



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۳، صفحه ۱۳ تا ۲۳
Vol. 46, No. 1, Summer 2014, pp. 13- 23



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)
(AJSR - ME)

مطالعه تجربی جریان پایین دست یک سیلندر با سه مقطع متفاوت با استفاده از دستگاه سرعت سنج سیم داغ

علی سعیدی نژاد^۱، احمد سوهانکار^۲، علی اکبر دهقان^{۳*}

۱- دانشجویی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد

(دریافت ۱۳۹۰/۸/۲۵، پذیرش ۱۳۹۲/۲/۹)

چکیده

نیروهای اعمالی به سازه‌های مختلف به طبیعت و ویژگی‌های جریان در اطراف این سازه‌ها بستگی دارد. همچنین بررسی رفتار جریان در اطراف سازه‌هایی با مقاطع دایره‌ای و مربعی در کاربردهای مهندسی اهمیت دارد. در تحقیق حاضر، جریان هوا در پایین دست سه مدل دوبعدی با مقاطع مربعی با زاویه حمله صفر و ۴۵ درجه و دایره‌ای به صورت تجربی در تونل باد دانشگاه یزد و با استفاده از جریان سنج سیم داغ مطالعه شده است. ضریب انسداد بر اساس اندازه تصویر مدل عمود بر جریان و طول ضلع مقطع تونل باد، برای دو مدل با مقطع دایره‌ای و مربعی با زاویه حمله صفر، ۲/۲ درصد و مدل با مقطع مربعی با زاویه حمله ۴۵ درجه، ۳/۱۴ درصد است. در این بررسی تاثیر عدد رینولدز و شکل مدل بر روی ویژگی‌های جریان پایین دست سیلندر با استفاده از پروفیل سرعت و اغتشاش‌های بی بعد و عدد استروهاال مطالعه شده است. مقدار عدد استروهاال و ویژگی‌های دیگر جریان پایین دست سیلندرها در تحقیق حاضر با نتایج دیگر محققین مطابقت خوبی دارد. مقایسه نتایج سه مدل با یکدیگر نشان داد که سرعت جریان پشت مدل، از فاصله $X/D < 4$ سیلندر مربعی با زاویه حمله ۴۵ درجه نسبت به دو سیلندر دیگر بیشتر کاهش داشته است. همچنین این مطالعه نشان داده که اغتشاش‌های سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر در فاصله $X/D < 2$ بیشتر از دو سیلندر دیگر است.

کلمات کلیدی

تونل باد، جریان سنج سیم داغ، دنباله، عدد رینولدز، سیلندر مربعی و دایره‌ای.

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: adehghan@yazduni.ac.ir

۱- مقدمه

شبیه‌سازی جریان عبوری از سیلندره‌های با مقطع دایره‌ای و مربعی بعنوان نمونه‌های عملی از سازه‌ها و ساختمان‌های بلند، پل‌ها، دودکش‌ها، برج‌های خنک‌کن، مبدل‌های حرارتی و غیره از اهمیت زیادی در صنعت و کاربردهای مهندسی برخوردار است. جریان عبوری از اطراف اینگونه اجسام که به اجسام جریان‌بند معروف هستند، باعث ایجاد و ریزش گردابه‌ها در پشت جسم می‌شود و فرکانس ریزش این گردابه‌ها به عدد رینولدز و نوع هندسه بستگی دارد. گردابه‌های جدا شده و نوسانات سرعت پشت اینگونه اجسام می‌تواند باعث ایجاد نیروهای برا و پسای نوسانی و نویز شود که در مواردی می‌تواند تاثیرات مخربی بر روی سازه ایجاد نماید.

عمده کارهای انجام شده مرتبط با جریان عبوری از یک سیلندر، مربوط به سیلندر با مقطع دایره‌ای است و جریان اطراف سیلندره‌های مربعی مخصوصاً تحت زاویه حمله کمتر بررسی شده است. در دهه‌های اخیر، تحقیقات زیادی روی جریان در اطراف سیلندرها با هندسه‌های گوناگون انجام شده است. اکثر بررسی‌های تجربی انجام شده بر روی سیلندره‌های دو بعدی با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری مانند مرئی‌سازی، جریان‌سنج سیم و فیلم داغ و سرعت‌سنج لیزری برای اعداد رینولدز و هندسه‌های مختلف انجام شده است. برحسب نظر محققین مربوطه، هر یک از این مطالعات از دیدگاهی خاص، جریان حول سیلندرها را بررسی نموده‌اند که از این جمله می‌توان به بررسی توزیع فشار، ضرایب نیرو، ریزش گردابه، اعداد استروهمال^۱ و الگوهای جریان اشاره نمود. اکثر این تحقیقات به‌وسیله آزمایش‌های تونل باد صورت گرفته‌اند. در ادامه، به چند نمونه از این مطالعات اشاره می‌شود.

اکاجیما^۲ [۱] به صورت تجربی جریان عبوری از یک سیلندر مربعی و مستطیلی را برای اعداد رینولدز ۷۰ الی ۲۰۰۰۰ با استفاده از سرعت‌سنج سیم داغ در یک تونل باد مدار باز، بررسی کرد و عدد استروهمال را به صورت تابعی از عدد رینولدز ارائه نمود. همچنین توزیع سرعت و ویژگی‌های جریان اطراف سیلندرها را تعیین کرد. نتایج این تحقیق نشان داد زمانی که نسبت عرض به ارتفاع سیلندر به مقدار حدود ۲ الی ۳ کاهش می‌یابد، تغییرات شدیدی در عدد استروهمال ایجاد می‌شود که رابطه مستقیمی با الگوی جریان دارد.

ژاو^۳ و همکاران [۲] به صورت تجربی جریان در پایین‌دست یک سیلندر دایره‌ای را در عدد رینولدز ۵۶۰۰ بررسی کردند. هدف از تحقیق آنها بررسی و شناسایی گردابه‌های توربولانسی در

پشت سیلندر دایره‌ای و تعیین یک مدل جنبشی برای این جریان بود.

انگ^۴ و همکاران [۳] با استفاده از دستگاه جریان‌سنج دوبعدی ویژگی‌های جریان پایین‌دست یک سیلندر دایره‌ای را در عدد رینولدز ۳۹۰۰ بررسی کردند. بخشی از تحقیق آنها صرف نحوه کالیبره کردن و استفاده از یک پراب دوبعدی شده است. آنها همچنین نتایج بدست آمده از پراب دوبعدی خود را با یک پراب ۴ سنسوره مقایسه نمودند و پروفیل‌های سرعت و اغتشاش‌های بی‌بعد و دیگر داده‌های آماری را تعیین نمودند.

