

# بررسی تجربی جریان آشفته حول سیلندر سه بعدی مربعی با تأثیر دیوار

علیرضا موحدی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

احمد سوهانکار (دانشیار)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

مجتبی دهقان منشادی\* (استادیار)

مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مهندسی مکانیک شریف، (پهار ۱۳۹۳)  
دوره ۳-۳، شماره ۱، ص. ۶۵-۷۷

در این پژوهش نتایج یک مطالعه تجربی در خصوص جریان حول یک سیلندر سه بعدی مربعی متصل به کف تونل باد ارائه شده است. آزمایش ها در تونل باد مدار باز مادون صوت با حداکثر اغتشاشات جریان آزاد  $0.2$  درصد و به وسیله جریان سنج سیم داغ انجام شده است. نسبت منطری سیلندرها  $3$  و  $7$ ، نسبت انسداد تونل  $3/3$  درصد، و سرعت جریان آزاد بین  $11$  تا  $22$  متر بر ثانیه است. در این مطالعه، بررسی سرعت متوسط و شدت آشفتگی در جهت جریان، اثرات عدد رینولدز بر ویژگی های جریان، تحلیل طیفی سیگنال های سرعت، و نیز محاسبه تجربی نرخ استهلاك انرژی و مقیاس طولی کولموگرووف انجام شده است. آزمایش های انجام شده نشانگر وجود یک گردابه در بالادست سیلندر سه بعدی متصل به کف، جدایش لایه های برشی از کناره ها و بالای مدل، نحوه رشد این لایه ها، و نسبت مستقیم شدت آشفتگی با نرخ استهلاك انرژی است.

واژگان کلیدی: ویک، سیلندر مربعی، سیم داغ، تحلیل فرکانسی، مطالعه

تجربی، تونل باد.

a.movahedi64@gmail.com  
asohankar@cc.iut.ac.ir  
mdmanshadi@alum.sharif.edu

## ۱. مقدمه

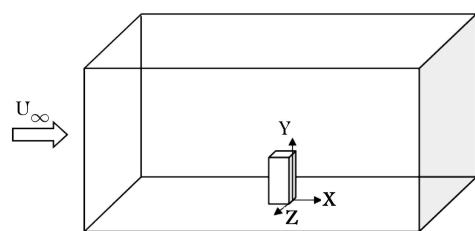
در کاربردهای مهندسی، حرکت اجسام غیر آئرو دینامیکی داخل سیالات از جایگاه ویژه ای برخوردار است. گاهی جسم داخل یک میدان سیال ساکن در حال حرکت است و گاهی سیال از روی جسم حرکت می کند. زیر دریایی ها و اتمبیل ها در دسته اول، و ساختمان های بلند و دودکش ها در دسته دوم قرار می گیرند. در هردو دسته، ویک ضخیم اجسام جریان بند<sup>۱</sup> نقش برجسته ای در توزیع نیروی های اعمالی، ارتعاش ناشی از جریان و همچنین نرخ انتقال حرارت دارد. غالباً در صنعت و طبیعت، هرگاه در مسیر عبور سیال مانعی قرار بگیرد، جدایش جریان رخ می دهد. در این گونه موارد، مطالعه ناحیه ویک ایجاد شده در پشت اجسام و جدایش جریان اهمیت پیدا می کند. آگاهی از جریان در این ناحیه که عموماً ماهیت آشفته و غیر دائم دارد، برای فهم انتقال حرارت و نیروی نوسانی اعمالی بر جسم لازم است. جریان حول اجسام جریان بند -- نظیر سیلندرها مربعی و دایره ای -- کاربرد گسترده ای در مسائل مهندسی از جمله ساختمان های بلند و دودکش ها دارد. مطالعه جریان حول سازی تکی و عموماً دوبعدی، تا مدت ها مبنای مطالعه تجربی و عددی در این خصوص بوده است. این کار به دفعات، برای سیلندرها دوبعدی با مقطع

\* نویسنده مسئول

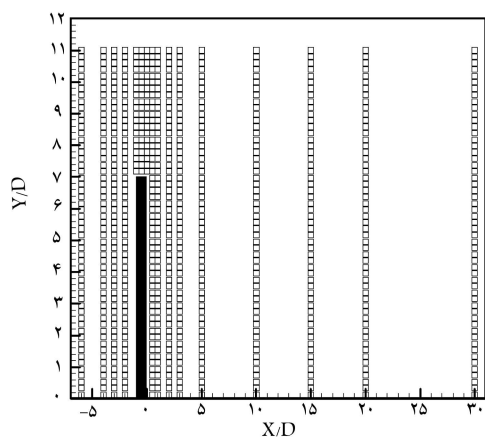
تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۱۳، اصلاحیه ۱۳۹۱/۸/۱۵، پذیرش ۱۳۹۱/۱۱/۱۴.

دایره ای، و با تعداد کمتری برای سایر هندسه ها -- همچون سیلندرها دوبعدی مربعی و مستطیلی، صفحات تخت و غیره -- به هر دو روش عددی و تجربی انجام شده است. جریان آشفته عبوری از تک سیلندر با مقطع مربعی نیز مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است، چرا که بسیاری از سازه های واقعی مثل ساختمان ها، پایه و بدنه یل ها و... مقاطع تقریباً مربعی یا مستطیلی دارند. مهم ترین تفاوت بین اجسامی مانند سیلندرها مربعی که لبه های تیز دارند با اجسامی مثل سیلندرها دایره ای که لبه های هموار دارند «نقطه ی جدایی» است. در مورد سیلندرهایی که لبه های هموار دارند، نقطه ی جدایی ثابت و مشخص نیست، در حالی که برای سیلندرهایی که لبه های تیز دارند نقطه ی جدایی ثابت و منطبق بر لبه های جسم است. این مطلب دینامیک جریان را در مقایسه با سیلندر دایره ای که در آن نقاط جدایی روی سطح جسم جابه جا می شود، تغییر می دهد.

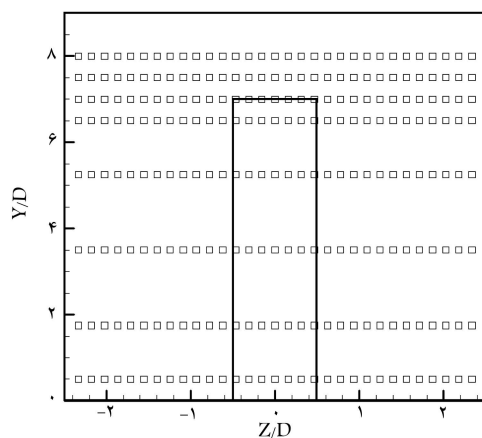
در دهه های اخیر، تحقیقات زیادی روی جریان در اطراف سیلندرها با هندسه های گوناگون انجام شده است. در هر یک از این مطالعات، با توجه به نظر محققین، جریان حول سیلندرها از دیدگاهی خاص بررسی شده است که از آن جمله می توان به بررسی توزیع فشار، ضرایب نیرو، ریزش گردابه، اعداد استروهل، الگوهای جریان و... اشاره کرد. اکثر این تحقیقات به وسیله آزمایش های تونل باد یا روش های عددی صورت گرفته اند و تنها تعداد محدودی از مطالعات با اندازه گیری در مقیاس های واقعی انجام شده است.



الف) هندسه و دستگاه مختصات مورد استفاده در این مطالعه؛



ب) نقاط داده برداری در صفحه  $Z=0$  ( $AR=7$ )؛



ج) نقاط داده برداری در صفحات  $X$  ثابت ( $AR=7$ )؛

شکل ۱. هندسه‌ی تحت بررسی در مطالعه‌ی حاضر و نقاط داده برداری در صفحات مختلف.

اندازه‌گیری‌ها با جریان‌سنج سیم داغ، و با مدار دما ثابت انجام شد. این جریان‌سنج حسگری از جنس تنگستن، به ضخامت  $5\mu m$  و به طول تقریبی  $1.5mm$  دارد؛ پراب این دستگاه نیز توسط یک انتقال‌دهنده داخل اتاق آزمون در راستای  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  به حرکت درمی‌آید. پراب به کمک یک نگه‌دارنده، به انتقال‌دهنده وصل می‌شود. قبل از شروع اندازه‌گیری، دستگاه سیم داغ به صورت استاتیکی و دینامیکی کالیبره شده است.

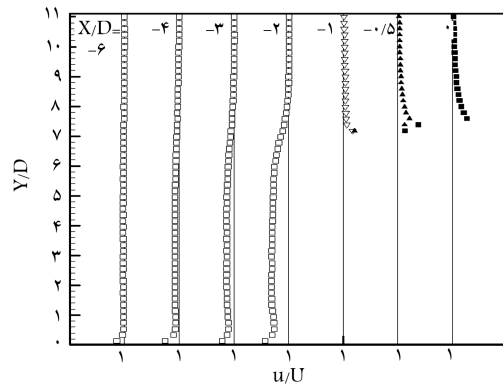
مکان مدل در تونل باد و اندازه ضخامت لایه مرزی در محل مدل، تأثیر قابل توجهی بر ساختار جریان، حول یک سیلندر با طول محدود دارد. محققین در مطالعات خود<sup>[۱۰]</sup> برای نسبت  $\delta/D = 1.2$  ( $Re_D = 11500$ ) یک جریان رو به بالای قابل توجه در نزدیکی کف و مجاور مدل مشاهده کردند که مرتبط با گردابه‌های پایه‌ی مدل بود. این اثر با افزایش ضخامت لایه‌ی مرزی افزایش می‌یابد. در شکل ۲ توزیع

