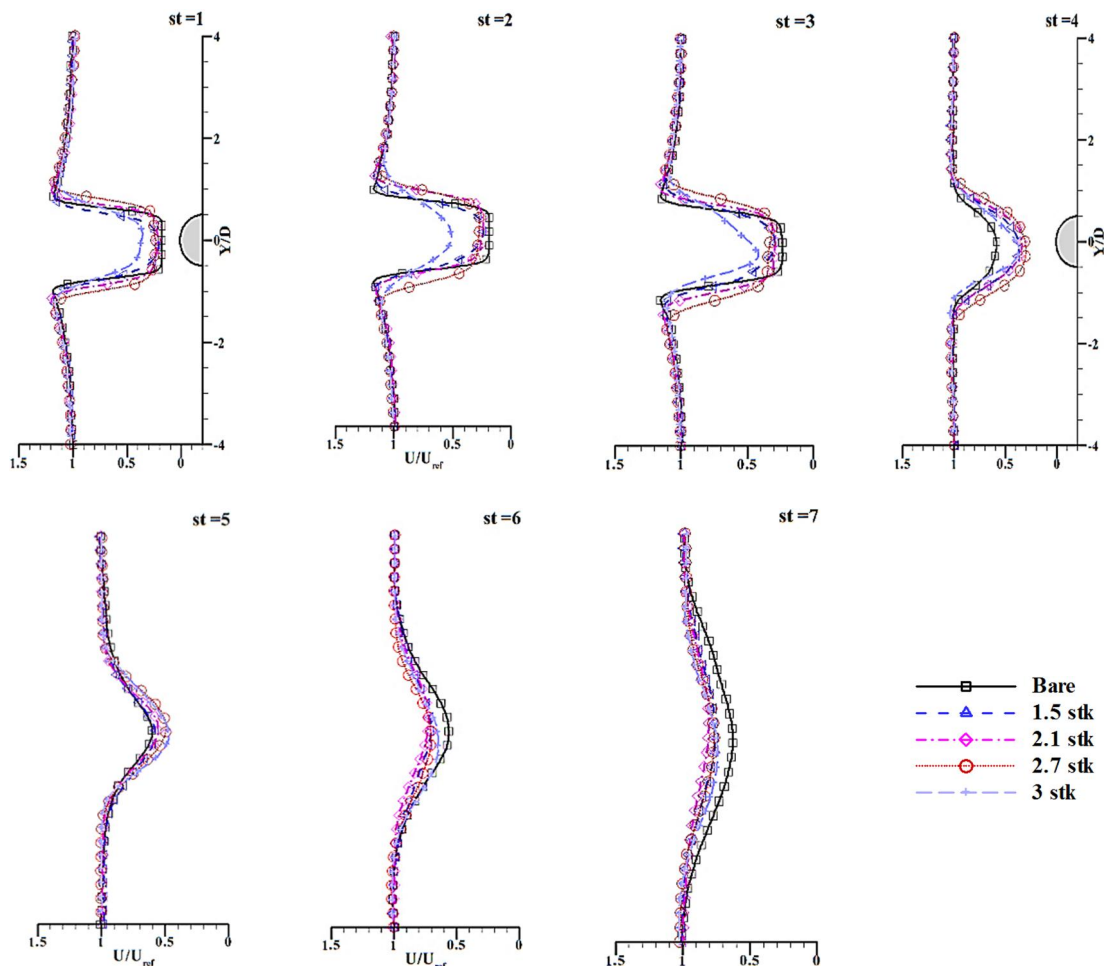
به منظور بررسی سرعت متوسط می‌توان از دو پارامتر سرعت نقصانی (W_0)، نصف دهانه دنباله در نصف عرض ($b_{1/2}$) استفاده کرد. مقدار سرعت نقصانی با توجه به پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$W_0 = 1 - \left(\frac{U_{min}}{U_{ref}} \right) \quad (2)$$