شائو^۵ و همکاران [۴] جریان حول یک سیلندر دایره‌ای را در عدد رینولدز ۵۸۰۰ به دو روش معادله‌های متوسط‌گیری شده عدد رینولدز^۶ و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۷ به‌صورت عددی و به کمک نرم‌افزار تجاری فلوئنت^۸ مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، کمیت‌های کلی متوسط نظیر ضرایب نیروی پسا و برآ، ضریب فشار و عدد استروهمال بررسی شده و کمیت‌های متوسط جریان و خواص توربولانسی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که روش‌های معادله‌های متوسط‌گیری شده عدد رینولدز دوبعدی و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ دوبعدی در مقایسه با نتایج پیش‌بینی شده با روش‌های عددی و آزمایشگاهی سایر محققین از تشخیص و پیش‌بینی ناحیه ویک سیلندر دایره‌ای ناتوان هستند و روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ سه‌بعدی برای شبیه‌سازی چنین جریان پیچیده‌ای لازم است.

سها^۹ و همکاران [۵] دو مولفه سرعت در ناحیه ویک یک سیلندر مربعی با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ در دو عدد رینولدز ۸۷۰۰ و ۱۷۶۲۵ اندازه‌گیری نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که داده‌های تجربی روندهایی قابل پیش‌بینی از نظر بازیابی ویک^{۱۰} و کاهش آشفتگی دارند. تطابق داده‌ها با نتایج دیگر محققین در کل از نظر مقدار متوسط مولفه‌های سرعت قابل قبول بود، ولی از نظر شدت اغتشاش‌ها، تطابق قابل قبولی حاصل نشد و شدت اغتشاش‌های این مطالعه کم‌تر از کارهای دیگران بود. عواملی همچون نسبت منطری، نسبت انسداد و آشفتگی جریان بالادست دلایل تفاوت در نتایج می‌تواند باشد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش شدت آشفتگی بالادست، اختلاف نتایج این مطالعه و کارهای گذشته را کاهش می‌دهد.

لین^{۱۱} و همکاران [۶] با استفاده از جریان‌سنج لیزری، اندازه‌گیری‌هایی را در یک تونل آب بر روی یک سیلندر مربعی دوبعدی در عدد رینولدز ۲۱۴۰۰ انجام داده‌اند. آنها مولفه‌های متناوب و تصادفی نوسانات سرعت را در اطراف سیلندر مربعی از هم جدا

دستگاه جریان سنج سیم داغ اندازه گیری شده اند. میزان سرعت-های بالادست و اعداد رینولدز مربوط به آنها برای این سه نوع سیلندر در جدول (۱) ارائه شده است.

اندازه گیری میزان سرعت و اغتشاش های جریان با استفاده از دستگاه جریان سنج سیم داغ و یک پراب یک بعدی انجام شده است. اساس کار دستگاه جریان سنج سیم داغ، انتقال حرارت از یک سیم گرم به جریان سیال است. سنسور سیم داغ بر روی پایه های پراب نصب شده و از طریق کابل های الکترونیکی به مدار الکترونیکی دما ثابت که شامل یک پل وتستون است، وصل می شود. سنسور جریان سنج سیم داغ که یکی از مقاومت های پل وتستون است از جنس تنگستن و دارای قطر $5 \mu\text{m}$ و طول 5 mm است. هنگامی که جریان سیال از روی سنسور عبور می کند، دمای سنسور کاهش می یابد و در نتیجه توازن پل وتستون به هم می خورد. برای برقراری توازن پل، یک ولتاژ اضافه به دوسر پل وتستون القا می شود. با مشخص شدن رابطه بین سرعت جریان و ولتاژ اضافه شده به دوسر پل وتستون، رابطه کالیبراسیون استخراج شده و دستگاه جریان سنج سیم داغ آماده استفاده است. داده های ولتاژ آنالوگ خروجی دستگاه با استفاده از یک کارت تبدیل آنالوگ به دیجیتال ۱۲ بیتی با حداکثر سرعت نمونه برداری 200 KHz جمع آوری می شوند و سپس سنسور پراب جریان سنج قبل از استفاده به صورت استاتیکی و دینامیکی کالیبره شده و نویزهای اضافه با استفاده از یک فیلتر پایین گذر حذف می شوند. مقادیر دمای جریان اتاق آزمون با استفاده از یک سنسور دما که بر روی دیواره در داخل اتاق آزمون نصب شده است، اندازه گیری شده و نتایج جریان سنج سیم داغ با توجه به مقادیر دمای اندازه گیری شده، در داخل نرم افزار مربوطه تصحیح می شود.

پراب دستگاه جریان سنج سیم داغ به صورت مایل (با زاویه 30° درجه نسبت به افق) توسط نگهدارنده خود به گونه ای در جریان قرار می گیرد که سنسور آن دقیقاً عمود بر جریان قرار داشته باشد. نحوه استقرار مدل و پراب جریان سنج سیم داغ در داخل اتاق آزمون تونل باد نیز در شکل (الف) نشان داده شده است. نحوه قرارگیری مدل در داخل تونل باد و محل محور مختصات نیز در شکل (ب) نشان داده شده است. برای حرکت پراب در نقاط مختلف از یک مکانیزم انتقال دهنده دقیق با سه درجه آزادی استفاده شده است که دقت این مکانیزم 0.1 mm میلیمتر است. داده برداری در مکان، X های مختلف (پایین دست مدل) و Y های مختلف (در 41° نقطه و عمود بر جهت جریان)

کردند و همچنین رابطه ای بین وضعیت جریان (به صورت کمی) و توزیع آشفتگی ارائه نمودند.

وانگ^{۱۲} و همکاران [۷] و سوهانکار [۸] از شبیه سازی گردابه های بزرگ را برای مطالعه جریان یکنواخت روی یک سیلندر مربعی استفاده کردند. سوهانکار [۸] جریان سیال روی یک سیلندر مربعی با اعداد رینولدز مختلف، از 10^3 تا 5×10^6 را بررسی کرد. هندسه در این مطالعه دارای نسبت منطقی ۴ و نسبت انسداد، ۰.۶ بود. در این تحقیق از دو روش زیرشبکه ای برای مدل نمودن تنش های مربوط به مقیاس های کوچک در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده شده است.

مامر ازگرن^{۱۳} [۹] با استفاده از روش دستگاه سرعت سنجی تصویری ذرات^{۱۴}، متوسط زمانی سرعت، ورتیسیت، مجذور متوسط مربعات سرعت و ویژگی های ورتیسیت لحظه ای و غیره را در پایین دست سیلندر دایره ای، مربعی با زاویه حمله صفر و 45° درجه در اعداد رینولدز 550 و 3400 را بررسی نمود. در این تحقیق همچنین عدد استروهمال برای محدوده اعداد رینولدز 550 الی 3400 برای مشخصه های ویک محاسبه شد. لایه های برشی مجاور نواحی حبابی (چرخشی) پشت سیلندر به صورت های فیزیک جریان و طول های تشکیل ورتکس کارمن در این تحقیق توصیف شده است.

هدف مقاله حاضر، مقایسه نتایج تجربی حاصل از جریان در اطراف سه سیلندر دوبعدی با مقاطع مربعی در زاویه حمله صفر و 45° درجه و سیلندر با مقطع دایره ای در چهار عدد رینولدز به صورت مقادیر عدد استروهمال، منحنی های سرعت متوسط و اغتشاشات جریان است. هدف دیگر این تحقیق مقایسه نتایج حاصل با نتایج کارهای گذشته است.