جریان حول سیلندره‌ای دوبعدی وسیعاً مورد بررسی قرار گرفته است؛ نظیر بررسی عددی جریان در اعداد رینولدز مختلف<sup>[۱۱]</sup> حول سیلندر دایره‌ای دوبعدی، و مطالعه‌ی رژیم‌های مختلف برای سیلندر دوبعدی با مقطع مربعی.<sup>[۱۲]</sup> البته لازم به ذکر است که محاسبات دوبعدی برای اعداد رینولدز بالا، مناسب نبوده و در این حالت، باید از معادلات ناویر - استوکس در حالت سه‌بعدی و غیر دائم برای یک شبکه‌بندی خوب استفاده کرد. بررسی تجربی جریان حول سیلندر دوبعدی (با مقطع دایره‌ای، مقطع مربعی تحت زاویه صفر و  $45^\circ$  در دانشگاه یزد<sup>[۱۳]</sup> انجام شده است. براساس این تحقیق افت سرعت جریان در نزدیکی سیلندر مربعی با زاویه  $45^\circ$  درجه بیشینه است و نیز، اغتشاشات سیلندر دایره‌ای در تمامی فواصل پایین دست مدل از دو مدل دیگر کم‌تر است. مطالعات صورت گرفته درخصوص سیلندر سه‌بعدی، به‌ویژه با سطح مقطع مربعی، بسیار محدود است. در نمونه‌ی از این مطالعات<sup>[۱۴]</sup> جریان حول یک سیلندر دایره‌ای و نیز حول دو سیلندر دایره‌ای در آرایش پشت سرهم، به دو صورت تجربی (PIV) و عددی در محدوده‌ی عدد رینولدز  $64000-85000$  بررسی شده است. درمورد سایر هندسه‌های سه‌بعدی نیز، در مطالعه‌ی<sup>[۱۵]</sup> نتایج حاصل از جریان‌سنج سیم داغ یک‌بعدی و نتایج حاصل از مرئی‌سازی جریان حول بادگیرهای یک‌طرفه بررسی شده است. این بررسی نشان می‌دهد که برای یک سازه‌ی سه‌بعدی جریان‌سنج سیم داغ یک‌بعدی نتایج ارزشمند و قابل اعتنائی ارائه داده که با فیزیک واقعی تطابق خوبی دارد. در یگانه مطالعه‌ی تجربی انجام‌شده درمورد سیلندر سه‌بعدی با مقطع مربعی و متصل به کف تونل (شبه ساختمان بلند)<sup>[۱۶]</sup>، جریان حول سیلندر برای نسبت‌های منظری مختلف -- با استفاده از جریان‌سنج‌های PIV، سیم داغ و LDV و نیز با عدد رینولدز  $93000$  -- بررسی شد.

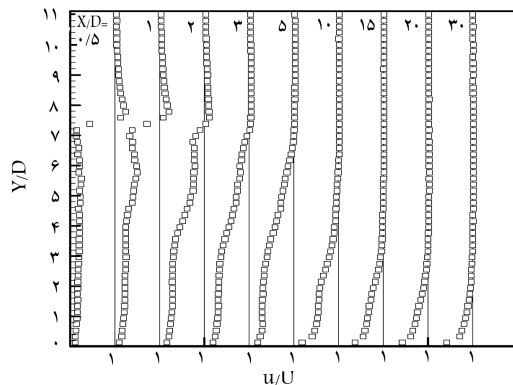
در تحقیق حاضر، به منظور شبیه‌سازی جریان عبوری از یک ساختمان بلند، یک سیلندر سه‌بعدی با مقطع مربعی و متصل به کف تونل باد با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. تاکنون هیچ‌گونه نتایج مرتبط با هندسه‌ی تحت بررسی این تحقیق -- جز نتایج حاصل از مطالعه‌ی تجربی سیلندر سه‌بعدی با مقطع مربعی و متصل به کف تونل<sup>[۱۷]</sup> -- در مراجع قابل دسترس انتشار نیافته است. افزون بر این، محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی، ابزار اندازه‌گیری و تعدادی از کمیت‌های مورد بررسی این تحقیق متفاوت از یافته‌های پیشین<sup>[۱۸]</sup> است که معرف نو بودن نتایج این تحقیق است.

## ۲. تجهیزات آزمایشگاهی و روند انجام آزمایشات

آزمایش‌ها در تونل باد مدار باز مادون صوت دانشگاه یزد انجام شد. سطح مقطع اتاق آزمون  $457 \times 457$  mm و بیشینه اغتشاشات جریان آزاد  $0.2\%$  درصد است. طول اتاق آزمون  $1200$  mm است که مدل در فاصله  $550$  mm از ورودی اتاق آزمون و متصل به کف تونل باد قرار داده شد. آزمایش‌ها روی سیلندره‌ای سه‌بعدی با مقطع مربعی  $D = 15$  mm متصل به کف تونل باد (نظیر جریان از روی ساختمان بلند) انجام شد. در شکل ۱ هندسه تحت بررسی در این مطالعه‌ی تجربی، و نیز نقاط داده برداری در صفحات مختلف نشان داده شده است. نسبت منظری ( $AR = H/D$ ) مدل‌های فولادی مورد استفاده در این تحقیق برابر ۳ و ۷، و نسبت انسداد تونل باد برابر  $3/3$  درصد است که در محدوده‌ی مجاز ارائه شده برای نسبت انسداد (یعنی ۵ درصد)<sup>[۱۹]</sup> است. لذا در این بررسی می‌توان اثرات انسداد بر نتایج را ناچیز دانست.

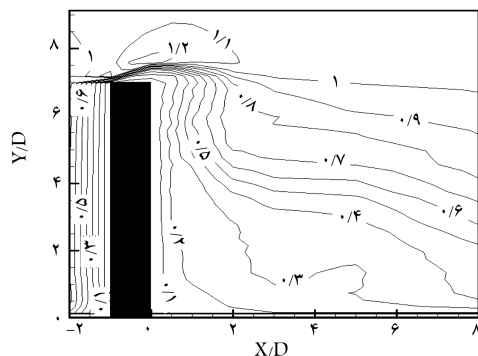


الف) بالادست و بالای مدل؛

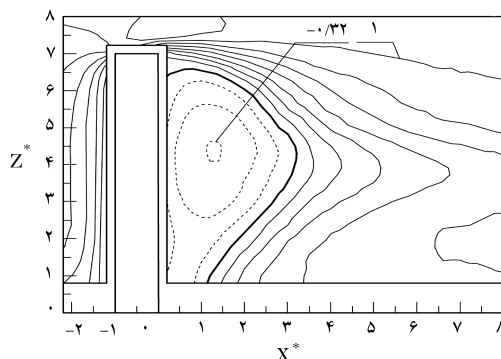


ب) پایین دست مدل.

شکل ۳. پروفیل سرعت بدون بعد در صفحه  $Z = 0$  در دو ناحیه در جهت  $X$ ، برای  $Re = 11000$  ( $AR = 7$ ).

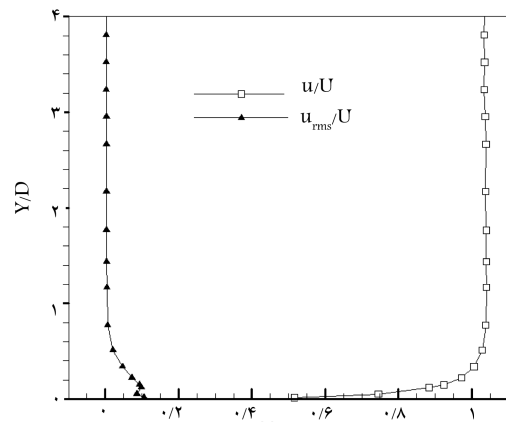


الف) مطالعه حاضر،  $Re = 11000$



ب) مطالعه وانگ و ژو،  $Re = 9300$  [۸]

شکل ۴. کانتورهای سرعت متوسط بی بعد در صفحه  $Z = 0$  ( $AR = 7$ ).



شکل ۲. توزیع سرعت متوسط و نوسانی در محل استقرار مدل و در غیاب آن ( $Re = 20000$ ).

سرعت متوسط و نوسانی در محل نصب مدل، و نیز در غیاب آن نشان داده شده است. چنان که مشاهده می شود، در مطالعه حاضر ضخامت لایه مرزی حدوداً معادل  $7.66 \text{ mm}$  و در نتیجه  $\delta/D = 0.51$  است. لذا اثر مورد اشاره در ارتباط با گردابه های پایه ضعیف تر است.

### ۳. تحلیل و بررسی نتایج

در این بخش نتایج به دست آمده برای جریان، حول یک سیلندر سه بعدی با مقطع مربعی متصل به کف تونل باد ارائه می شود. برای تعیین سرعت متوسط در نقاط مورد نظر، داده برداری برای سرعت لحظه ای به مدت  $10$  ثانیه انجام و سپس معدل گیری انجام می شود. از اختلاف سرعت لحظه ای و سرعت متوسط مقدار  $rms$  سرعت با استفاده از رابطه ی ۱ به دست می آید:

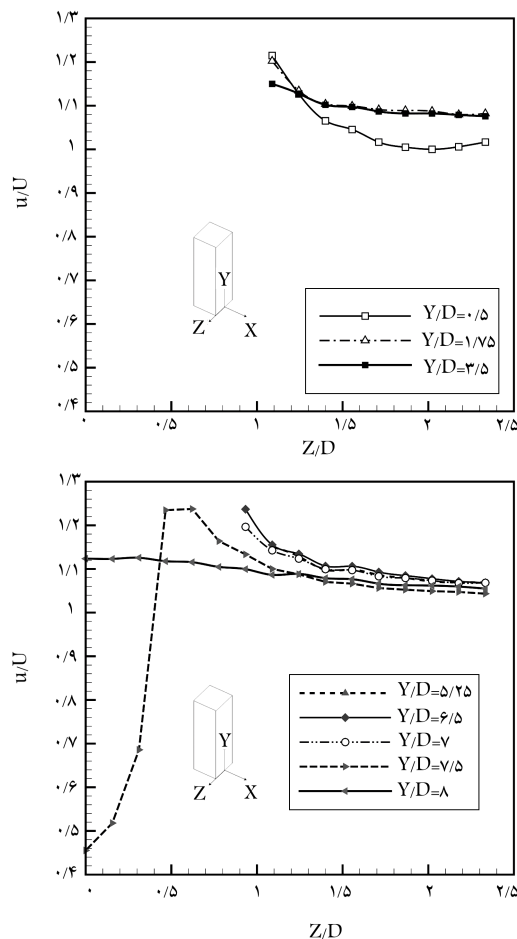
$$u_{rms} = \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (u(n) - U)^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