۵-۲- بررسی پروفیل سرعت متوسط

در طول یک دوره تناوب، پروفیل‌های سرعت علیرغم طبیعت متغیر و غیردائم مؤلفه‌های نوسانی سرعت، حالت متقارن دارند. می‌دانیم که گردابه‌ها بصورت لحظه‌ای در پشت مدل تشکیل می‌شوند، با این حال با توجه به شکل ۸ حتی در ایستگاه‌های نزدیک به مدل ($x \leq D$) نیز پروفیل‌های رسم شده حالت تقارن دارند، علت این مطلب بدین صورت است که تشکیل گردابه‌ها در پشت مدل، لحظه‌ای است و در طول دوره تناوب، تکرار می‌شود. با این حال اگر زمان داده برداری در یک نقطه از دوره تناوب تشکیل گردابه‌ها بیشتر باشد، با محاسبه متوسط زمانی سرعت در نقاط مد نظر، سرعت متوسط هر نقطه محاسبه می‌شود که در این صورت، اثرات عدم تقارن سرعت لحظه‌ای مشاهده نمی‌شود. با توجه به مشخصات دستگاه هات وایر و اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها، باتوجه به اطلاعات جمع‌آوری شده، در شکل ۸ زمان داده برداری، تقریباً ۳۰۰ برابر زمان تناوب تشکیل گردابه است.

در حالت صفحات با ارتفاع ۳ mm (3stk) مشاهده می‌شود که داخل دنباله، پروفیل سرعت متوسط، حالت متقارن ندارد. از طرفی در ایستگاه‌های نزدیک به مدل ($x \leq D$) این ارتفاع از صفحات پیچان، بیشترین تاثیر را دارد که با مطالعات چن و همکاران [۱۷]، مبنی بر افزایش تاثیرگذاری صفحات پیچان با افزایش ارتفاع آن‌ها مطابقت دارد. بر اساس مطالعات ژو و همکاران [۱۲] صفحات پیچان، زمان جدایش جریان را کنترل می‌کنند که می‌توان از نوک صفحات پیچان یا سطح استوانه باشد، در ارتفاع‌های بالاتر، سیال در لابلای صفحات، جریان یافته و هدایت می‌شود که سبب حرکت عرضی گردابه‌ها حین انتقال به پایین دست مدل می‌شود، همین امر سبب شده تا صفحات با ارتفاع کمتر در ایستگاه‌های نزدیک به مدل، کارایی کمتری نسبت به صفحات با ارتفاع بیشتر داشته باشند. با توجه به مطالب گفته شده، می‌توان نتیجه گرفت که عدم تقارن پروفیل سرعت برای سیلندر با ارتفاع است، از طرفی با توجه به ثابت بودن سیلندر و بیشتر بودن زمان اندازه‌گیری نسبت به دوره تناوب گردابه‌ها، این عدم تقارن در کل زمان داده‌برداری، تکرار شده است؛ همچنین در این ارتفاع، صفحات در ایستگاه‌های نزدیک دنباله شاهد رفتار بی‌نظم در روند پروفیل سرعت



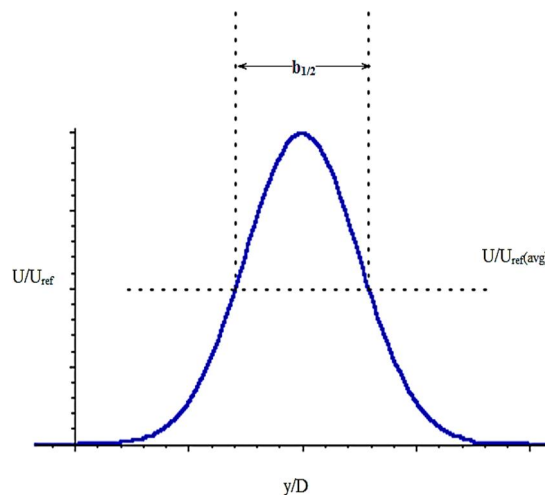
شکل ۸- بررسی پروفیل سرعت متوسط به ازای ارتفاع‌های مختلف صفحات در ایستگاه‌های ۰.۲۵، ۰.۵، ۱، ۲.۵، ۵، ۱۰، ۱۵

را گزارش می‌دهد. در ایستگاه‌های آخر، به علت کم شدن اثر سرعت V ، مقدار سرعت به مقدار واقعی سرعت در جهت X نزدیک می‌شود. همین روند برای سیلندر با صفحات پیچان، نیز تکرار می‌شود؛ اما با توجه به ماهیت صفحات پیچان در ضعیف کردن گردابه‌ها، روند کاهشی در ایستگاه‌های نزدیک به مدل ($x \leq D$) اتفاق می‌افتد و با دور شدن از مدل، روند کاهشی و از بین رفتن دنباله را شاهد هستیم. در مورد اجسام غیرجریانی، این روند کاهشی-افزایش و کاهشی به سبب گردابه‌های بزرگ تشکیل شده در دنباله، صورت می‌گیرد؛ اما در اجسام جریانی به سبب گردابه‌های ریز و ضعیف در دنباله، این روند از شدت کمتری برخوردار است که از جمله آن‌ها می‌توان به دنباله سیلندرها بیضوی اشاره کرد [۲۲].