۲- روش آزمایش

اندازه گیری های تجربی در تونل باد مدار باز دانشگاه یزد که از نوع TQ44 است، صورت گرفته است. سطح مقطع تونل دارای ابعاد $457 \times 457 \text{ mm}^2$ و طول کانال آن 1200 mm است. این تونل بر اساس قدرت متفاوت فن، مقادیر مختلف سرعت را ایجاد می کند. بیشترین سرعت ایجاد شده توسط این تونل باد در حدود 30 m/s و حداکثر درصد اغتشاش های ورودی به اتاق آزمون 0.4% درصد است. ضریب انسداد مدل سیلندر دایره ای و مربعی در حالت زاویه حمله صفر $2/2$ درصد و برای حالت سیلندر مربعی با زاویه حمله 45° درجه، $3/14$ درصد است. مقادیر سرعت متوسط و اغتشاش های جریان پایین دست مدل با استفاده از

۳- بررسی نتایج

۳-۱- فرکانس ریزش گردابه

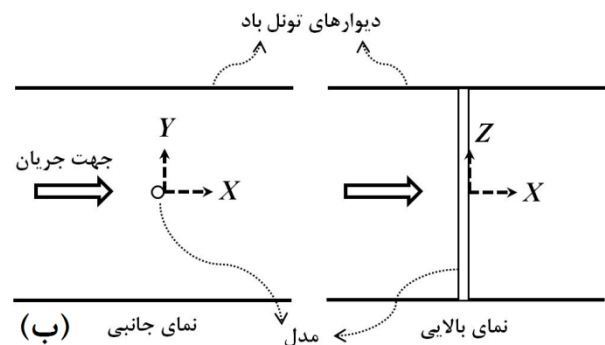
اصولا جریان سنج سیم داغ، یکی از بهترین وسایل اندازه گیری فرکانس ریزش گردابه است. به گونه‌ای که حتی در مطالعاتی که کار اصلی تجربی با وسایل دیگری انجام می‌گیرد، برای اندازه گیری فرکانس ریزش گردابه از جریان سنج سیم داغ استفاده می‌شود. هنگامی که پراب دستگاه جریان سنج سیم داغ در مسیر ریزش گردابه‌ها قرار می‌گیرد، شکل موج سرعت جریان (نمودار تغییرات سرعت نسبت به زمان) به صورت سینوسی دیده می‌شود. در نمودار تبدیل فوریه این موج، یک قله با دامنه ماکزیمم بوجود می‌آید. فرکانس ریزش گردابه‌ها با فرکانسی که دارای ماکزیمم مقدار دامنه در نمودار تبدیل فوریه شکل موج جریان است، مطابقت دارد. برای محاسبه عدد استروهال از این فرکانس استفاده شده است. فرکانس ریزش گردابه‌ها به صورت بی‌بعد، عدد استروهال ($St = fD / U$) نام دارد و تابعی از عدد رینولدز است. در این تحقیق اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها انجام شده و با نتایج کارهای گذشته مقایسه شده است.

مقادیر عدد استروهال برحسب عدد رینولدز برای سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر و ۴۵ درجه در شکل (۲) و برای سیلندر دایره‌ای در شکل (۳) برای تحقیق حاضر در محدوده اعداد رینولدز ۲۲۵۰ الی ۱۳۷۰۰ نشان داده شده و با نتایج اکاجیما [۱]، ساها و همکاران [۵]، وانگ و همکاران [۷]، سوهانکار [۸]، ازگورن [۹]، دوتا^{۱۵} و همکاران [۱۱]، چن^{۱۶} و همکاران [۱۲] و ناکاگاوا^{۱۷} و همکاران [۱۳] مقایسه شده است. همان طور که در شکل (۲) دیده می‌شود، مقادیر عدد استروهال مربوط به سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر (نقاط پایینی در شکل (۲)) با افزایش عدد رینولدز، ابتدا روندی صعودی با شیب کم دارد (عدد استروهال ۰/۱۴ در عدد رینولدز ۵۸۶۰) اما از عدد رینولدز ۶۰۰۰ به بعد مقدار آن افت داشته تا اینکه به مقدار ۰/۱۳۳ در عدد رینولدز ۱۳۷۰۰ می‌رسد. بنابراین می‌توان بیان نمود که تغییرات عدد استروهال در محدوده عدد رینولدز انتخابی برای این مدل کم است. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود همخوانی نتایج این تحقیق با نتایج سایر محققین در اعداد رینولدز بالاتر قابل قبول است. عدد استروهال برای سیلندر مربعی با زاویه حمله ۴۵ درجه (نقاط بالایی در شکل (۲)) با افزایش عدد رینولدز روند نزولی داشته به صورتی که از مقدار ۰/۱۸۲ در عدد رینولدز ۲۵۰۰ به مقدار ۰/۱۷۵ در عدد رینولدز ۱۹۴۰۰ می‌رسد. مقدار عدد استروهال برای سیلندر دایره‌ای برای

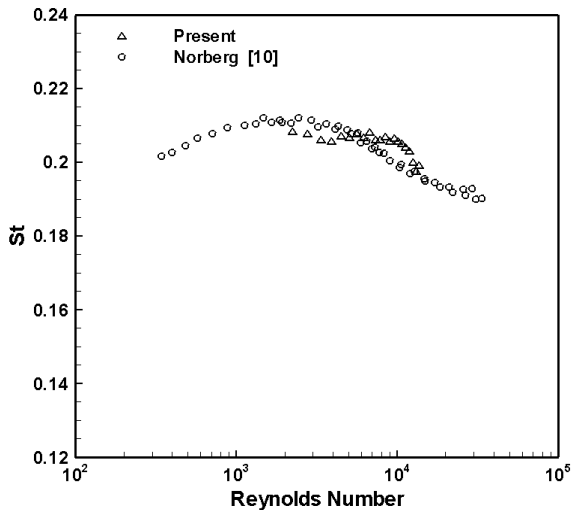
نسبت به لبه پایین دست مدل انجام شده است. تمامی اندازه‌گیری‌های انجام شده در این تحقیق در پایین دست مدل‌ها و در موقعیت میانی اتاق آزمون $Z=0$ می‌باشند (به شکل (۱) رجوع شود).

