

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده: مکانیک
گروه: تبدیل انرژی

بررسی تجربی دنباله‌های تشکیل شده پشت استوانه ثابت و چرخان

دانشجو: احسان سوختانلو

اساتید راهنما:

دکتر محمود فرزانه گرد

دکتر امیر بک خوشنویس

(دانشگاه تربیت معلم سبزوار)

استاد مشاور:

دکتر شهرام هاشمی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

خرداد ۸۸

تقديم به:

روح پدرم

تشکر و قدردانی

در آغاز، بر خود لازم می‌دانم مراتب تشکر و قدردانی خود را از استادان گرانقدر جناب دکتر فرزانه و دکتر خوشنویس که نظرات ارزنده‌شان همیشه راه‌گشای اینجانب بود اعلام دارم.

همچنین،

از دوستان گرامی ام آقایان مهندس مهدی کاظمی و مهندس علی جلالی،
از مدرسان دانشگاه تربیت معلم سبزوار آقایان مهندس صالح آبادی، میری و
روشنفکر،

و از کارکنان شرکت فراسنجش صبا، بویژه سازنده دستگاه تونل باد سیم داغ دکتر
علی اردکانی که در راهنمایی‌ها و پشتیبانی‌های فنی ارزنده‌ای را به اینجانب داشته-
اند، قدردانی می‌نمایم.

چکیده

با توجه به اهمیت بررسی جریان حول اجسام حجیم و تأثیر پارامترهای مختلف بر روی دنباله اجسام، در این تحقیق، مشخصه‌های دنباله سیلندر ثابت برای اعداد رینولدز و شرایط مختلف و تأثیر چرخش سیلندر بر روی این مشخصه‌ها را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در آزمایشهای انجام گرفته ابتدا اثرات عدد رینولدز بر روی مشخصه‌های دنباله سیلندر ثابت مورد بررسی قرار گرفته، سپس تأثیر عوامل نسبت انسداد محفظه آزمایش و شدت اغتشاشات جریان ورودی به محفظه بر روی پارامترهای دنباله نشان داده شده است و در انتها به بررسی دنباله سیلندر چرخان در سرعت دوران و اعداد رینولدز متفاوت پرداخته شده است.

برای تولید جریان هوا در این آزمایشها، از تونل باد مدار باز استفاده شده است. اتاقک آزمایش دستگاه تونل باد مورد استفاده دارای طول ۱۶۸ سانتیمتر، عرض ۴۰ سانتیمتر و ارتفاع ۴۰ سانتیمتر می‌باشد. این دستگاه تونل قادر به ایجاد جریان سیال با سرعت ۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه است و اغتشاشات جریان داخل محفظه آزمایش آن ۰/۱ درصد می‌باشد. برای اندازه‌گیری مشخصه‌های جریان، از جریان سنج سیم داغ دما ثابت استفاده شده است که این دستگاه توانایی اندازه‌گیری سرعت متوسط، شدت اغتشاشات و فرکانس گردابه‌های خارج شونده از پشت سیلندر را دارد. برای بررسی مشخصه‌های دنباله تشکیل شده در

پشت سیلندر به کمک جریان سنج سیم داغ و یک سیستم جابجاکننده سنسور، سرعت لحظه‌ای جریان در موقعیتهای مختلف مکانی در راستای عمود بر جریان و چندین موقعیت طولی اندازه‌گیری شده است. با انجام همزمان تحلیلهای آماری روی داده‌های لحظه‌ای ثبت شده، مقدار متوسط سرعت و مؤلفه نوسانی آن برای هر نقطه بدست آورده شده است. نتایج فوق به همراه اطلاعات مربوط به مختصات موقعیت سنسور در فایل‌های مشخصی ثبت گردیده و توسط آن ضریب پسا بدست آمد. نتایج بدست آمده از این آزمایشها نشان می‌دهد که تغییر در عدد رینولدز، نسبت انسداد، شدت اغتشاشات جریان و دوران سیلندر باعث تغییر در مشخصه‌های دنباله سیلندر می‌شود. این تغییرات شامل تغییر در پروفیل‌های سرعت متوسط، شدت اغتشاشات و مقادیر پارامترهای *velocity defect* و ضریب پسا می‌باشد.

کلمات کلیدی: آیرودینامیک ، دنباله سیلندر ، جریان سنج سیم داغ ، ضریب درگ

لیست مقالات استخراج شده از پایان نامه



(۱) "بررسی تجربی دنباله‌های ناشی از سیلندر دوار با استفاده از دستگاه سیم داغ"، هفتمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) انجمن هوافضای ایران، اسفند ۱۳۸۶، دانشگاه صنعتی شریف.