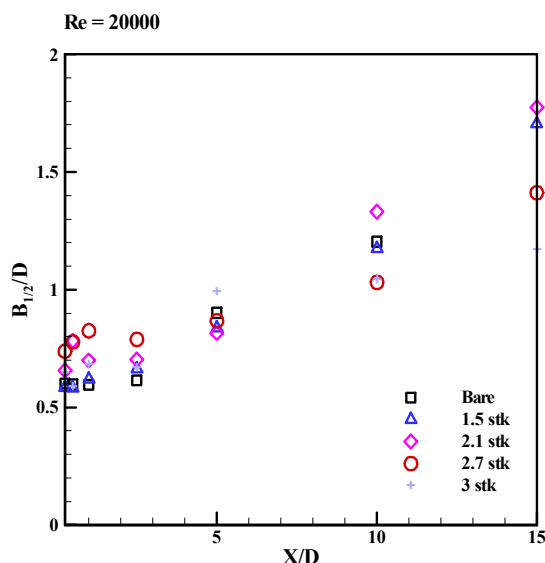
در رابطه فوق W_0 سرعت نقصانی، U_{min} حداقل سرعت در دنباله و U_{ref} سرعت جریان آزاد است؛ همچنین مقدار نصف دهانه در نصف عرض با توجه به پروفیل سرعت متوسط بی بعد، در شکل ۹ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۰، مقدار سرعت نقصانی بی بعد برای سیلندر صاف، روند کاهشی-افزایشی دارد، این روند می‌تواند به علت نفوذ جت سیال و همچنین وجود جریان برگشتی و سرعت بالای V در ایستگاه‌های ابتدایی، به دلیل گردابه‌های کارمن تولید شده باشد که سبب کاهش سرعت و افزایش مقدار سرعت نقصانی در فاصله مشخصی از پشت مدل می‌شود؛ لذا در این شرایط، سنسور جریان سنج سیم داغ با توجه به شکل هندسی خود، سرعت V را نیز اندازه‌گیری کرده و بزرگی سرعت جریان (نه فقط سرعت U)

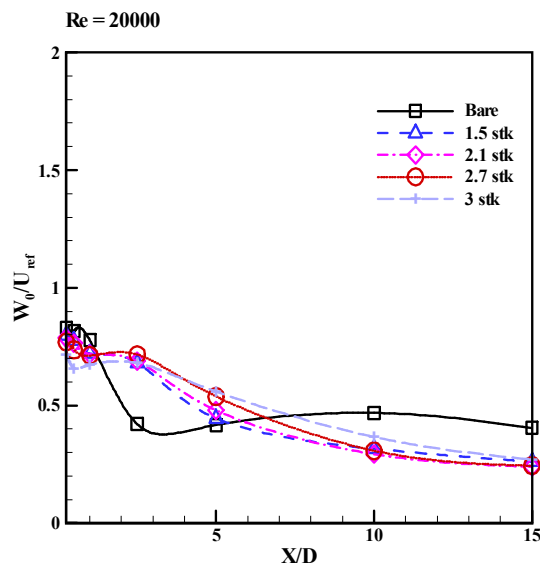
در تاثیر صفحات پیچان دانست، می‌دانیم که صفحات پیچان، سبب کنترل جدایش جریان از نوک صفحات یا سطح استوانه می‌شوند [۱۲]. به همین سبب، صفحات با ارتفاع ۲/۱mm سبب کنترل بهتر جریان در این سرعت می‌شود، همانطور که مشاهده شد، صفحات با ارتفاع ۳mm از راندمان بهتری در ایستگاه‌های نزدیک به سیلندر، برخوردار هستند؛ اما به علت وجود جریان‌های برگشتی شدیدتر در این صفحات، از بین رفتن دنباله کمی با تاخیر مواجه می‌شود، از طرفی ارتفاع‌های کمتر صفحات، از تاثیرگذاری کمتری نسبت به ارتفاع‌های بالاتر برخوردارند، در این بین صفحات با ارتفاع ۲/۱mm را می‌توان به عنوان ارتفاع بهینه در این پژوهش برای مناطق دور از مدل دانست.