سرعت متوسط بالا دست سیلندر دایره‌ای و مربعی با زاویه حمله صفر (m/s)	۵	۱۰	۱۵	۲۰
سرعت متوسط بالا دست سیلندر مربعی با زاویه حمله ۴۵ درجه (m/s)	۳/۵۷	۷/۱۴	۱۰/۷	۱۴/۳
عدد رینولدز بر اساس اندازه D_1 یا D_2 (متناسب با هندسه)	۳۳۳۳	۶۶۶۷	۱۰۰۰۰	۱۳۳۳۳

جدول (۱): اعداد رینولدز مربوط به مدل‌ها بر اساس قطر آنها



شکل (۱): (الف) نحوه قرار گیری مدل‌ها و پراب در داخل تونل باد و (ب) شماتیک محل محورهای مختصات نسبت به مدل

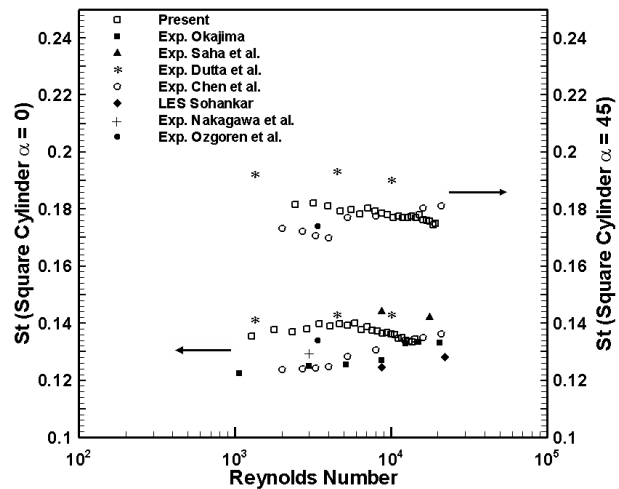


شکل (۳): مقادیر عدد استروهل برای سیلندر دایره‌ای بر اساس اعداد رینولدز

در شکل (۴a) نتایج این تحقیق برای سرعت متوسط و اغتشاش‌های جریان پایین دست سیلندر دایره‌ای در اعداد رینولدز ۳۳۳۳ و ۶۶۶۶ با نتایج عددی (روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ) شائو و همکاران [۴] ($Re = 5800$)، نتایج تجربی ژاو و همکاران [۲] ($Re = 5600$) و نتایج تجربی انگ و همکاران [۳] ($Re = 3900$) در موقعیت‌های $X/D = 3, 5$ و 10 مقایسه شده‌اند. در شکل (۴a) منحنی‌های سرعت بی‌بعد در فاصله ۵ و $X/D = 3$ در اعداد رینولدز ۳۳۳۳ و ۶۶۶۶ با نتایج تجربی انگ [۳] مقایسه شده‌اند. همانگونه که در شکل (۴a) دیده می‌شود نتایج تحقیق حاضر در عدد رینولدز ۳۳۳۳ هم‌خوانی خوبی با نتایج تجربی دارد ولی در عدد رینولدز ۶۶۶۶ نتایج کمی اختلاف دارند که تفاوت در اعداد رینولدز استفاده شده در روش تجربی و عددی می‌تواند دلیل آن باشد. در $X/D = 10$ نتایج این تحقیق با نتایج کارهای گذشته مقایسه شده است. مقایسه نتایج عددی شائو [۴]، تجربی ژاو [۲] و انگ [۳] با تحقیق حاضر، با وجود اختلاف اعداد رینولدز، هم‌خوانی خوبی دارند.

در شکل (۴b) میزان اغتشاش‌های بی‌بعد به صورت $(U_{rms} / U)^2$ (فقط برای مقایسه نتایج سیلندر دایره‌ای تحقیق حاضر با نتایج دیگر محققین از این مقدار به عنوان میزان اغتشاش‌ها استفاده شده است) در موقعیت‌های $X/D = 3, 5$ و 10 = در اعداد رینولدز ۳۳۳۳ و ۶۶۶۶ تحقیق حاضر با نتایج تجربی انگ [۳] و ژاو [۲] مقایسه شده‌اند. همانگونه که از این شکل مشخص است نتایج تحقیق حاضر در عدد رینولدز ۳۳۳۳ و ۶۶۶۶ با وجود اختلاف اعداد رینولدز، هم‌خوانی خوبی با نتایج موجود دارند.

محدوده وسیعی از اعداد رینولدز توسط محققین زیادی برابر با ۰/۲۱ گزارش شده است.



شکل (۴): مقادیر عدد استروهل برای سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر و ۴۵ درجه بر حسب اعداد رینولدز

در تحقیق حاضر عدد استروهل مربوط به سیلندر دایره‌ای در محدوده عدد رینولدز ۲۲۵۰ الی ۱۳۷۰۰ تقریباً ۰/۲۰۸ است که با نتایج نوربرگ [۱۰] هم‌خوانی خوبی دارد. عدد استروهل تحقیق حاضر در محدوده اعداد رینولدز ۲۲۵۰ الی ۱۳۷۰۰ مربوط به سیلندر دایره‌ای به طور متوسط ۳۵ و ۱۴ درصد به ترتیب بیشتر از سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر و ۴۵ درجه است. اختلاف مقادیر عدد استروهل مربوط به سه هندسه در اعداد رینولدز ثابت به طبیعت جریان اطراف این مدل‌ها مربوط می‌شود. با رجوع به شکل‌های (۲) و (۳) تفاوت‌های کمی بین بعضی نتایج بدست آمده از این تحقیق و نتایج تحقیق‌های گذشته دیده می‌شود که دلیل آن می‌تواند ناشی از اختلاف در میزان انتخابی ضریب انسداد و ضریب منطری مدل، نحوه اندازه‌گیری، زبری سطح مدل، نوع تونل (تونل باد یا تونل آب) و شدت اغتشاش‌های متفاوت جریان هوای آزاد باشد.