(۲) "بررسی تجربی اغتشاشات دنباله سیلندر دوار"، یازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، خرداد ۱۳۸۷، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

(۳) "بررسی تجربی اثرات انسداد بر روی دنباله سیلندر دایره‌ای"، هشتمین کنفرانس سالانه سالانه (بین‌المللی) انجمن هوافضای ایران، اسفند ۱۳۸۷، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

(۴) "بررسی تجربی اثرات آشفستگی جریان ورودی بر روی پارامترهای دنباله سیلندر دایره‌ای" هفدهمین کنفرانس سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک، اردیبهشت ۱۳۸۸، دانشگاه تهران.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۵	فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته
۲۰	فصل سوم: تجهیزات آزمایشگاهی
۲۱	۳-۱. تونل باد
۲۴	۳-۲. مکانیزم جابجاکننده پراب
۲۶	۳-۳. مدل آزمایش
۲۷	۳-۴. شبکه‌های توربولانس‌ساز
۲۹	۳-۵. نسبت انسداد
۳۱	۳-۶. مکانیزم دوران سیلندر
۳۱	۳-۶-۱. نیرو محرکه
۳۲	۳-۶-۲. تأمین دورهای مختلف
۳۳	۳-۶-۳. انتقال نیرو
۳۳	۳-۶-۴. دوران سیلندر
۳۵	فصل چهارم: جریان سنج سیم داغ
۳۶	۴-۱. مقدمه
۳۶	۴-۱-۱. روشهای عددی
۳۷	۴-۱-۲. روشهای آزمایشگاهی
۳۸	۴-۲. جریان سنج سیم داغ
۳۹	۴-۲-۱. قابلیت‌های جریان سنج سیم داغ
۴۱	۴-۲-۲. معایب جریان سنج سیم داغ
۴۲	۴-۲-۳. اصول عملکرد دستگاه
۴۳	۴-۲-۴. مدار الکترونیکی دستگاه جریان سنج سیم داغ
۴۴	۴-۲-۵. مدار الکتریکی دما ثابت
۴۶	۴-۲-۶. پراب سیم داغ
۴۷	۴-۲-۶-۱. پراب‌های سیمی

۵۱	.....	۴-۲-۷. تطبیق دهنده سیگنال
۵۲	.....	۴-۲-۸. جمع آوری و دریافت داده‌ها
۵۳	.....	۴-۲-۹. ارتباط از طریق کارت DAQ
۵۴	.....	۴-۲-۱۰. کالیبراسیون استاتیکی
۵۵	.....	۴-۲-۱۱. پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ
۵۷	.....	۴-۳. تجزیه و تحلیل سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده
۵۷	.....	۴-۴. کالیبراسیون و آماده‌سازی سیستم داده‌برداری
۵۸	.....	۴-۴-۱. کالیبره نمودن تونل باد
۵۹	.....	۴-۴-۲. کالیبراسیون پراب سیم داغ
۶۱	.....	فصل پنجم: تئوری مسئله و معادلات حاکم
۶۲	.....	۵-۱. مقدمه
۶۲	.....	۵-۲. رژیم‌های دنباله
۶۸	.....	۵-۳. معادلات حاکم بر جریان مغشوش
۷۱	.....	۵-۴. ضریب پسا
۷۵	.....	۵-۵. روش تحلیلی محاسبه پسا
۷۷	.....	۵-۶. روش آزمایشگاهی محاسبه ضریب پسا
۸۳	.....	۵-۷. روابط تجربی موجود برای بدست آوردن ضریب پسا
۸۳	.....	۵-۸. علل تغییرات ضریب پسا
۸۶	.....	فصل ششم: ارائه و تحلیل داده‌ها
۸۷	.....	۶-۱. بررسی دنباله سیلندر ثابت
۱۰۱	.....	۶-۲. بررسی اثرات اغتشاشهای جریان ورودی بر روی دنباله سیلندر ثابت
۱۱۵	.....	۶-۳. بررسی اثر نسبت انسداد بر روی مشخصه‌های دنباله سیلندر
۱۲۲	.....	۶-۴. بررسی دنباله سیلندر چرخان
۱۲۴	.....	۶-۴-۱. $Re=5900$
۱۳۱	.....	۶-۴-۲. $Re=9400$
۱۳۹	.....	۶-۴-۳. $Re=11800$
۱۴۳	.....	۶-۴-۴. $Re=17650$
۱۴۸	.....	فصل ششم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات
۱۴۹	.....	۷-۱. نتیجه‌گیری
۱۵۱	.....	۷-۲. ارائه پیشنهادات
۱۵۳	.....	مراجع