شکل ۹- طرحواره نحوه محاسبه $b_{1/2}$



شکل ۱۱- نمودار نصف عرض دنباله در نصف عمق ($b_{1/2}$) در $Re = 20000$



شکل ۱۰- نمودار نقصان سرعت در نسبت ارتفاع صفحات مختلف در $Re = 20000$

۵-۳- بررسی شدت اغتشاشات

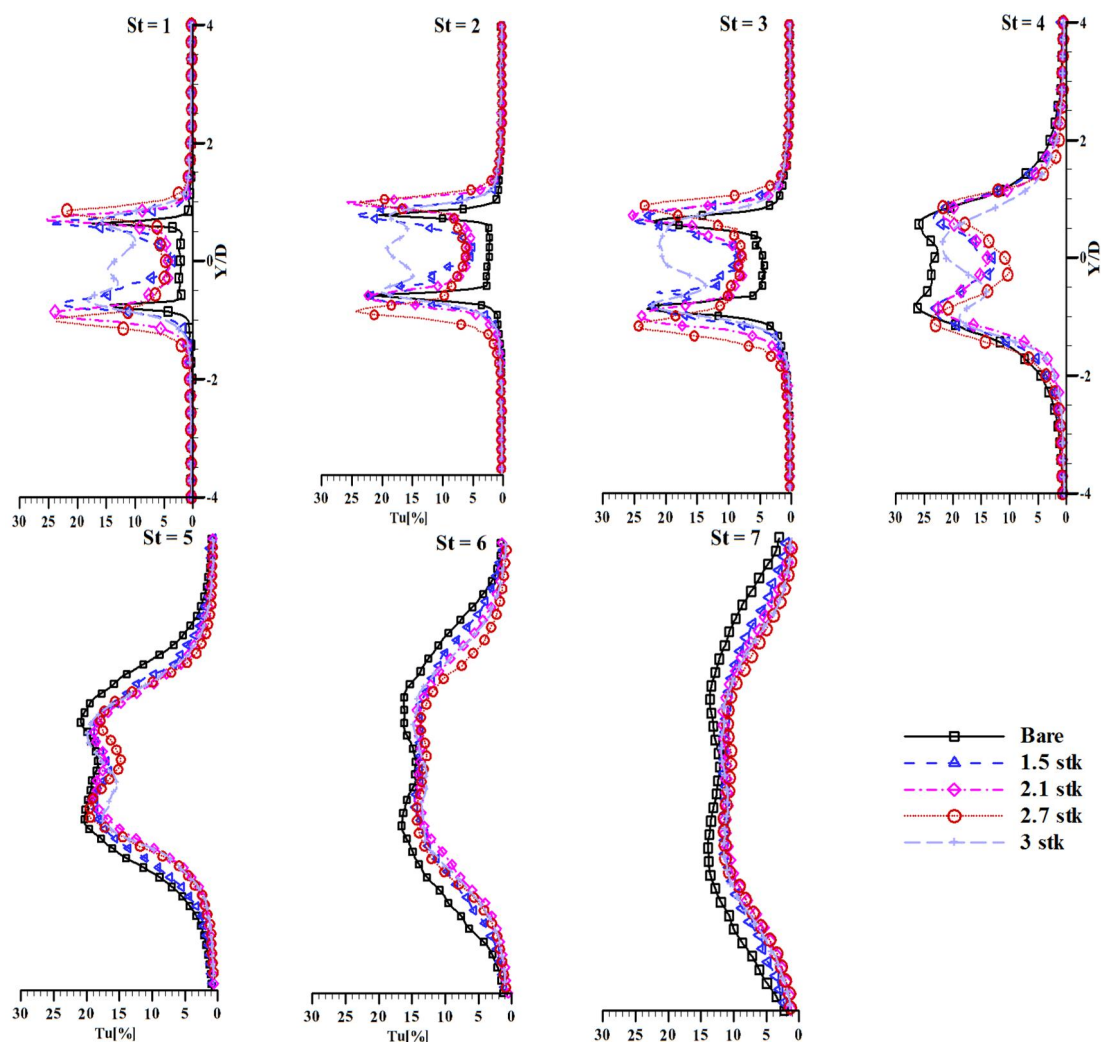
در این سری از آزمایش‌ها به بررسی اغتشاشات در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ با استفاده از صفحات پیچان نصب شده روی سیلندر دایروی با ارتفاع‌های مختلف پرداخته شده است. در شکل ۱۲ نمودار شدت اغتشاشات به ازای ارتفاع‌های مختلف صفحات در ایستگاه‌های ۰/۵، ۱، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، نشان داده شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهند که با افزایش ارتفاع صفحات، شدت اغتشاشات دنباله، افزایش