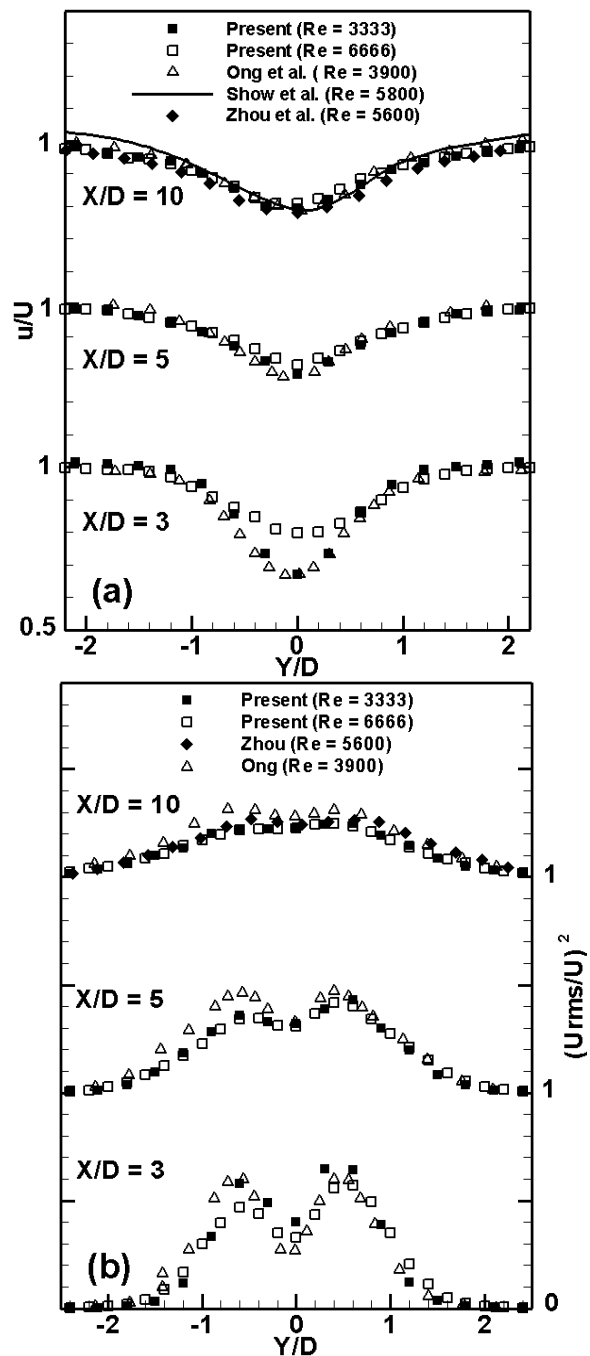
۲-۳- متوسط زمانی سرعت و اغتشاش‌ها

در این تحقیق از سرعت متوسط در فاصله‌ای به اندازه ۸ برابر قطر سیلندر، در بالادست مدل بعنوان سرعت مرجع برای تعیین عدد رینولدز و برای بی‌بعد کردن سرعت و اغتشاش‌های پایین دست مدل استفاده شده است. برای اندازه‌گیری سرعت و اغتشاش‌های جریان در بالادست مدل نیز از پراب یک‌بعدی دستگاه جریان سنج سیم داغ استفاده شده است. مقادیر عدد رینولدز محاسبه شده متناظر با سرعت مرجع بالادست مدل، در جدول (۱) برای سه هندسه ارائه شده است.

در شکل (5a) سرعت بی بعد در موقعیت‌های $X/D = 1, 2, 3, 5$ و 10 با نتایج = تحقیق حاضر در اعداد رینولدز 10000 و 13333 با نتایج تجربی ساها [5] (دو عدد رینولدز 8700 و 17625) مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هم‌خوانی نتایج قابل قبول است.

نتایج این تحقیق با نتایج تجربی لین [6]، عددی سوهانکار [8] و وانگ [7] فقط در موقعیت $X/D = 1$ اختلاف دارد در صورتی که روند تغییرات سرعت تقریباً در هر سه موقعیت با نتایج سایر مراجع مطابقت دارد. علت وجود اختلاف بین نتایج در موقعیت $X/D = 1$ می‌تواند ناشی از نوع روش اندازه‌گیری در نتایج تجربی و اختلاف آن با روشهای عددی و ضعف اندازه‌گیری با دستگاه سرعت‌سنج سیم داغ در نواحی با جریان برگشتی باشد. در این موقعیت، نتایج تحقیق حاضر با نتایج تجربی ساها [5] که از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ استفاده کرده است بیشتر هم‌خوانی دارد تا نتایج تجربی لین و همکاران [6] که از دستگاه جریان‌سنج لیزری یا سوهانکار [8] و وانگ [7] که از روش عددی استفاده کرده‌اند. با افزایش عدد رینولدز از 10000 به 13333 اختلاف نتایج تحقیق حاضر با دیگر محققین و مخصوصاً ساها کمتر می‌شود. یکی از دلایل اختلاف نتایج می‌تواند تفاوت در اعداد رینولدز باشد. در شکل (5a) میزان اغتشاش‌ها بصورت U_{rms}/U در موقعیت‌های $X/D = 1, 2, 3, 5$ و 10 در اعداد رینولدز 10000 و 13333 با نتایج سایر محققین مقایسه شده‌اند. همانگونه که در شکل (5a) نشان داده شده است اغتشاش‌ها در موقعیت‌های $X/D = 1$ و 2 با نتایج ساها [5] مطابقت خوبی دارند ولی در موقعیت $X/D = 3/5$ به علت اینکه داده‌های این تحقیق در موقعیت $X/D = 3$ اندازه‌گیری شده‌اند، مقادیر اغتشاش‌ها بیشتر از نتایج دیگر محققین است.

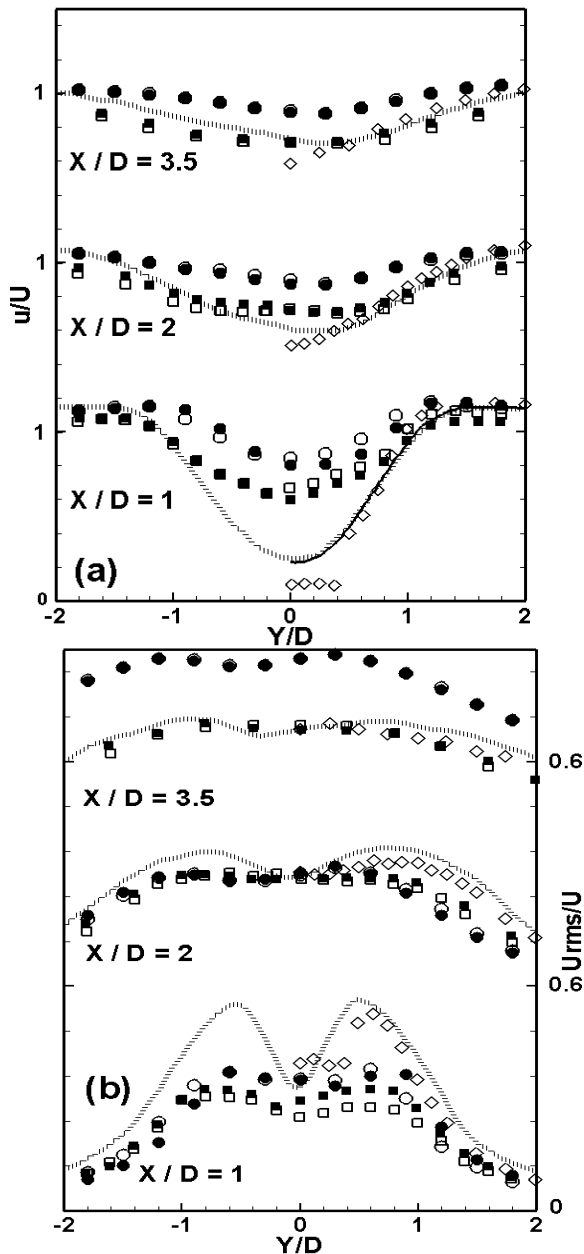
شکل (6) توزیع سرعت بی بعد در موقعیت‌های 10 و 5 و $X/D = 3$ از سه سیلندر در عدد رینولدز 10000 (شکل (6a)) و 13333 (شکل (6b)) را نشان می‌دهد. محور افقی فاصله را در جهت عمود بر جریان (عرض) نشان می‌دهد که با استفاده از قطر سیلندر بی بعد شده است. محور عمودی نیز سرعت متوسط پشت سیلندر است که با استفاده از سرعت جریان بالادست مدل بی بعد شده است. همانطور که از این شکل دیده می‌شود در نقاط نزدیک به هر سه نوع هندسه، عرض ناحیه دنباله کوچکتر و با افزایش فاصله از آن، این ناحیه بزرگتر می‌شود. ضمناً با افزایش فاصله از سیلندرها، شدت تاثیرگذاری مدل بر جریان کمتر شده و انحراف ویژگی‌های جریان نسبت به جریان بالادست نیز کمتر می‌شود. همچنین از این شکل دیده می‌شود که سرعت جریان



شکل (4): توزیع سرعت (شکل a) و میزان اغتشاش‌ها (شکل b) در فاصله $10, 5, 3$ سیلندر دایره‌ای در اعداد رینولدز 3333 و 6666 و مقایسه با نتایج تجربی وانگ و همکاران [3] و ژاو و همکاران [2] و عددی شاو و همکاران [4]

در شکل (5) نتایج سرعت و اغتشاش‌های جریان پایین دست سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر در اعداد رینولدز 10000 و 13333 با نتایج عددی سوهانکار [8] ($Re = 3000$)، وانگ و همکاران [7] ($Re = 21400$)، تجربی ساها و همکاران [5] (8700 و 17625) و لین و همکاران [6] ($Re = 21400$) در موقعیت‌های $1, 2, 3/5$ مقایسه شده‌اند.