$N$  تعداد نمونه های اندازه گیری شده،  $u(n)$  سرعت لحظه ای، و  $U$  سرعت متوسط جریان سیال است. در این مطالعه بیشتر از کمیت «شدت آشفتگی» که به نوعی کمیت بدون بعد شده ی  $u_{rms}$  است، استفاده می شود. مطابق تعریف، «شدت آشفتگی» عبارت است از:

$$TI(\%) = \frac{u_{rms}}{U} \times 100 \quad (2)$$

### ۱.۳. بررسی سرعت متوسط

در شکل ۳ پروفیل های سرعت متوسط (بی بعد شده با سرعت جریان بالادست) برای  $Re = 11000$  ارائه شده، و سپس در شکل ۴ کانتور سرعت متوسط بی بعد در صفحه ی  $Z = 0$  با نتایج حاصل از مطالعات پیشین [۸] مقایسه شده است. توضیح این که در مطالعات پیشین از جریان سنج لیزری (LDV) برای اندازه گیری سرعت متوسط جریان استفاده شده است. چنان که از این شکل ها برمی آید، تأثیر مدل بر جریان در بالادست ناچیز است و تنها در نزدیکی کف و به واسطه ی وجود لایه مرزی، سرعت از مقدار سرعت بالادست انحراف دارد. ضمناً مطابق انتظار، با حرکت



شکل ۵. پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد در صفحه‌ی  $X/D = -0.5$  و در  $Re = 2000$  در دو ناحیه در جهت  $Y$  ( $AR = 7$ ).

به طریق مشابه، از داده‌های جمع‌آوری شده می‌توان برای بررسی رفتار جریان در صفحات  $Y$  ثابت استفاده کرد. برای نمونه، کانتور سرعت در چند صفحه‌ی  $Y$  ثابت در شکل ۸ ارائه و با نتایج موجود<sup>[۸]</sup> مقایسه شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود به‌استثای ناحیه‌ی جریان برگشتی (تا حدود  $X/D = 2$ ) که جریان‌سنج سیم داغ از ثبت آن ناتوان است، روند کلی نتایج نسبتاً مناسب و قابل مقایسه با نتایج موجود<sup>[۸]</sup> است. در صفحه‌ی  $Y/D = 3.5$ ، با افزایش  $X$  خطوط کانتور واگرا می‌شوند. این مطلب با رشد پهنای ویک در پایین‌دست مدل سازگاری دارد. ولی در شکل ۸ همگرایی خطوط  $(c, d)$  به سمت خط مرکزی با افزایش  $X$  به جریان رو به پایین از انتهای آزاد مدل برمی‌گردد.

در ادامه، به نحوه‌ی رشد لایه‌ی برشی از کناره‌های مدل اشاره می‌شود. با توجه به این که لایه‌ی لایه‌ی برشی متناظر با سرعت بیشینه است، لذا می‌توان با به هم وصل کردن نقاطی که بیشینه سرعت در آنها به دست آمده، تصویری از نحوه‌ی رشد لایه‌ی برشی به دست آورد (شکل ۹).

### ۲.۳. بررسی شدت آشفتگی جریان

در بخش قبلی سرعت متوسط جریان مورد بررسی قرار گرفت، و در این بخش نیز شدت آشفتگی جریان بررسی می‌شود. در شکل ۱۰ پروفیل‌های شدت آشفتگی

به سمت مدل در بالادست آن، از مقدار سرعت کاسته می‌شود، ولی در بالای مدل -- به‌واسطه‌ی لایه‌ی برشی جدا شده از بالای مدل -- در  $0$  و  $X/D = -0.5$ ، در نقاطی از سرعت بالادست نیز فراتر می‌رود. با توجه به این که سرعت در بخشی از ناحیه ویک و در نزدیکی مدل کم‌تر از سرعت بالادست است، و نیز با توجه به اصل بقای جرم، این افزایش سرعت در این نواحی منطقی است. بیشتر شدن سرعت در تعدادی از نقاط تا خط  $X/D = 2$  ادامه می‌یابد که با دور شدن از مدل، ارتفاع این نقاط نیز کاهش می‌یابد. این مطلب به فرود لایه‌ی برشی جدا شده از بالای مدل در ناحیه‌ی ویک پشت مدل برمی‌گردد.

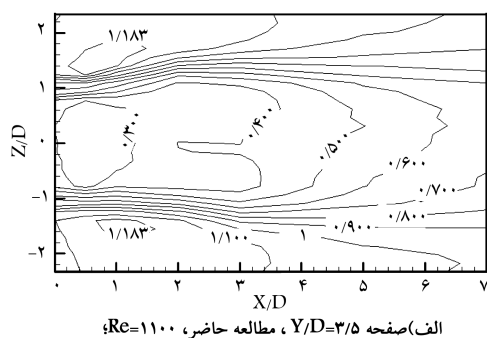
نتایج مربوط به  $Re = 2000$ ، روند مشابهی از خود نشان داده و تنها با افزایش عدد رینولدز، لایه‌ی برشی جدا شده از بالای مدل، اندکی به فاصله‌ی دورتر پرتاب شده و لذا اندازه‌ی ناحیه‌ی که تحت تأثیر این لایه سرعتی بیش از سرعت بالادست دارد، بزرگ‌تر می‌شود. بیشترین اختلاف در نتایج نیز به ناحیه‌ی جریان برگشتی برمی‌گردد که جریان‌سنج سیم داغ از ثبت سرعت با علامت منفی در این ناحیه عاجز است.

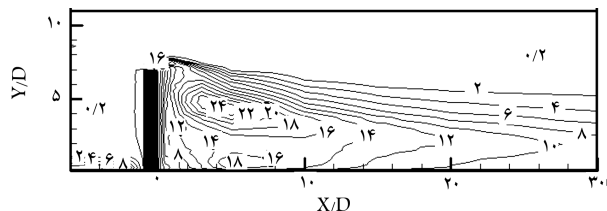
در این مطالعه، سرعت در صفحات  $X$  ثابت نیز بررسی شده است. صفحات  $X$  ثابت مورد بررسی در محدوده‌ی  $X/D = -3$  تا  $X/D = 20$  قرار دارند. چنان که پیش‌تر نیز بیان شد، در مورد صفحاتی که در بالادست مدل قرار دارند، غیر از پروفیل‌هایی که در نزدیکی کف قرار دارند در سایر پروفیل‌ها انحراف چندانی نسبت به سرعت بالادست دیده نمی‌شود. در شکل ۵، نمونه‌ی نتایج به دست آمده برای صفحات  $X$  ثابت موجود در بالادست و روی سقف مدل، پروفیل‌های سرعت متوسط بی‌بعد در صفحه‌ی  $X/D = -0.5$  (روی سقف مدل) برای  $Re = 2000$  در دو ناحیه در جهت  $Y$  ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، تنها پروفیل سرعت مربوط به خط  $Y/D = 7.5$  از سرعت بالادست انحراف خاصی نشان می‌دهد. دلیل این امر نیز قرار گرفتن این خط در زیر لایه‌ی برشی جدا شده از بالای مدل برای  $Re = 2000$  است.

در ادامه، پروفیل‌های سرعت بی‌بعد در پایین‌دست مدل ارائه و بررسی می‌شوند. در شکل ۶ نتایج مربوط به صفحات ۵ و ۳، برای  $X/D = 0.5$  دو عدد رینولدز ۲۰۰۰ و ۱۱۰۰۰ ارائه شده است. با دقت در این شکل می‌توان دریافت که رفتار خط  $Y/D = 7.5$  در صفحه‌ی  $X/D = 0.5$  نیز، به دلایلی که پیش‌تر بدان اشاره شد، برای دو عدد رینولدز تا حدی متفاوت است. مطابق انتظار، سرعت در ناحیه‌ی ویک کم‌تر از سایر نقاط است و مکان لایه‌های برشی جدا شده را می‌توان در محل وقوع سرعت بیشینه جست‌وجو کرد.

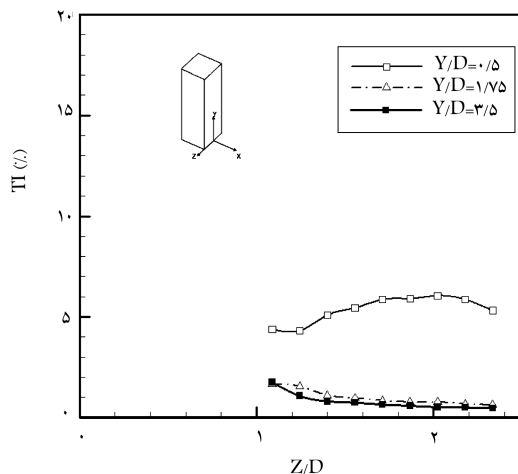
در مورد شکل ۶ باید یادآور شد که جریان‌سنج سیم داغ از ثبت جریان برگشتی عاجز است و لذا سرعت در هیچ نقطه‌ی منفی نیست. ولی دو صفحه‌ی دیگر، خارج از ناحیه‌ی جریان برگشتی<sup>[۸]</sup> و نتایج در این دو صفحه از دقت کافی برخوردار است. در ضمن، پروفیل‌های سرعت بی‌بعد در اکثر نواحی، برای دو عدد رینولدز یکسان است و اختلاف اندک موجود در محل لایه‌های برشی، نیز با خروج از ناحیه‌ی جریان برگشتی تدریجاً کاهش می‌یابد و از بین می‌رود. در شکل ۶، به‌خوبی می‌توان اندازه‌ی ناحیه‌ی متأثر از حضور مدل را مشاهده کرد؛ اندازه‌ی این ناحیه با حرکت از پایین به بالا و نزدیک شدن به ارتفاع سقف مدل، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین تأثیر مدل بر جریان با افزایش فاصله از آن، کم‌تر شده و سرعت در نقاط مختلف ویک افزایش می‌یابد.