با دور شدن از مدل و نفوذ دنباله به نواحی بالاتر، تدریجاً دهانه دنباله و عرض پروفیل سرعت، بزرگتر می‌شود، همانگونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، نمودار نصف دهانه در نصف عرض بی‌بعد نیز، مانند نمودار سرعت نقصانی بی‌بعد دارای روند مشابهی است که می‌توان آنرا متأثر از جریان‌های برگشتی دانست.

صفحات با ارتفاع ۲/۱mm از بیشترین دهانه در ایستگاه‌های انتهایی برخوردار است، علت این امر را می‌توان،

پیچان باشد، بگونه‌ای با افزایش ضخامت صفحات و کانال یافتن جریان در لابلای صفحات، جدایش جریان دچار تاخیر می‌شود؛ همچنین مشاهده می‌شود که با استفاده از صفحات پیچان در منطقه دور از مدل ($x > D$) اغتشاشات نسبت به سیلندر صاف از روند کاهشی با شیب بیشتری برخوردارند که این موضوع می‌تواند، ناشی از تاثیر صفحات پیچان باشد. بر اساس مطالعات چن و همکاران [۱۷]، استفاده از صفحات پیچان، سبب شکستن و تضعیف گردابه‌ها می‌شود که همین امر موجب تزلزل سریعتر گردابه‌ها و کاهش سریعتر میزان اغتشاشات در دنباله می‌شود.

می‌یابند. با توجه به نمودار شدت اغتشاشات، افزایش ضخامت صفحات، سبب افزایش قابل ملاحظه‌ای در اغتشاشات داخل دنباله می‌شود. مشاهده می‌شود که نمودار اغتشاشات، دارای دو اکسترمم در نزدیکی دنباله است، ولی با افزایش ارتفاع صفحات در پروفیل‌های حداکثر اغتشاشات، علاوه بر دو اکسترمم قبلی، یک مقدار حداکثر دیگر در مرکز دنباله اتفاق می‌افتد که ناشی از تغییر در مشخصه و وضعیت گردابه‌های تشکیل شده در پشت استوانه است که با توجه به مطالعات عددی کنستانتینیدس و اُکلی [۱۹] می‌توان گفت، این افزایش شدت اغتشاشات می‌تواند ناشی از انتقال گردابه‌ها در جهت Z و همچنین کنترل جدایش جریان در اثر صفحات



شکل ۱۲- نمودار شدت اغتشاشات به ازای ارتفاع‌های مختلف صفحات در ایستگاه‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵

۵-۴- بررسی عدد استروهاال

همان‌طور که در بیان مشخصات دستگاه جریان سنج سیم داغ ذکر شد، این دستگاه قادر به اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های متناوب خارج شونده از استوانه است. با استفاده از فرکانس، سرعت سیال و قطر استوانه می‌توان عدد استروهاال را طبق رابطه (۳) محاسبه کرد.