نشان داده شده است در بازه $0 < X/D < 4$ مقادیر سرعت پشت سیلندر دایره‌ای کمتر از سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر و 45° درجه است. در $X/D = 1$ بیشترین مقدار سرعت با مقدار 0.92 مربوط به سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر است.



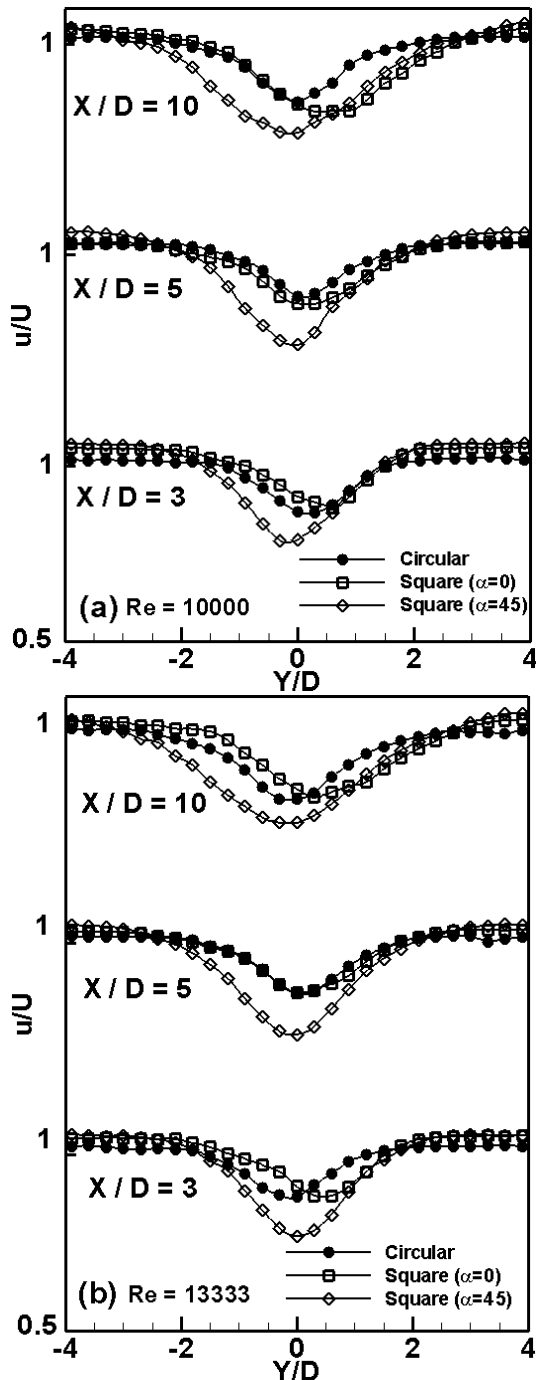
شکل (۵): نتایج توزیع سرعت (شکل a) و میزان اغتشاش‌ها (شکل b) در فاصله $X/D = 1, 2, 3.5$ سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر در اعداد رینولدز 10000 و 17625 و 8700 (به ترتیب با علامت \circ و \square و \diamond) مقایسه با نتایج تجربی ساها و همکاران [۵] (عدد رینولدز 8700 و 17625 بترتیب با علامت \square و \diamond) و لین و همکاران [۶] (با علامت \diamond) و عددی سوهانکار [۸] (با خط ممتد) و ونگ و همکاران [۷] (با خط چین)

در X/D های بزرگتر از 4 نتایج سه سیلندر به یکدیگر

در نزدیکی سیلندر مربعی با زاویه حمله 45° درجه نسبت به دو سیلندر دیگر بیشتر افت داشته است در صورتی که افت سرعت در پشت سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر و دایره‌ای تقریباً یکسان است. این اختلاف بین سیلندر مربعی با زاویه حمله 45° درجه با دو سیلندر دیگر ناشی از تفاوت ناحیه دنباله آنها است. در این شکل دیده می‌شود که مقدار سرعت کمینه در ناحیه دنباله در موقعیت‌های 5 و 3 با افزایش سرعت کاهش می‌یابد ولی در موقعیت $X/D = 10$ این مقدار تقریباً ثابت است. با افزایش عدد رینولدز عرض ناحیه دنباله برای تمامی فواصل افزایش پیدا کرده است. این مطلب می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش عدد رینولدز، لایه‌های برشی جدا شده از دو سمت مدل‌ها با زاویه بیشتری پرتاب می‌شوند و در نتیجه، عرض ناحیه ویک بزرگتر می‌شود.

شکل (۷) توزیع شدت اغتشاش‌های بی‌بعد در موقعیت‌های 10 و 3.5 از سه سیلندر در عدد رینولدز 10000 (شکل (۷a)) و 17625 (شکل (۷b)) را نشان می‌دهد. محور افقی فاصله در جهت عمود بر جریان (عرض) را نشان می‌دهد که با استفاده از قطر سیلندر بی‌بعد شده است و محور عمودی شدت اغتشاش‌های بی‌بعد به صورت U_{rms}/U می‌باشد. همانطور که از این شکل دیده می‌شود اغتشاش‌ها با افزایش فاصله برای هر سه نوع هندسه کاهش می‌یابد و اغتشاش‌های سیلندر دایره‌ای در همه فواصل و هر دو عدد رینولدز انتخابی کمتر از دو نوع سیلندر دیگر است. در نزدیکی سیلندر که پهنای ناحیه دنباله سیلندر کم است، اغتشاش‌ها نیز در Y/D های کوچک‌تری به سمت مقادیر جریان آزاد میل می‌نماید. با دور شدن از سیلندر و بزرگتر شدن پهنای ناحیه دنباله، اغتشاش‌ها در Y/D های بزرگتر به سمت مقدار متناظر با جریان آزاد میل می‌نماید. گفتنی است که در فواصل نزدیک به سیلندرها اغتشاش‌های سرعت در ناحیه دنباله دارای دو نقطه ماکزیمم مشابه است که این نقاط به نوعی نشان دهنده مکان لایه‌های برشی می‌باشند. با حرکت به سمت پایین دست و رشد لایه‌های برشی، مکان این نقطه از $Y/D = 0.25$ الی $Y/D = 0.6$ تغییر مکان می‌دهد. شدت اغتشاش‌ها در فواصل طولی تقریباً بصورت یکنواخت با یک نقطه ماکزیمم در می‌آید و مقدار آن نیز کاهش می‌یابد و بتدریج این اغتشاش‌ها در پایین دست سیلندر میرا می‌شوند.