در شکل ۷، کانتور سرعت متوسط بی‌بعد در تمامی صفحات  $X$  ثابت برای  $Re = 2000$  ارائه شده است. در این شکل، نواحی متأثر از حضور مدل و نحوه‌ی تغییرات سرعت در راستای  $X$  به‌خوبی قابل مشاهده است.

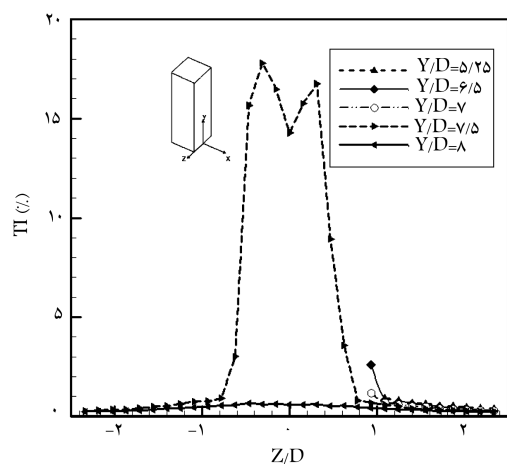




شکل ۱۱. کانتور شدت آشفتگی در صفحه‌ی  $Z = 0$  برای  $Re = 20000$  ( $AR = 7$ ).



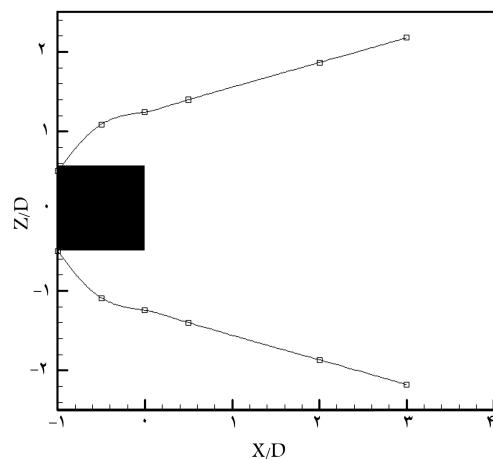
شکل ۹. شمایی از ناحیه‌ی یک سیلندر مربعی در صفحه‌ی  $Y/D = 3/5$  در  $Re = 20000$  ( $AR = 7$ ).



شکل ۱۲. پروفیل شدت آشفتگی در صفحه‌ی  $X/D = -0.5$  و در  $Re = 20000$  در دو ناحیه در جهت  $Y$  ( $AR = 7$ ).

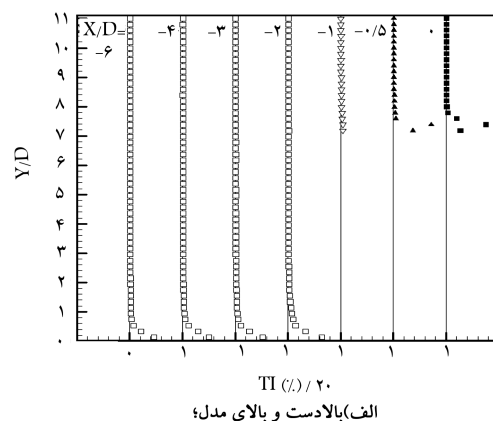
همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که در صفحات  $X$  ثابت در بالادست مدل، جز در نزدیکی کف، شدت آشفتگی مقدار قابل توجهی اختیار نمی‌کند. برای مثال، در شکل ۱۲ پروفیل‌های شدت آشفتگی در صفحه‌ی  $X/D = -0.5$ ، یعنی وسط دیواره کناری مدل، برای  $Re = 20000$  ارائه شده است. در این شکل افزایش شدت آشفتگی روی خط  $Y/D = 7/5$  نسبت به سایر خطوط، قابل توجه است. علت این رفتار را نیز، مشابه تغییرات سرعت متوسط که قبلاً به آن اشاره شد، می‌توان به جدایش لایه‌ی برشی از سقف نسبت داد.

در ادامه، پروفیل‌های شدت آشفتگی برای چند صفحه‌ی  $X$  ثابت دیگر ارائه و بررسی می‌شود. در شکل ۱۳ پروفیل‌های شدت آشفتگی برای صفحات ۳ و  $X/D = 0.5$  و برای دو عدد بولندز مورد بررسی نشان داده شده است. نتایج

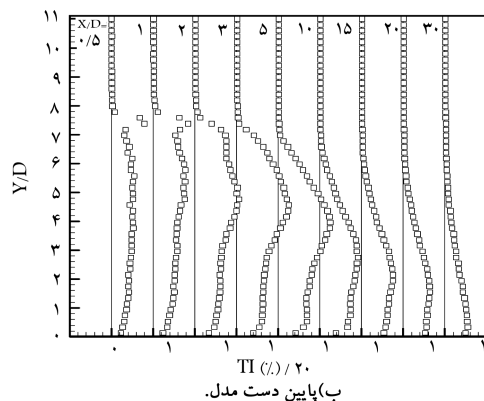


شکل ۱۰. پروفیل شدت آشفتگی در صفحه‌ی  $Z = 0$  در دو ناحیه و در جهت  $X$ ، برای  $Re = 11000$  ( $AR = 7$ ).

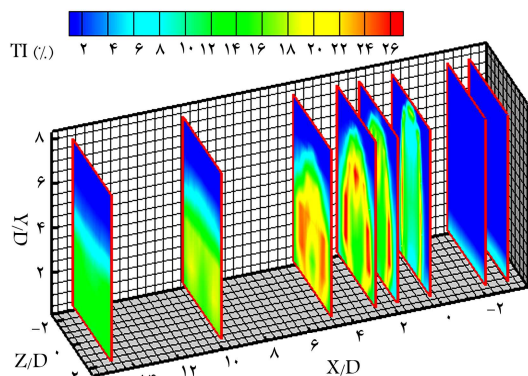
در شکل ۱۱ کانتور شدت آشفتگی در صفحه‌ی  $Z = 0$  برای  $Re = 20000$  نشان داده شده است. روند کلی شکل مربوط به  $Re = 11000$  نیز مشابه همین شکل است که در اینجا ارائه نشده است. نتایج این تحقیق نشان داد که در بالادست مدل، در صفحه‌ی  $Z = 0$  در ناحیه‌ی کوچکی در نزدیکی زمین، شدت آشفتگی افزایش قابل توجهی دارد. این موضوع با توجه به این که جریان گردابه‌یی با شدت آشفتگی بالا مشخص می‌شود می‌تواند به نوعی نمایانگر گردابه‌ی ایجاد شده در بالادست مدل باشد که قبلاً نیز در مطالعات مختلف<sup>[۱۱]</sup> به وجود چنین گردابه‌یی اشاره شده است.



الف) بالادست و بالای مدل؛



ب) پایین دست مدل.



شکل ۱۴. کانتور شدت آشفته‌گی در صفحات  $X$  ثابت در بالادست و پایین‌دست مدل برای  $Re = 20000$  ( $AR = 7$ ).

حاضر برابر با  $0.25$  و درمورد مطالعه‌ی پیشین<sup>[۸]</sup> برابر با  $0.29$  است. همچنین در این شکل مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار شدت آشفته‌گی برای هر دو مطالعه در حدود  $X/D = 2.3$  اتفاق می‌افتد.

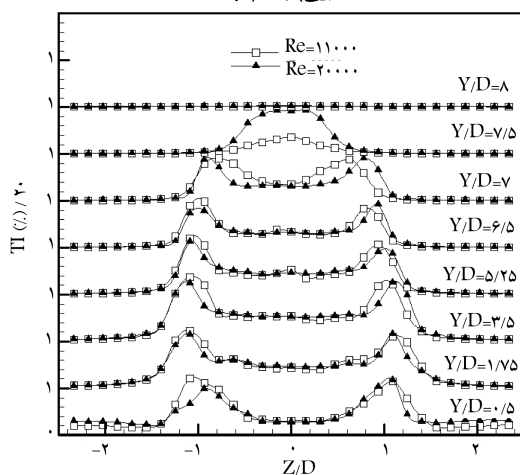
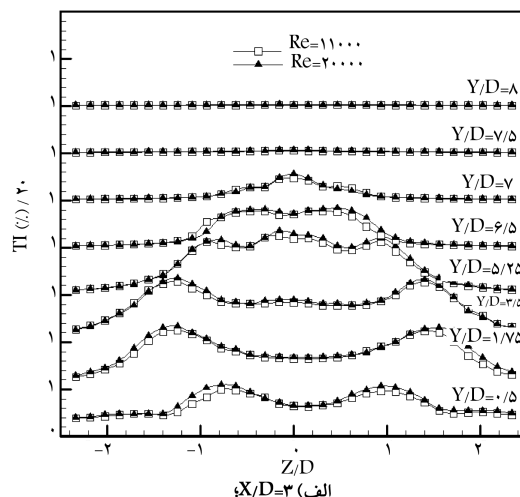
براساس مطالعات انجام‌شده توسط محققین<sup>[۱۲]</sup> مکانی را که مؤلفه‌ی نوسانی سرعت در جهت جریان به مقدار بیشینه‌اش می‌رسد، می‌توان به‌عنوان تخمینی از طول تشکیل گردابه در نظر گرفت. این طول، رابطه‌ی نزدیکی با مقدار نیروی پسا دارد. یک مقدار کوچک برای این طول متناظر با یک مقدار بزرگ برای نیروی پسا است و برعکس. این طول برای جریان پشت تک‌سیلندر سه‌بعدی با مقطع مربعی در حدود  $2.3$  برابر طول ضلع سطح مقطع سیلندر به دست آمده است. این در حالی است که این مقدار، برای یک سیلندر مربعی دوبعدی در حدود  $1.5$  برابر طول ضلع سطح مقطع سیلندر است<sup>[۱۳، ۱۴]</sup> در نتیجه می‌توان گفت مقدار متوسط ضریب پسا برای سیلندر مربعی سه‌بعدی از مقدار مربوط به سیلندر مربعی دوبعدی کم‌تر است.<sup>[۱۵، ۱۶]</sup>

### ۳.۳. بررسی فرکانسی جریان

از آنجا که جریان سنج سیم داغ از کارآمدترین وسایل اندازه‌گیری برای انجام تحلیل فرکانسی است، بخشی از این مطالعه به تحلیل سیگنال‌های به دست آمده از این جریان‌سنج برای نقاط مختلف پشت سیلندر اختصاص می‌یابد.