فهرست اشکال و جداول

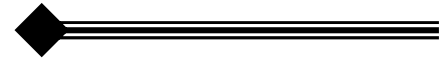
عنوان	صفحه
شکل (۲-۱): نمودار عدد استروهاال بر حسب عدد رینولدز در طول ۱۰۰ سال	۷
شکل (۲-۲): نمودار ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز؛ $\times$ رلف ؛ $\circ$: ویسلبرگر ؛ -- : تریتون	۱۱
شکل (۲-۳): نمودار ضریب پسا و برآ بر حسب پارامتر α در عدد رینولدز ۲۰۰	۱۵
شکل (۲-۴): نمودار عدد استروهاال بر حسب نسبت سرعتی (λ) برای عدد رینولدز ۹۰۰۰	۱۶
شکل (۲-۵): نمودار ضریب پسا بر حسب عدد KC برای انسدادهای مختلف	۱۸
شکل (۳-۱): نمایی از تونل باد استفاده شده در این تحقیق	۲۳
شکل (۳-۲): شکل شماتیک تونل باد استفاده شده در این تحقیق	۲۳
شکل (۳-۳): مکانیزم جابجاکننده پراب	۲۵
شکل (۳-۴): مدل استفاده شده از جنس پلکسی گلاس با قطر ۲۰ میلیمتر	۲۶
شکل (۳-۵): شبکه توربولانس ساز ۳/۵ درصد	۲۸
شکل (۳-۶): شبکه توربولانس ساز ۵ درصد	۲۸
شکل (۳-۷): موقعیت صفحات پلکسی گلاس در داخل محفظه آزمایش	۳۰
شکل (۳-۸): نمایی از موتور استفاده شده در این تحقیق	۳۱
شکل (۳-۹): پولیه‌ای استفاده شده برای تنظیم دور سیلندر	۳۲
شکل (۳-۱۰): تسمه‌های دنده‌ای استفاده شده در انتقال نیرو از موتور به سیلندر	۳۳
شکل (۳-۱۱): طریقه چرخش سیلندر در محفظه آزمایش	۳۴
شکل (۴-۱): جریان سنج سیم داغ	۳۹
شکل (۴-۲): محل قرارگیری سنسور در پل و تستون	۴۲
شکل (۴-۳): مدار دما ثابت شامل پل و تستون، تقویت‌کننده و زیر مدار آزمایش الکترونیکی	۴۵
شکل (۴-۴): قسمت‌های مختلف پراب یک بعدی سیم داغ	۴۶
شکل (۴-۵): پراب‌های چند سنسوره برای اندازه‌گیری جریان‌های چند مؤلفه‌ای	۴۸
شکل (۴-۶): پراب‌هایی با سنسور سیمی (روکش دار و بدون روکش)	۵۰
شکل (۴-۷): پراب یک بعدی استفاده شده در این تحقیق	۵۰
شکل (۴-۸): مدار شماتیک تطبیق‌دهنده سیگنال	۵۱
شکل (۴-۹): منحنی کالیبراسیون و ولتاژ قسمت‌های مختلف واحد تطبیق‌دهنده سیگنال	۵۲
شکل (۴-۱۰): نمونه‌هایی از کارت DAQ	۵۳