$$S_t = \frac{f \cdot D}{U_\infty} \quad (3)$$

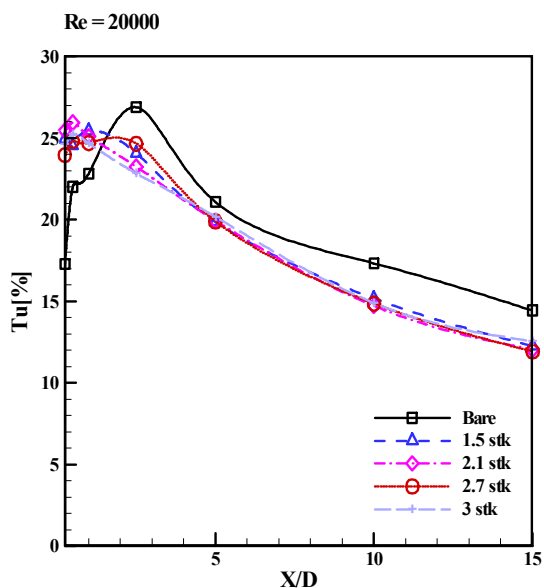
به منظور اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های خارج شونده از پشت استوانه، باید پراب را در جای مناسبی قرار داد، برای اینکه گردابه‌ها با وضوح بهتری اخذ شوند، باید پراب را در فاصله $3 < \frac{x}{D} < 6$ از استوانه قرار داد؛ همچنین پراب، بایستی از مرکز استوانه به فاصله $2.2 < \frac{y}{D} < 2.9$ و یا $-2.9 < \frac{y}{D} < -2.2$ قرار گیرد [۲۳]. در جدول ۱ مقدار عدد استروهاال در ارتفاع‌های مختلف صفحات مشاهده می‌شود.

همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از صفحات پیچان، سبب شکستن گردابه‌ها و کاهش شدت ریزش گردابه‌ها و عدد استروهاال می‌شود که این موضوع با مطالعات چن و همکاران [۱۷] مطابقت دارد؛ همچنین به منظور بررسی صحت عملکرد در حالت سیلندر صاف، مقدار عدد استروهاال با نتایج هور و همکاران [۲۴] در عدد رینولدز متناظر مقایسه شده است.

جدول ۱- تغییرات عدد استروهاال در نسبت ارتفاع صفحات

مختلف در $Re = 20000$	
نوع مدل	عدد استروهاال
مطالعه حاضر	۰/۱۸
سیلندر صاف	۰/۱۸۱۸ هور و همکاران [۲۴]
صفحات پیچان با ارتفاع ۱/۵ میلی‌متر	۰/۱۱۳
صفحات پیچان با ارتفاع ۲/۱ میلی‌متر	۰/۱۱۸
صفحات پیچان با ارتفاع ۲/۷ میلی‌متر	۰/۱۱۴
صفحات پیچان با ارتفاع ۳ میلی‌متر	۰/۱۱۸

در شکل ۱۳ نمودار حداکثر اغتشاشات دنباله در ایستگاه‌های مختلف نمایش داده شده است، مشاهده می‌شود که در منطقه نزدیک مدل برای استوانه صاف، مقدار اغتشاشات، کمتر از استوانه با صفحات پیچان است و مقدار اغتشاشات برای استوانه با صفحات پیچان در ایستگاه‌های نزدیک مدل، دارای متوسط بیشتری نسبت به سیلندر صاف است. از طرفی با دور شدن از مدل، اغتشاشات برای استوانه صاف، دارای روند نامنظمی است که پیش‌تر بحث شد، با این حال با افزایش ارتفاع صفحات پیچان به سیلندر، این نوسانات به ایستگاه‌های نزدیک سیلندر منتقل می‌شوند، با افزایش ارتفاع صفحات پیچان، قله اغتشاشات در ایستگاه‌های نزدیک به استوانه اتفاق می‌افتد و پس از آن پروفیل حداکثر اغتشاشات، روند کاهشی دارد. همانگونه که مشاهده می‌شود، برای سیلندر با صفحات با ارتفاع $H=3\text{mm}$ از ایستگاه‌های اولیه، روند کاهشی اغتشاشات، آغاز می‌شود. با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که استفاده از صفحات پیچان در مناطق دور از استوانه بطور کلی، سبب کاهش حداکثر اغتشاشات و تسریع در اضمحلال گردابه‌ها می‌شود که با نتایج ژو و همکاران [۱۲] مطابقت دارد. صفحات پیچان، بطور متوسط سبب کاهش ۱۴ درصدی در حداکثر اغتشاشات در دنباله سیلندر نسبت به حالت سیلندر صاف می‌شوند.