به‌منظور بررسی ویک آشفته‌ی پشت مدل‌ها، طیف توانی مؤلفه  $X$  سرعت ( $u$ ) مطالعه و بخشی از نتایج حاصله در شکل ۱۶ ارائه شده است. مقیاس محور عمودی در تمامی شکل‌ها یکسان بوده و محور افقی نیز مقدار بی‌بعد شده‌ی فرکانس با سرعت بالادست و قطر سیلندر (عدد استروهل) را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، یک پیک واضح در  $St = 0.11$  برای هر دو نسبت منظری دیده می‌شود. این بدان معناست که فرکانس ریزش گردابه در سرعت بالادست  $U_\infty = 11$  m/s برای هر دو نسبت منظری یکسان است. پیش‌تر استقلال عدد استروهل از نسبت منظری برای سیلندر دایره‌ای گزارش شده بود.<sup>[۱۷]</sup> ضمن این که مقدار  $0.11$  تطابق کاملاً مناسبی با مقدار ارائه‌شده برای سیلندر مربعی<sup>[۸]</sup> دارد. این فرکانس، کم‌تر از فرکانس ریزش گردابه مربوط به سیلندر دوبعدی<sup>[۱۸]</sup> برای  $2 \times 10^4$  تا  $Re = 10^5$  است، که مقداری حدوداً برابر با  $0.13$  تا  $0.12$  برای آن گزارش شده است. این مطلب را می‌توان به رفتار متفاوت ناشی از جریان اطراف سیلندره‌ای دوبعدی و سه‌بعدی ربط داد.

نکته‌ی قابل تأمل دیگر درمورد شکل ۱۶، برابر بودن فرکانس ریزش گردابه



شکل ۱۳. پروفیل‌های شدت آشفته‌گی برای  $Re = 11000$  و  $20000$  در صفحات  $X$  ثابت ( $AR = 7$ ).

مربوط به صفحه‌ی  $X/D = 5$  تقریباً مشابه با صفحه  $X/D = 3$  بوده و لذا در اینجا ارائه نشده است. چنان که مشاهده می‌شود، روند تغییرات شدت آشفته‌گی در صفحه‌ی  $X/D = 0.5$ ، به‌جز روی خط  $Y/D = 7/5$  برای دو عدد رینولدز تقریباً یکسان است. اختلاف موجود بین نتایج مربوط به  $Y/D = 7/5$  می‌تواند بر اثر تغییر در روند و محل فرود لایه‌ی برشی جدا شده از بالای مدل به داخل ویک ایجاد شده باشد که پیش‌تر در این رابطه توضیح داده شد. درمورد صفحه‌ی  $X/D = 3$  نیز به نظر می‌رسد با خارج شدن از ناحیه‌ی جریان برگشتی، انطباق نتایج مربوط به دو عدد رینولدز نیز بیشتر می‌شود.

به‌عنوان خلاصه‌ی نتایج این بخش، کانتور شدت آشفته‌گی در صفحات  $X$  ثابت در بالادست و پایین‌دست مدل برای  $Re = 20000$  در شکل ۱۴ نشان داده شده است. روند تغییرات شدت آشفته‌گی در این شکل به‌خوبی نشان داده شده است.

برای بررسی شدت آشفته‌گی در صفحات  $Y$  ثابت، کمیت  $(u_{rms}/U_\infty)^2$  محاسبه و با نتایج دیگر مطالعات<sup>[۸]</sup> مقایسه شده است. در شکل ۱۵، مؤلفه‌ی نوسان سرعت برای دو صفحه‌ی  $Y$  ثابت، بین این مطالعات مقایسه شده است.

چنان که مشاهده می‌شود، به‌جز ناحیه‌ی  $X/D < 2$  تطابق کمی و کیفی خوبی بین نتایج دو مطالعه برقرار است. به‌نحوی که مقدار بیشینه کمیت مورد بررسی در کار

درمورد سیلندر با نسبت منظری ۳، یک پیک نه‌چندان واضح در  $St = 0.22$  مشاهده می‌شود. این پیک دقیقاً در فرکانسی برابر با ۲ برابر فرکانس اصلی ریزش گردابه مشاهده می‌شود. این در حالی است که چنین پیک‌های ضعیفی برای نسبت منظری ۷ مشاهده نشد.

با بررسی بیشتر طیف توانی در نقاطی با ارتفاع مختلف، تفاوت‌هایی در شکل و انرژی طیف‌ها دیده می‌شود. با نزدیک شدن به نوک سیلندر برای هر دو نسبت منظری، پیک ریزش گردابه ضعیف‌تر می‌شود اگرچه، در ارتفاعی برابر با ارتفاع سیلندر نیز این پیک مشاهده می‌شود.

داده‌برداری فرکانسی در فواصل مختلف از سیلندر نیز صورت گرفت که بخشی از نتایج آن در شکل ۱۷ ارائه شده است. این شکل طیف توانی  $u$ ، در  $Y/D = 7$  و  $Z/D = 2$  را به‌ازای فواصل مختلف از مدل برای  $AR = 7$  و  $Re = 11000$  نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که پیک مربوط به  $X/D = 0.5$  از یک دو نمودار دیگر ضعیف‌تر است. علت این امر قوی‌تر بودن جریان رو به پایین از سقف مدل در این فاصله است که بر ریزش گردابه‌های عرضی اثر گذاشته و آن را ضعیف‌تر می‌کند. با فاصله گرفتن از مدل، این اثر ضعیف‌تر شده و پیک موجود در نمودارها قوی‌تر می‌شود.

با توجه به توانایی جریان‌سنج سیم داغ در ثبت صحیح فرکانس ریزش گردابه، به‌ازای اعداد رینولدز مختلف، در این تحقیق فرکانس ریزش گردابه برای اعداد رینولدز مختلف اندازه‌گیری و سپس نمودار  $Re - St$  رسم شد (شکل ۱۸). چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود، عدد استروهل با تغییر عدد رینولدز چندان تغییری نمی‌کند. این روند مشابه با رفتار عدد استروهل در سیلندرهایی دوبعدی در اعداد رینولدز بالاتر از  $10000$  است.<sup>[۱۸]</sup>

### ۴.۳. بررسی نرخ استهلاک انرژی و مقیاس طولی کولموگروف

از داده‌های به دست آمده برای تحلیل فرکانسی می‌توان کمیت‌های دیگری چون نرخ استهلاک انرژی ( $\varepsilon$ ) و مقیاس طولی کولموگروف ( $\eta$ ) را نیز محاسبه کرد. نرخ‌های انرژی کل سیال (انرژی جنبشی) به‌دلیل اثرگران‌روی به حرارت تبدیل می‌شود، نرخ استهلاک انرژی نامیده می‌شود و برابر است با:<sup>[۱۹]</sup>

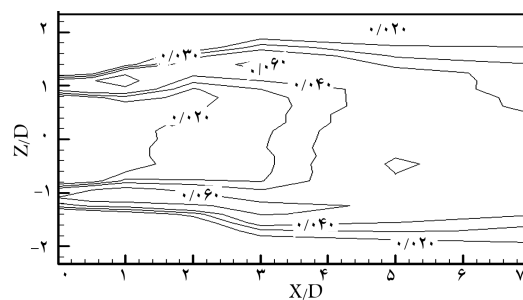
$$\varepsilon = \frac{15\nu}{U^2} \times \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 \quad (3)$$

که در آن  $\nu$  گران‌روی سینماتیکی سیال در شرایط محیط، و  $U$  سرعت متوسط محلی است. برای به دست آوردن نرخ استهلاک از داده‌های گسسته، معادله‌ی ۳ را می‌توان چنین نوشت:<sup>[۱۹]</sup>