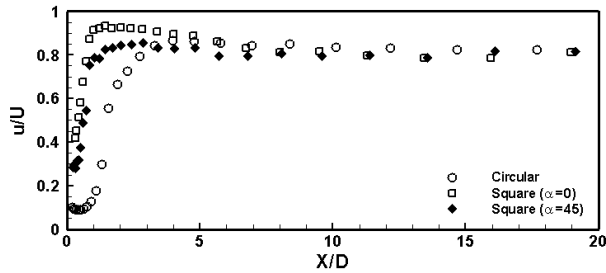
در شکل (۸) توزیع سرعت بی‌بعد در $Y/D = 0$ در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست برای هر سه سیلندر در عدد رینولدز 6666 نمایش داده شده است. همانگونه که در این شکل



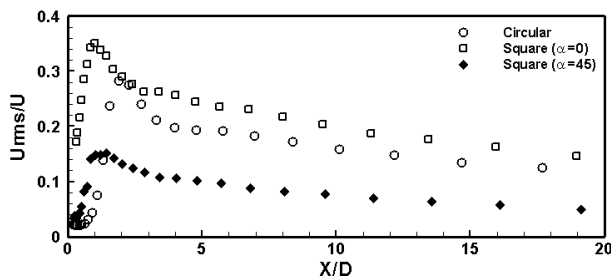
شکل (۶): توزیع سرعت بی‌بعد در موقعیت‌های $X/D=3, 5, 10$ از سه نوع سیلندر دایره‌ای، مربعی در زاویه حمله صفر و 45° درجه در عدد رینولدز 10000 (a) و 13333 (b)

نزدیکتر می‌شوند و با بیشتر فاصله گرفتن از مدل این هم‌خوانی بیشتر می‌شود. مقدار مینیمم سرعت با حرکت به سمت پایین-دست در بازه $4 < X/D < 10$ افزایش می‌یابد. هم‌زمان، اندازه ناحیه دنباله نیز افزایش می‌یابد. این دو فرآیند، فقط زمانی می‌توانند رخ دهند که سیال از هر دو طرف خط مرکزی دنباله (بالا و پایین دنباله) به داخل ناحیه دنباله جریان داشته باشد. جریان ورودی و نیز بازیابی سرعت در ناحیه دنباله، هر دو در فواصل کم در پشت سیلندر زیاد می‌شوند. اما در فاصله $4 < X/D < 10$ به علت اینکه ورود جریان به ناحیه دنباله از بالا و پایین کم می‌شود ولی عرض دنباله افزایش می‌یابد و مقدار سرعت بر روی خط مرکزی کاهش می‌یابد. مقدار سرعت خط مرکزی برای هر سه سیلندر در پایین‌دست (حتی در 20 برابر قطر سیلندر) به مقدار یک نرسیده است. دلیل آن بازیابی بسیار کند سرعت در ناحیه دنباله است که باعث می‌شود که سرعت به آرامی به مقدار یک نزدیک شود. بر اساس نتایج این تحقیق، در هیچ نقطه‌ای در پایین‌دست سیلندرها مقدار منفی سرعت مشاهده نشد. در حالی که بدلیل جریان برگشتی در پشت مدل‌ها انتظار سرعت منفی در مجاورت سیلندرها وجود دارد که به دلیل ناتوانی جریان‌سنج سیم داغ از ثبت سرعت منفی در جریان برگشتی، این واقعیت مشاهده نشد. البته همانطور که در مطالعه‌های قبلی، از جمله مطالعه ساها و همکارانش [۵] آمده است، برای سیلندرهایی دوبعدی، تنها تا حدود فاصله $1/3-1/4$ برابر قطر سیلندر در پایین‌دست آنها، جریان برگشتی وجود دارد و پس از آن، نتایج حاصل از جریان‌سنج سیم داغ معتبر است.

شکل (۹) توزیع شدت اغتشاش‌های سرعت در $Y/D=0$ در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین‌دست سه سیلندر در عدد رینولدز 6666 نمایش داده شده است. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است در بازه $2 < X/D < 10$ مقادیر شدت اغتشاش‌ها پشت سیلندر مربعی بدون زاویه حمله بیشتر از سیلندر مربعی با زاویه حمله 45° درجه و دایره‌ای است و در $X/D=1$ بیشترین شدت اغتشاش‌ها با مقدار 3.5% مربوط به سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر است. هرچه X/D بیشتر می‌شود نتایج سه سیلندر به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند.



شکل (۸): توزیع سرعت بی بعد در $Y/D=0$ در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر و 45° درجه و سیلندر دایره‌ای در عدد رینولدز ۶۶۶۶



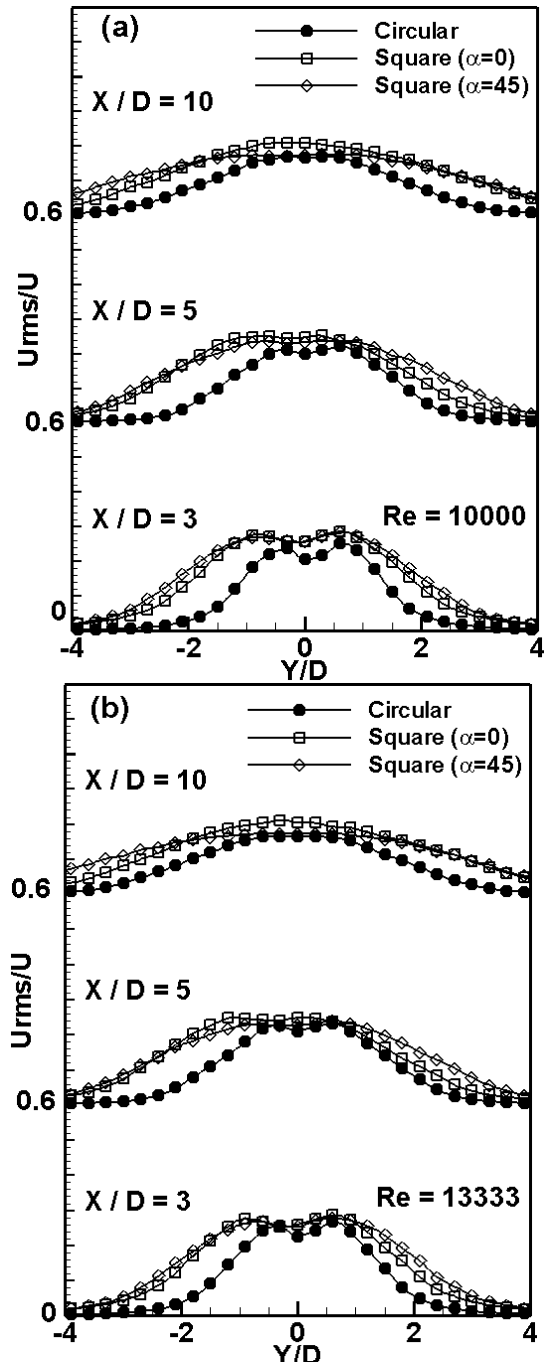
شکل (۹): توزیع شدت اغتشاشهای سرعت در $Y/D=0$ در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر و 45° درجه و سیلندر دایره‌ای در عدد رینولدز ۶۶۶۶

بعضی نتایج بدست آمده از این تحقیق و نتایج محققین دیگر احتمالاً ناشی از وجود اختلاف در اعداد رینولدز انتخابی توسط محققین و همچنین تفاوت در وسایل اندازه‌گیری و روش‌های عددی مورد استفاده است.