شکل ۱۳- تغییرات پیشینه شدت اغتشاشات در نسبت ارتفاع صفحات مختلف در $Re = 20000$

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی اثرات نصب صفحات پیچان روی استوانه‌ها در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ و با نسبت ارتفاع صفحات مختلف در تونل باد مدار باز، پرداخته شد. داده برداری در ۷ مقطع طولی پشت استوانه صورت گرفت. به منظور بررسی جریان پشت مدل، پروفیل‌های سرعت متوسط و شدت اغتشاشات بدست آمد و با استفاده از آن‌ها پارامترهای نقصان سرعت و عدد استروهمال محاسبه شد. نتایج حاصله از این پژوهش نشان می‌دهد که:

۱- صفحات پیچان، جدایش جریان از سیلندر را کنترل می‌کنند با توجه به سرعت و ارتفاع صفحات، جریان می‌تواند از نوک صفحات جدا شده یا در لابلای صفحات، جریان پیدا کند.

۲- تأثیر گذاری صفحات پیچان در $Re = 20000$ را می‌توان در دو ناحیه نزدیک به مدل ($x \leq D$) و دور از مدل ($x > D$) بررسی کرد. سیلندر با نسبت ارتفاع صفحات بیشتر ($H/D \geq 0.9$) سبب کاهش نقصان سرعت، در نزدیک مدل می‌شود، این در حالی است که استفاده از صفحات با نسبت ارتفاع $H/D = 0.7$ سبب بهبود و تسریع در از بین رفتن دنباله در ایستگاه‌های دور از مدل می‌شود.

۳- استفاده از صفحات با نسبت ارتفاع‌های بالاتر با وجود تأثیر مطلوب در نزدیک مدل، به سبب وجود جریان‌های برگشتی شدیدتر، سبب تاخیر در از بین رفتن دنباله می‌شوند.

۴- استفاده از صفحات پیچان، سبب حداکثر بهبود ۳۵ درصدی مقدار کمینه سرعت در دنباله می‌شود.

۵- استفاده از صفحات پیچان، سبب شکستن و تضعیف گردابه‌های تشکیل شده در پشت استوانه می‌شود که همین امر تزلزل سریعتر گردابه‌ها را در پی دارد.

۶- استفاده از صفحات پیچان، سبب کاهش ۱۵ درصدی در بیشینه شدت اغتشاشات در دنباله می‌شود.

۷- تغییرات ارتفاع صفحات پیچان علاوه بر تأثیر در جدایش جریان از سطح مدل، سبب بروز تغییرات

محسوسی در روند دنباله می‌شود، به گونه‌ای که می‌توان آن‌را به دو ناحیه نزدیک به مدل و دور از مدل تقسیم کرد.

۷- علائم و نشانه‌ها

$b_{1/2}$	نصف دهانه دنباله در نصف عرض [m]
bh	عرض دنباله [m]
D	قطر استوانه [m]
f	فرکانس گردابه [s^{-1}]
h	ارتفاع صفحات پیچان [m]
H/D	ارتفاع صفحات پیچان بی‌بعد
Re	عدد رینولدز
Tu[%]	شدت اغتشاشات
U	سرعت محلی در جهت x [ms^{-1}]
U_{min}	حداقل سرعت در دنباله [ms^{-1}]
U_{ref}, U_{∞}	سرعت جریان آزاد [ms^{-1}]
$\sqrt{u'^2}$	متوسط مربع اغتشاشات جریان در جهت x [ms^{-1}]
W_0	سرعت نقصانی
X	محور افقی مختصات [m]
X/D	محور مختصات افقی بی‌بعد
Y	محور عمودی مختصات [m]
Y/D	محور مختصات عمودی بی‌بعد
ν	ویسکوزیته سینماتیک [m^2s^{-1}]