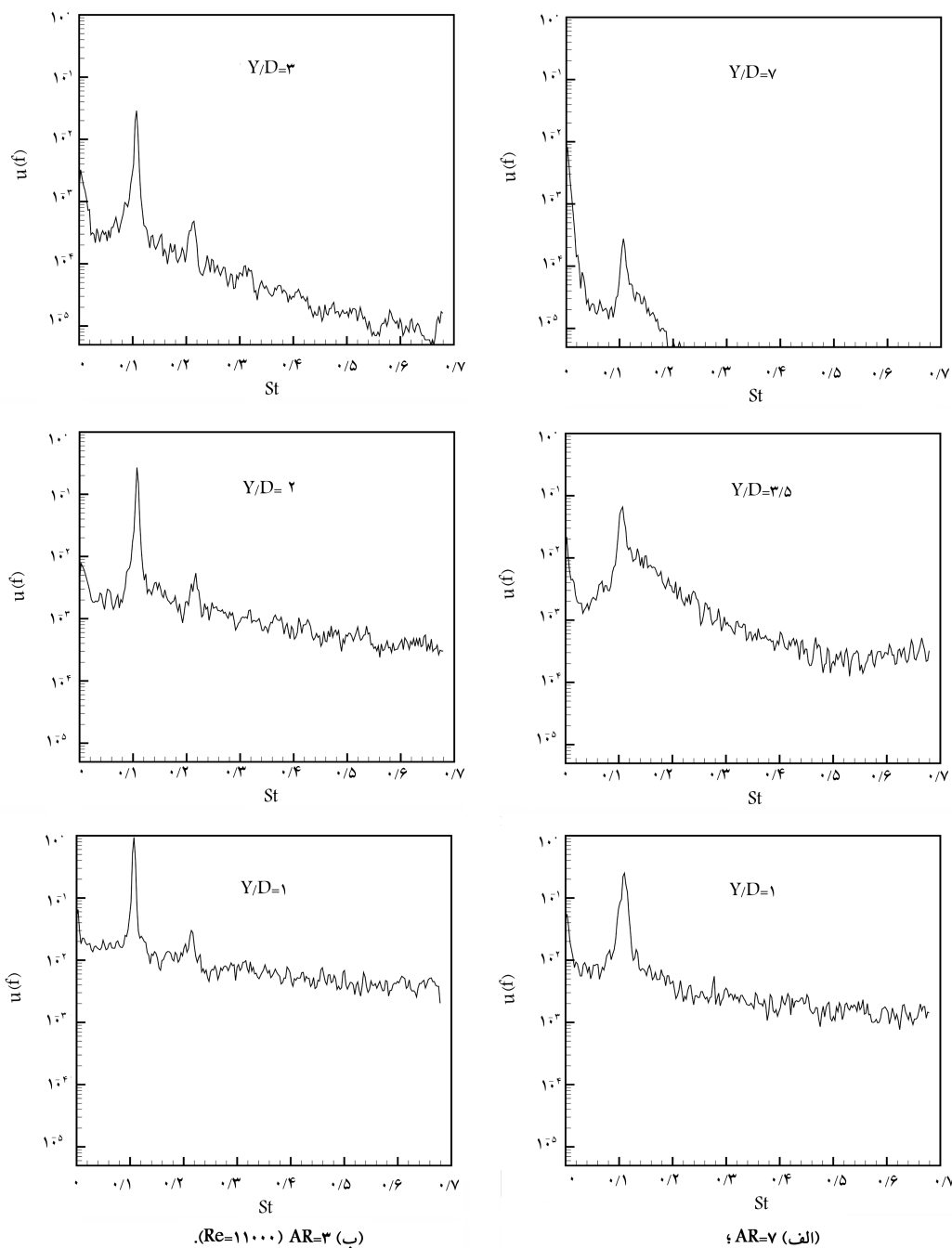
$$\varepsilon = \frac{15\nu}{U^2} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \left( \frac{U_{i+1} - U_i}{\Delta t} \right)^2 \right] \quad (4)$$

که در آن  $\Delta t$  فاصله‌ی بین دو نمونه‌گیری متوالی است که در این مطالعه برابر با  $0.001$  ثانیه است. به‌عبارت دیگر، در داده‌برداری‌های مربوط به تحلیل فرکانسی، فرکانس داده‌برداری دستگاه به‌گونه‌ای تنظیم شد که برای هر نقطه، در هر  $0.001$  ثانیه داده‌برداری انجام می‌گیرد و این کار تا  $10$  ثانیه ادامه می‌یابد و سپس این داده‌ها مورد پردازش قرار می‌گیرند.

مقیاس طولی کولموگروف ( $\eta$ ) مشخص‌کننده‌ی کوچک‌ترین اندازه‌ی گردابه‌ی (مقیاس طولی) موجود در جریان است. مقدار این کمیت به نرخ استهلاک انرژی







وابسته است و طبق رابطه ی ۵ به دست می آید: [۱۹]

$$\eta = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

مقادیر مربوط به نرخ استهلاک انرژی و مقیاس طولی کولموگروف برای نقاطی که طیف توانی آنها در شکل ۱۶ نشان داده شده، در جدول ۱ ارائه شده است. از این نتایج ملاحظه می شود که نرخ استهلاک انرژی در نقاط مورد بررسی برای سیلندر با نسبت منظری ۳ در مقایسه با نقاط مورد بررسی برای سیلندر با نسبت منظری ۷ بیشتر است.

جدول ۱. مقدار نرخ استهلاک انرژی و مقیاس طولی کولموگروف در  $X/D = 3$  و  $Z/D = 2$ .  $(Re=11000)$ .

| AR | Y/D | $\varepsilon \text{ (m}^2/\text{s}^2\text{)}$ | $\eta \text{ (mm)}$ |
|----|-----|-----------------------------------------------|---------------------|
| 3  | 1   | 3/06                                          | 0/18                |
| 3  | 2   | 0/54                                          | 0/28                |
| 3  | 3   | 0/04                                          | 0/54                |
| 7  | 1   | 1/21                                          | 0/23                |
| 7  | 3/5 | 0/39                                          | 0/30                |
| 7  | 7   | 0/03                                          | 1/23                |

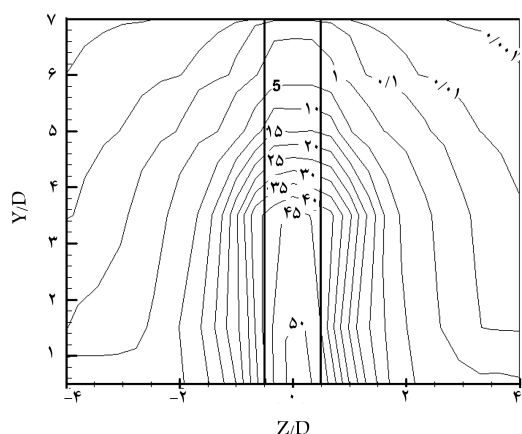
نتایج این بخش برای نسبت منظری ۷ به صورت مفصل‌تر در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین برای درک بهتر روند تغییرات نرخ استهلاك انرژی و مقیاس طولی کولموگروف، به عنوان نمونه در صفحه  $X/D = 5$  و برای عدد رینولدز  $Re = 11000$ ، داده‌برداری در تعداد نقاط بیشتری از صفحه صورت گرفت. نتایج این کار در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است.

مطابق رابطه ۶، مقیاس طولی کولموگروف با ریشه‌ی چهارم نرخ استهلاك انرژی رابطه‌ی عکس دارد. بنابراین، در نقاطی که مقدار استهلاك انرژی بالاست، مقیاس طولی کولموگروف کوچک است و برعکس.

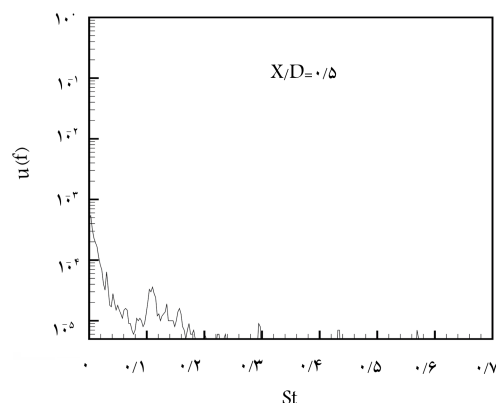
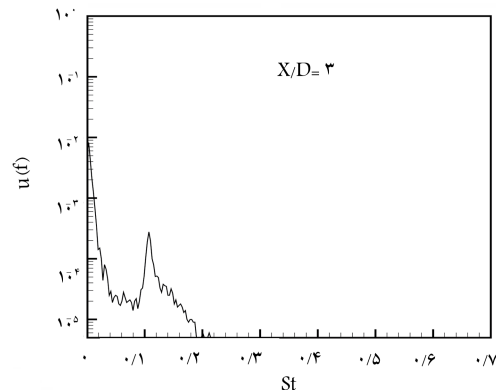
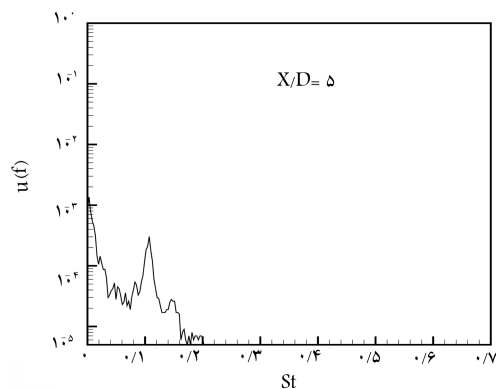
همچنین با توجه به جدول ۲ و شکل ۱۹، ملاحظه می‌شود که به جز در نزدیکی کف، تقریباً در تمامی خطوط، با افزایش  $Z$  نرخ استهلاك انرژی کاهش می‌یابد. ضمناً با افزایش  $Y$  و حرکت به سمت نوک سیلندر، نرخ استهلاك انرژی کاهش

جدول ۲. مقدار نرخ استهلاك انرژی،  $\varepsilon$  ( $m^2/s^3$ ) و مقیاس طولی کولموگروف،  $\eta$  (mm) برای چند مکان در پایین دست سیلندر با نسبت منظری ۷.