عدد استروهمال تحقیق حاضر در محدوده عدد رینولدز ۲۲۵۰ الی ۱۳۷۰۰ مربوط به سیلندر دایره‌ای به طور متوسط ۳۵ و ۱۴ درصد به ترتیب بیشتر از سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر و 45° درجه است که این اختلاف مقادیر عدد استروهمال سه مدل به طبیعت جریان اطراف این مدل‌ها در اعداد رینولدز ثابت مربوط می‌شود.

با مقایسه نتایج حاصله از سه نوع سیلندر تحت بررسی مشخص است که در بازه $X/D > 4$ مقادیر سرعت روی محور مرکزی، پشت سیلندر مربعی با زاویه حمله 45° درجه کمتر از سیلندر دایره‌ای و مربعی با زاویه حمله صفر درجه است و با افزایش فاصله از سیلندر مقادیر سرعت سه سیلندر به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند. با افزایش عدد رینولدز عرض ناحیه دنباله در تمامی فواصل افزایش یافته است.

مقدار شدت اغتشاش‌ها پشت سیلندر مربعی با زاویه حمله صفر و 45° درجه در عدد رینولدز ۶۶۶۶، در فاصله $X/D=1$ دارای مقدار ماکزیمم است ولی برای سیلندر دایره‌ای این نقطه ماکزیمم در فاصله $X/D=2$ قرار دارد. در عدد رینولدز بالاتر نیز



شکل (۷): توزیع شدت اغتشاشهای بی بعد در موقعیت‌های $X/D=3, 5, 10$ از سه سیلندر در عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ (a) و ۱۳۳۳۳ (b)

۴- جمع‌بندی

در این تحقیق، با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ جریان اطراف سه سیلندر با مقطع دایره‌ای، مربعی با زاویه حمله صفر و 45° درجه مورد مطالعه قرار گرفته و با نتایج دیگر محققین مقایسه شده است. مقدار عدد استروهمال و ویژگی‌های دیگر جریان پایین دست سیلندرها در تحقیق حاضر با نتایج دیگر محققین تطبیق خوبی دارد. علت وجود اختلافات جزئی بین

$\frac{U_{rms}}{U}$	شدت اغتشاشهای سرعت
U	متوسط سرعت لحظه‌ای در امتداد جریان هوا، m/s
u'	سرعت نوسانی در امتداد جریان هوا، m/s
U_{rms}	مجدور متوسط مربعات سرعت نوسانی جریان هوا، m/s

علائم یونانی

α	زاویه حمله، degree
ν	ویسکوزیته، m^2/s

مقادیر شدت اغتشاش‌ها روی خط مرکزی، پشت سیلندر مربعی بدون زاویه حمله بیشتر از سیلندر مربعی با زاویه حمله ۴۵ درجه و دایره‌ای است. با فاصله گرفتن از مدل مقادیر اغتشاش‌های سه سیلندر در تمامی اعداد رینولدز به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند. میزان اغتشاش‌ها با افزایش فاصله برای هر سه سیلندر کاهش می‌یابد.

۵- فهرست علائم

$D_1 \text{ or } D_2$	m	تصویر قطر سیلندر عمود بر جریان،
f	Hz(Hz)	فرکانس ریزش گردابه،
$Re = \frac{UD}{\nu}$		عدد رینولدز
$St = \frac{fD}{U}$		عدد استروهل

computer", Report CFD 96-03, University of Illinois at Urbana Champaign, Contract No. 0014-92-J-1334 of office of Naval Research, 1996.

۶- مراجع

- Sohankar, A., "Flow over a bluff body from moderate to high Reynolds numbers using large eddy simulation", *Computers & Fluids*, Vol. 35, 1154– 1168, 2006. [۸]
- Ozgoen, M., "Flow structure in the downstream of square and circular cylinders", *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 17, 225– 235, 2006. [۹]
- Norberg, C., "Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 17, 57– 96, 2003. [۱۰]
- Dutta, S., Muralidhar, K., Panigrahi P.K., "Influence of the orientation of a square cylinder on the wake properties", *Experiments in Fluids*, Vol. 34, 16– 23, 2003. [۱۱]
- Chen, J. M., Liu, CH., "Vortex shedding and surface pressures on a square cylinder at incidence to a uniform air stream", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, 592– 597, 1999. [۱۲]
- Nakagawa, S., Nitta, K., Senda, M., "An experimental study on unsteady turbulent near wake of a rectangular cylinder in channel flow", *Experiments in Fluids*, Vol. 27(3), 284– 94, 1999. [۱۳]
- Okajima, A., "Strouhal numbers of rectangular cylinders", *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 123, 379- 398, 1982. [۱]
- Zhou, Y., Antonia, R. A., "A study of turbulent vortices in the near wake of a cylinder", *J. Fluid Mech.*, 253, 643– 661, 1993. [۲]
- Ong, L., Wallace, J., "The velocity field of the turbulent very near wake of a circular cylinder", *Experiments in Fluids*, Vol. 20, 441– 453, 1996. [۳]
- Shao, J., Zhang, C., "Numerical analysis of the flow around a circular cylinder using RANS and LES", *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, No. 5, 301– 307, 2006. [۴]
- Saha, A. K., Muralidhar, K., Biswas, G., "Experimental study of flow past a square cylinder at high Reynolds numbers", *Experiments in Fluids*, Vol. 29, 553– 63, 2000. [۵]
- Lyn, D. A., Einav, S., Rodi W., Park, J. H. , "A laser-Doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristics of the turbulent near wake of a square cylinder", *Journal Fluid Mechanics*; Vol. 304, 285– 319, 1995. [۶]
- Wang, G., Choudhuri, PG., Bhandarkar MA. And Vanka, SP., "Large eddy simulations of bluff body wakes on parallel

۷- زیر نویس ها

-
- ^۱ Strouhal Number
^۲ Okajima A.
^۳ Zhou, Y.
^۴ Ong, L.
^۵ Shao, J.
^۶ RANS
^۷ LES
^۸ FLUENT
^۹ Saha, AK.
^{۱۰} Wake Recovery
^{۱۱} Lyn, DA.
^{۱۲} Wang, G.
^{۱۳} Ozgoren, M.
^{۱۴} Particle Image Velocimetry (PIV)
^{۱۵} Dutta, S.
^{۱۶} Chen, JM.
^{۱۷} Nakagawa, S.