علائم و نشانه‌های یونانی

- [12] Zhou T, Razali SFM, Hao Z, Cheng L (2011) On the study of vortex-induced vibration of a cylinder with helical strakes. *J Fluids Struct* 27: 903-917.
- [13] Kleissl K, Georgakis CT (2012) Comparison of the aerodynamics of bridge cables with helical fillets and a pattern-indented surface. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 104-106: 166-175.
- [14] Huang S, Sworn A (2013) Hydrodynamic coefficients of two fixed circular cylinders fitted with helical strakes at various staggered and tandem arrangements. *Appl Ocean Res* 43: 21-26.
- [15] Ekmekci, A (2014) Circular cylinders fitted with small-scale straight and helical wires: A comparative study on the wire-induced critical effects. *Exp Therm Fluid Sci* 53: 179-189.
- [16] Xu WH, Luan YS, Liu LQ, Wu YX (2017) Influences of the helical strake cross-section shape on vortex-induced vibrations suppression for a long flexible cylinder. *China Ocean Eng* 31: 438-446.
- [17] Chen D, Abbas LK, Wang G, Rui X, Lu W (2018) Suppression of vortex-induced vibration features of a flexible riser by adding helical strakes. *J Hydrodyn* 31(2).
- [18] Quen Kee L, Abu A, Kato N, Muhamad P, Ken L (2018) Performance of two- and three-start helical strakes in suppressing the vortex-induced vibration of a low mass ratio flexible cylinder. *Ocean Eng* 166: 253-261.
- [19] Constantinides Y, Okley O (2006) Numerical prediction of bare and straked cylinder VIV. in 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering 1-9.
- [20] Motameni B (2011) Two circular cylinders in turbulent crossflow. University of Windsor.
- [21] Schlichting H, Kestin J (2000) Boundary-layer theory. 7th edn. McGraw-Hill, New York.
- [22] Ezadi-yazdi M, Khoshnevis AB (2018) Experimental study of the flow across an elliptic cylinder at subcritical Reynolds number. *Eur Phys J Plus* 1-12.
- [23] Ardekani MA (2009) Hot-wire calibration using vortex shedding. *Measurement* 42: 722-729.
- [24] Hover FS, Tvedt H, Triantafyllou MS (2001) Vortex-induced vibrations of a cylinder with tripping wires. *J Fluid Mech* 448.
- [25] Van Dam CP (1936) Recent experience with different methods of drag prediction. 35: 376-421.
- [26] Goldstein S (1936) A note on the measurement of total head and static pressure in a turbulent stream. in proceedings of the royal society of london. Series A, Mathematical and Physical Sciences 570-575.

زیر نویس‌ها

مقدار جریان آزاد در ورودی

Ref

۸- مراجع

- [1] Ardekani M (2006) Hot-Wire Anemometer. K. N. Toosi university Press. (in persian)
- [2] Bak Khoshnevis A, Pedram M (2011) Experimental study of wake characteristics on an asymmetric airfoil using tripping wires. *Journal of Mechanical Engineering* 41(1). (in persian)
- [3] Alam M, Zhou Y, Zhao JM, Flamand O, Boujard O (2010) Classification of the tripped cylinder wake and bi-stable phenomenon. *Int J Heat Fluid Flow* 31: 545-560.
- [4] Ekmekci A, Rockwell D (2011) Control of flow past a circular cylinder via a spanwise surface wire: Effect of the wire scale. *Exp Fluids* 51: 753-769.
- [5] Araújo TB, Sicot C, Borée J, Martinuzzi RJ (2012) Influence of obstacle aspect ratio on tripped cylinder wakes. *Int J Heat Fluid Flow* 35: 109-118.
- [6] Bak Khoshnevis A, Nazari S, Ezadi Yazdi MJ (2017) Experimental investigation of wake on an elliptic cylinder in the presence of tripping wire. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 7: 149-163. (in persian)
- [7] Aydin TB, Joshi A, Ekmekci A (2014) Critical effects of a spanwise surface wire on flow past a circular cylinder and the significance of the wire size and Reynolds number. *J Fluids Struct* 51: 132-147.
- [8] Shimada T, Hara H, Ishizaki H (1984) The efficiency of helical strakes for the suppression of vortex excited oscillation of steel stracks. *Eng Struct* 3-16.
- [9] Bak Khoshnevis A, Foroozesh F, Pedram M, Vahidi M (2012) Experimental investigation on drag coefficient reduction due to tripping wire on cylinder. *Journal of Mechanical Engineering* 2(2): 81-90. (In Persian)
- [10] Bak Khoshnevis A, Karami M (2017) An experimental and comparative investigation of the effect of turbulence wire tripping on the wake characteristics of an asymmetric airfoil with circular cylinder. *Journal of Mechanical Engineering* 46(4): 83-92. (in persian)
- [11] Eshaghi Gorji M, Bak Khoshnevis A, Gholiepour Asrami E, Vahidi M (2012) Experimental investigation of air flow velocity profiles effects on the wires and cables of power transmission lines and supporting devices. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 2(1): 83-97. (in persian)

long flexible cylinders attached with helical strakes. Ocean Eng 169: 49-69.

[27] Xu W, Yu Y, Wang E, Zhou L (2018) Flow-induced vibration (FIV) suppression of two tandem