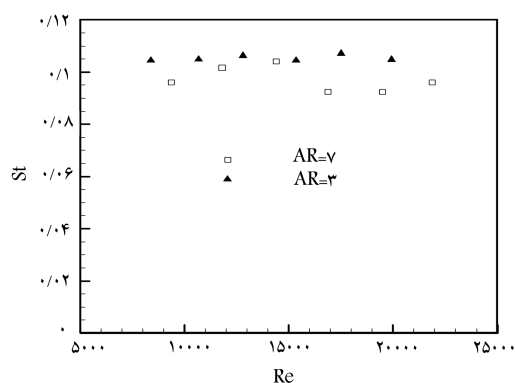
| $X/D$ | $Y/D$ | $Z/D$ | $Re = 11000$                   |                | $Re = 20000$                   |                |
|-------|-------|-------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|
|       |       |       | $\varepsilon$<br>( $m^2/s^3$ ) | $\eta$<br>(mm) | $\varepsilon$<br>( $m^2/s^3$ ) | $\eta$<br>(mm) |
| ۰٫۵   | ۰٫۵   | ۱٫۶۶۷ | ۰٫۶۸۴۸                         | ۰٫۲۶۵۰         | ۰٫۷۲۷۶                         | ۰٫۲۶۱۰         |
| ۰٫۵   | ۰٫۵   | ۲٫۰۰۰ | ۱٫۰۰۰۳۷                        | ۰٫۲۴۰۸         | ۱٫۰۶۹۸                         | ۰٫۲۳۷۰         |
| ۰٫۵   | ۰٫۵   | ۲٫۳۳۳ | ۱٫۱۲۲۲                         | ۰٫۲۳۴۲         | ۱٫۰۷۷۲                         | ۰٫۲۳۶۶         |
| ۰٫۵   | ۱٫۷۵  | ۱٫۶۶۷ | ۰٫۲۵۰۵                         | ۰٫۳۴۰۷         | ۰٫۱۷۵۵                         | ۰٫۳۷۲۴         |
| ۰٫۵   | ۱٫۷۵  | ۲٫۰۰۰ | ۰٫۰۲۸۳                         | ۰٫۵۸۷۵         | ۰٫۰۳۴۸                         | ۰٫۵۵۸۱         |
| ۰٫۵   | ۱٫۷۵  | ۲٫۳۳۳ | ۰٫۰۰۸۵                         | ۰٫۷۹۲۹         | ۰٫۰۱۴۳                         | ۰٫۶۹۶۷         |
| ۰٫۵   | ۳٫۵   | ۱٫۶۶۷ | ۰٫۱۳۹۴                         | ۰٫۳۹۴۵         | ۰٫۱۴۳۵                         | ۰٫۳۹۱۶         |
| ۰٫۵   | ۳٫۵   | ۲٫۰۰۰ | ۰٫۰۱۹۰                         | ۰٫۶۴۹۱         | ۰٫۰۲۹۵                         | ۰٫۵۸۱۷         |
| ۰٫۵   | ۳٫۵   | ۲٫۳۳۳ | ۰٫۰۰۰۶۹                        | ۰٫۸۳۶۰         | ۰٫۰۱۰۹                         | ۰٫۷۴۵۳         |
| ۰٫۵   | ۵٫۲۵  | ۱٫۶۶۷ | ۰٫۰۰۲۳۶                        | ۰٫۶۱۵۰         | ۰٫۰۱۷۰                         | ۰٫۶۶۷۴         |
| ۰٫۵   | ۵٫۲۵  | ۲٫۰۰۰ | ۰٫۰۰۰۴۷                        | ۰٫۹۲۱۷         | ۰٫۰۰۵۶                         | ۰٫۸۸۰۹         |
| ۰٫۵   | ۵٫۲۵  | ۲٫۳۳۳ | ۰٫۰۰۰۱۹                        | ۱٫۱۶۰۳         | ۰٫۰۰۲۹                         | ۱٫۰۳۵۸         |
| ۰٫۵   | ۸     | ۱٫۶۶۷ | ۰٫۰۰۰۰۸                        | ۱٫۴۴۶۰         | ۰٫۰۰۰۰۶                        | ۱٫۵۱۹۱         |
| ۰٫۵   | ۸     | ۲٫۰۰۰ | ۰٫۰۰۰۰۷                        | ۱٫۵۰۰۶         | ۰٫۰۰۰۰۷                        | ۱٫۴۹۱۹         |
| ۰٫۵   | ۸     | ۲٫۳۳۳ | ۰٫۰۰۰۰۹                        | ۱٫۴۰۷۱         | ۰٫۰۰۰۰۵                        | ۱٫۵۹۵۲         |



شکل ۱۹. کانتور نرخ استهلاك انرژی،  $\varepsilon$  ( $m^2/s^3$ ) در  $X/D = 5$  و  $Re = 11000$ .



شکل ۱۷. طیف توانی  $u$ ، در  $Y/D = 7$  و  $Z/D = 2$  به فواصل مختلف از مدل برای  $Re = 11000$  و  $AR = 7$ .



شکل ۱۸. نمودار  $Re-St$  برای دو نسبت منظری مختلف.

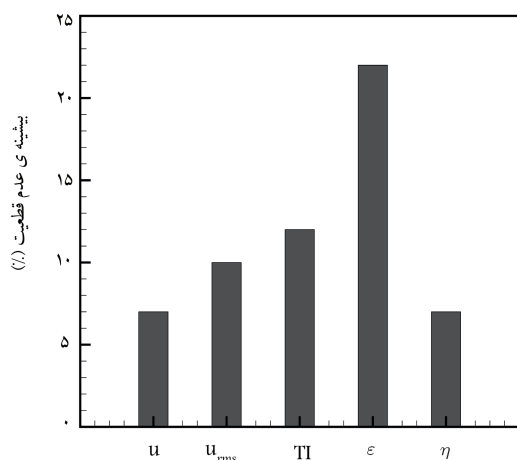
مدت زمان داده برداری دقت این نتایج را افزایش داد. ولی این نتایج از نظر مقدار در محدوده مناسب و قابل مقایسه‌ی با مقادیر موجود<sup>[۱۹]</sup> قرار دارند. یادآور می‌شود که هندسه‌ی ارائه شده<sup>[۱۹]</sup> یک کره است، و امکان مقایسه‌ی کمی با نتایج تحقیق حاضر وجود ندارد ولی به‌طور کیفی تا حدودی قابل مقایسه است.

#### ۴. عدم قطعیت نتایج

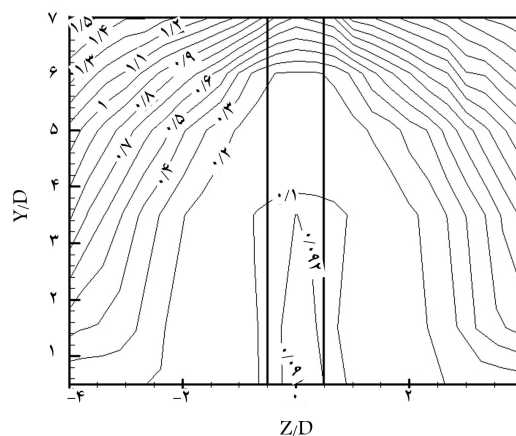
اندازه‌گیری فرایندی است که طی آن مقدار یک کمیت معین می‌شود. تمامی اندازه‌گیری‌ها با خطا همراه هستند. عدم آگاهی ما در مورد اندازه و علامت خطای اندازه‌گیری، عدم قطعیت<sup>۲</sup> اندازه‌گیری نامیده می‌شود. تخمین عدم قطعیت، توصیف و تعیین خطای اندازه‌گیری به‌صورت آماری است. بنابراین، نتیجه‌ی یک اندازه‌گیری تنها زمانی کامل است که همراه با شرح عدم قطعیت آن ارائه شود. عدم قطعیت سرعت لحظه‌ی به عوامل مختلفی بستگی دارد که برخی از آنها عبارت‌اند از:

- عدم قطعیت جریان سنج (نویزها، تکرارپذیری، پاسخ فرکانسی و...)
- عدم قطعیت کالیبراسیون؛
- عدم قطعیت مربوط به تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال؛
- عدم قطعیت مربوط به موقعیت قرارگیری پراب؛
- عدم قطعیت ناشی از تغییرات دما؛
- عدم قطعیت ناشی از تغییرات فشار محیط؛
- عدم قطعیت ناشی از تغییرات رطوبت.

در این تحقیق عدم قطعیت‌های مورد اشاره، مطابق با روند مطرح شده در مطالعات محققین<sup>[۲۱،۲۰]</sup> با یکدیگر ترکیب شده تا عدم قطعیت کلی به دست آید. از آنجا که سرعت لحظه‌ی ( $u$ ) کمیتی است که مستقیماً از طریق آزمایش‌ها به دست می‌آید، عدم قطعیت سایر پارامترها را نیز می‌توان با استفاده از عدم قطعیت اندازه‌گیری مؤلفه‌های متوسط و نوسانی سرعت به دست آورد. بیشینه‌ی عدم قطعیت کمیت‌های مختلف در شکل ۲۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که جریان عبوری از یک کره به‌صورت تجربی مطالعه شده است<sup>[۱۹]</sup> و میزان عدم قطعیت برای سرعت متوسط برابر ۶٪، شدت آشفستگی برابر با ۱۱٪، نرخ استهلاك انرژی، برابر با ۲۰٪ و برای مقیاس طولی کولموگروف برابر با ۶٪ گزارش شده است. اگرچه امکان مقایسه کمی



شکل ۲۱. بیشینه عدم قطعیت کمیت‌های مختلف در این مطالعه.



شکل ۲۰. کانتور مقیاس طولی کولموگروف،  $\eta$  (mm)، در  $X/D = 5$  و  $Re = 11000$ .

می‌باید. دلیل این امر نیز قوی‌تر بودن آشفستگی در پشت سیلندر در ارتفاع‌های کم‌تر به‌واسطه‌ی ریزش مؤثر گردابه‌های عرضی و اثرات اتصال سیلندر به کف است که طبیعتاً برای مستهلک کردن این آشفستگی انرژی بیشتری مورد نیاز است. پیش‌تر محققین به مؤثرتر بودن ریزش گردابه در ارتفاع‌های پایین‌تر اشاره کرده بودند.<sup>[۸]</sup> هرچه میزان آشفستگی در ویک سیلندر بیشتر باشد انتقال انرژی بین مقیاس‌های طولی مختلف در جریان آشفته تا مقیاس‌های کوچک‌تری ادامه یافته و سپس آشفستگی میرا می‌شود. به همین دلیل است که در بیشتر موارد، کم‌ترین مقدار مقیاس طولی کولموگروف در بین نقاطی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند نزدیک‌ترین نقاط به مرکز ویک که تقریباً روی لایه‌ی برشی قرار گرفته‌اند و میزان آشفستگی در آنها بیشینه است، به دست آمده است. با دور شدن از مرکز ویک، پس از عبور از لایه‌ی برشی و حرکت به سمت خارج از ناحیه‌ی متأثر از حضور سیلندر، مقدار مقیاس طولی کولموگروف افزایش می‌یابد.

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش  $X$  (دور شدن از مدل در پایین دست آن) تا نصف ارتفاع مدل، مقدار  $\epsilon$  افزایش می‌یابد. این بدان علت است که با رشد لایه‌های برشی و بزرگ شدن ناحیه‌ی ویک، نقاط داده برداری شده در صفحه‌ی  $X/D = 5$  داخل ناحیه‌ی ویک قرار گرفته‌اند. این در حالی است که ناحیه‌ی ویک در  $X/D = 0$  در این محدوده از ارتفاع باریک‌تر بوده و نقاط مورد بررسی تقریباً خارج از ناحیه‌ی ویک قرار می‌گیرند. ولی در صفحه‌ی  $X/D = 5$  این نقاط در ناحیه‌ی ویک واقع می‌شوند که در این نقاط، به علت آشفستگی بیشتر در مقایسه با نواحی خارج از ناحیه‌ی ویک، نرخ استهلاك انرژی نیز بیشتر است. ضمناً با توجه به رابطه‌ی ۴ و نیز با توجه به این که در این نواحی سرعت متوسط محلی ( $U$ ) کم‌تر است، این پدیده تا حدی توجیه پذیر است. ولی با افزایش بیشتر ارتفاع، با توجه به فرود لایه‌ی برشی جدا شده از بالای مدل، رفتار جریان تدریجاً به رفتار جریان آزاد نزدیک‌تر می‌شود. این در حالی است که برای صفحه‌ی  $X/D = 0$ ، نواحی با ارتفاع بیشتر به لایه‌ی برشی جدا شده از سقف نزدیک‌تر است و لذا مقدار آشفستگی نیز تا حدودی بیشتر است. در نتیجه مقدار نرخ استهلاك انرژی نیز برای این قسمت‌ها در مقایسه با صفحه‌ی دورتر بیشتر است.

همچنین با افزایش سرعت جریان آزاد، مقدار مقیاس طولی کولموگروف کاهش می‌یابد.<sup>[۱۹]</sup> این مطلب نشان می‌دهد توربولانس، انرژی کافی برای رسیدن به مقیاس‌های کوچک‌تر و انتشار در این مقیاس‌ها را نیز دارد.

البته در این قسمت می‌توان با کوچک‌تر کردن گام زمانی داده برداری و نیز افزایش

نتایج موجود<sup>[۱۹]</sup> با نتایج تحقیق حاضر وجود ندارد، به لحاظ کیفی تا حدودی قابل مقایسه است. این مقایسه ی کیفی نشان می دهد که میزان عدم قطعیت کمیت های مختلف این دو تحقیق محدوده ی تغییرات مشابهی دارند.

## ۵. نتیجه گیری

نتایج جریان حول یک سیلندر سه بعدی با مقطع مربعی متصل به کف تونل باد به روش تجربی در این پژوهش ارائه شده است. آزمایش ها در تونل باد مدار باز و به وسیله ی دستگاه جریان سنج سیم داغ انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که جریان سنج سیم داغ برای مطالعه ی کیفی جریان پشت سیلندرها و نیز تحلیل فرکانسی مناسب است. هرچند بیشترین اختلاف در نتایج با سایر روش های تجربی به ناحیه ی جریان برگشتی برمی گردد که جریان سنج سیم داغ از ثبت سرعت با علامت منفی در این ناحیه عاجز است.

آزمایش های انجام شده مؤید وجود یک گردابه در بالادست سیلندر سه بعدی متصل به کف است که در بعضی از مطالعات قبلی به آن اشاره شده بود. همچنین لایه های برشی جدا شده از طرفین و بالای مدل نیز به کمک این ویژگی مشخص شدند که هم سرعت متوسط و هم شدت آشفتگی در محل لایه های برشی به مقدار بیشینه ی خود می رسند. در این نوشتار، طیف توانی مؤلفه ی  $X$  سرعت ( $u$ ) در نقاط مختلف به دست آمده و مورد بررسی قرار گرفت. عدد استروهاال برای سیلندر مربعی با نسبت های منظری ۳ و ۷ در بازه وسیعی از اعداد رینولدز، تقریباً برابر  $0.11$  به دست آمد که تطابق خوبی با نتایج قبلی از خود نشان داد. با استفاده از داده های به دست آمده، کمیت هایی مثل نرخ استهلاك انرژی و مقیاس طولی کولموگروف به صورت تجربی در چند نقطه در نزدیکی لایه های برش جدا شده از

کناره های مدل محاسبه و مقایسه شد، و مشخص شد که شدت آشفتگی با مقدار نرخ استهلاك انرژی نسبت مستقیم دارد. همچنین در نقاطی که آشفتگی جریان بیشتر است نرخ استهلاك انرژی نیز بیشتر است تا بتواند این مقدار آشفتگی را میرا کند. از طرفی با افزایش هرچه بیشتر آشفتگی در ناحیه ی ویک، انتقال انرژی بین گردابه ها تا اندازه های کوچک تری از آنها ادامه می یابد. به عبارت دیگر مقیاس طولی کولموگروف با افزایش آشفتگی کاهش می یابد.

## فهرست علائم

$D$ : طول ضلع سطح مقطع سیلندر

$H$ : ارتفاع سیلندر

$AR$ : نسبت منظری

$Re$ : عدد رینولدز

$u_{ins}$ : سرعت لحظه یی

$u$ : سرعت متوسط محلی

$U$ : سرعت متوسط جریان بالادست

$TI$ : شدت آشفتگی

$St$ : عدد استروهاال

## علائم یونانی

$\delta$ : ضخامت لایه مرزی

$\varepsilon$ : نرخ استهلاك انرژی

$\nu$ : گرانروی سینماتیکی سیال

$\eta$ : مقیاس طولی کولموگروف

## پانوشته ها

1. bluff bodies
2. uncertainty

## منابع (References)

1. Sohankar, A. "Hopf bifurcation, vortex shedding and near wake study of a heated cylinder in cross flow", *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, **31**, pp. 31-47 (2007).
2. Norberg, C. "Fluctuating lift on a circular cylinder: Review and new measurements", *Journal of Fluids and Structures*, **17**, pp. 57-96 (2003).
3. Sohankar, A., Norberg, C. and Davidson, L. "Simulation of three-dimensional flow around a square cylinder at moderate reynolds numbers", *Journal of Phys. Fluids*, **11**, pp. 288-306 (1999).
4. Breuer, M., Bernsdorf, J., Zeiser, T., Durst, F. "Accurate computations of the laminar flow past a square cylinder based on two different methods: Lattice-boltzmann and finite-volume", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **21**, pp. 186-196 (2000).
5. Saeidi nezhad, A. "The investigation of the nozzle of the Yazd university wind tunnel and the experimental study of the flow around three models", Ms. Thesis, university of Yazd, Yazd, Iran (2010) (in Persian).
6. Nejla, M., Hatem, M., Herve, B. and Le Palec, G. "Experimental and numerical modelling of the three-dimensional incompressible flow behaviour in the near wake of circular cylinders", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **96**, pp.471-502 (2008).
7. Kazemi Esfeh, M., Dehghan, A.A., Dehghan Manshadi, M. and Mohagheghian, S. "Visualized flow structure around and inside of one-sided wind-catchers", *Energy and Buildings*, **55**, pp.545-552 (2012).
8. Wang, H.F. and Zhou, Y. "The finite-length square cylinder near wake", *Journal of Fluid Mech*, **638**, pp. 453-490 (2009).
9. Farell, C., Carrasquel, S., Guven, O. and Patel, V.C. "Effect of wind tunnel walls on the flow past circular

- cylinder and cooling tower models", *J. Fluids Engng*, **99**, pp. 470-490 (1977).
10. Wang, H.F., Zhou, Y., Chan, C.K., Wong, W.O. and Lam, K.S. "Flow structure around a finite-length square prism", 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, The University of Sydney, Sydney, Australia (13-17 December 2004).
11. Meroney, R.N., Leidl, B.M., Rafailidis, S. and Schatzmann, M. "Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **81**, pp. 333-345 (1999).
12. Bloor, S.M. "The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder", *J. Fluid Mech.*, **19**, pp. 290-309 (1964).
13. Lyn, D.A., Einav, S.E., Rodi, W. and Park, J.H. "A laser-doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristics of the turbulent near wake of a square cylinder", *J. Fluid Mech.*, **304**, pp. 285-319 (1995).
14. Saha, A.K., Muralidhar, K. and Biswas, K. "Experimental study of flow past a square cylinder at high reynolds numbers", *Exp. Fluids*, **29**, pp. 553-563 (2000).
15. Okamoto, T. and Yagita, M. "The experimental investigation on the flow past a circular cylinder of finite length placed normal to the plane surface", *Bull. JSME*, **16**, pp. 805-814 (1973).
16. Farivar, D. "Turbulent uniform flow around cylinders of finite length", *AIAA*, **19**, pp. 275-281 (1981).
17. Sumner, D., Heseltine, J.L. and Dansereau, O.J.P. "Wake structure of a finite circular cylinder of small aspect ratio", *Experiments in Fluids*, **37**, pp. 720-730 (2004).
18. Sohankar, A. "Flow over a bluff body from moderate to high reynolds numbers using large eddy simulation", *Computers & Fluids*, **35**, pp. 1154-1168 (2006).
19. Tyagi, H., Liu, R., Ting, D.S.-K. and Johnston, C.R. "Measurement of wake properties of a sphere in free stream turbulence", *Experimental Thermal and Fluid Science*, **30**, pp. 587-604 (2006).
20. Jorgensen, E., *How to Measure Turbulence with Hot-wire Anemometers*, Dantec Dynamics (2002).
21. Yavuzkurt, S. "A guide to uncertainty analysis of hot-wire data", *J. Fluids Engineering*, **106**, pp. 181-186 (1984).