- شکل (۴-۱۱): نمودار تغییرات سرعت متوسط برای سرعت‌های ورودی ۱۰ و ۲۰ متر بر ثانیه ۵۸
- شکل (۴-۱۲): نمودار تغییرات درصد شدت اغتشاشات در تونل باد در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه ۵۹
- شکل (۴-۱۳): منحنی کالیبراسیون سرعت برای یک پراب سیم داغ ۶۰
- شکل (۴-۱۳): منحنی کالیبراسیون سرعت برای یک پراب سیم داغ ۶۰
- شکل (۴-۱۵): نمودار خطا در سرعت‌های مختلف ۶۰
- شکل (۵-۱): جریان خزشی در $Re < 1$ ۶۴
- شکل (۵-۲): تشکیل دنباله های متقارن در $Re < 49$ ۶۴
- شکل (۵-۳): تشکیل ورتکس شیدینگها ۶۶
- شکل (۵-۴): رژیم دنباله در حالت فوق بحرانی ۶۷
- شکل (۵-۵): رژیم دنباله در حالت فرا بحرانی ۶۸
- شکل (۵-۶): بردارهای سرعت در عبور از استوانه ثابت ۷۴
- شکل (۵-۷): نیروهای مقاوم و بالا برنده ۷۵
- شکل (۵-۸): نیروهای برشی و فشاری از نوع مقاوم و بالا برنده ۷۶
- شکل (۵-۴): حجم کنترل فرضی برای محاسبه نیروهای وارده به جسم ۷۷
- شکل (۶-۱): نمای شماتیکی از چگونگی داده‌برداری و ثبت داده‌ها ۸۸
- شکل (۶-۲): پروفیل سرعت متوسط برای موقعیتهای مختلف در $Re=11700$ ۹۰
- شکل (۶-۳): پروفیل شدت اغتشاشات برای موقعیتهای مختلف در $Re=11700$ ۹۰
- شکل (۶-۴): نمودار *velocity defect* برای موقعیتهای مختلف در $Re=11700$ ۹۳
- شکل (۶-۵): مقادیر ضریب پسا در موقعیتهای مختلف ۹۳
- شکل (۶-۶): پروفیل سرعت متوسط بر حسب عدد رینولدز در موقعیت $x/d=1/5$ ۹۶
- شکل (۶-۷): پروفیل سرعت متوسط بر حسب عدد رینولدز در موقعیت $x/d=3$ ۹۶
- شکل (۶-۸): پروفیل سرعت متوسط بر حسب عدد رینولدز در موقعیت $x/d=6$ ۹۷
- شکل (۶-۹): نمودار شدت اغتشاشات بر حسب عدد رینولدز در $x/d=1/5$ ۹۷
- شکل (۶-۱۰): نمودار شدت اغتشاشات بر حسب عدد رینولدز در $x/d=3$ ۹۸
- شکل (۶-۱۱): نمودار شدت اغتشاشات بر حسب عدد رینولدز در $x/d=6$ ۹۸
- شکل (۶-۱۲): نمودار *velocity defect* برای اعداد رینولدز مختلف ۹۹
- شکل (۶-۱۳): مقادیر ضریب پسا برای اعداد رینولدز مختلف ۱۰۰
- شکل (۶-۱۴): نمودار عدد استروهمال بر حسب عدد رینولدز ۱۰۱
- شکل (۶-۱۵): نمودار شدت اغتشاشات مختلف در محفظه آزمایش در حالت‌های مختلف ۱۰۲

- شکل (۶-۱۶): پروفیل سرعت متوسط برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=9400$ و $x/d=1/5$ ۱۰۳
- شکل (۶-۱۷): نمودار شدت اغتشاشات برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=9400$ و $x/d=1/5$ ۱۰۴
- شکل (۶-۱۸): پروفیل سرعت متوسط برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=9400$ و $x/d=3$ ۱۰۵
- شکل (۶-۱۹): نمودار شدت اغتشاشات برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=9400$ و $x/d=3$ ۱۰۵
- شکل (۶-۲۰): پروفیل سرعت متوسط برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=9400$ و $x/d=6$ ۱۰۷
- شکل (۶-۲۱): نمودار شدت اغتشاشات برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=9400$ و $x/d=6$ ۱۰۷
- شکل (۶-۲۲): نمودار *velocity defect* برای شدت اغتشاشات ورودی مختلف ۱۰۸
- شکل (۶-۲۳): نمودار ضریب پسا برای شدت اغتشاشات مختلف در $Re=9400$ ۱۰۹
- شکل (۶-۲۴): پروفیل سرعت برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=14100$ و $x/d=1/5$ ۱۱۰
- شکل (۶-۲۵): نمودار شدت اغتشاشات برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=14100$ و $x/d=1/5$ ۱۱۰
- شکل (۶-۲۶): پروفیل سرعت متوسط برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=14100$ و $x/d=3$ ۱۱۱
- شکل (۶-۲۷): نمودار شدت اغتشاشات برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=14100$ و $x/d=3$ ۱۱۱
- شکل (۶-۲۸): پروفیل سرعت متوسط برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=14100$ و $x/d=6$ ۱۱۲
- شکل (۶-۲۹): نمودار شدت اغتشاشات برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=14100$ و $x/d=6$ ۱۱۳
- شکل (۶-۳۰): نمودار *velocity defect* برای شدت اغتشاشات ورودی مختلف ۱۱۴
- شکل (۶-۳۱): نمودار ضریب پسا برای شدت اغتشاشات مختلف در $Re=14100$ ۱۱۵
- شکل (۶-۳۲): نمودار سرعت متوسط برای انسدادهای مختلف در $x/d=1/5$ ۱۱۷
- شکل (۶-۳۳): نمودار شدت اغتشاشات برای انسدادهای مختلف در $x/d=1/5$ ۱۱۷
- شکل (۶-۳۴): نمودار سرعت متوسط برای انسدادهای مختلف در $x/d=3$ ۱۱۸
- شکل (۶-۳۵): نمودار شدت اغتشاشات برای انسدادهای مختلف در $x/d=3$ ۱۱۹
- شکل (۶-۳۶): نمودار سرعت متوسط برای انسدادهای مختلف در $x/d=6$ ۱۲۰
- شکل (۶-۳۷): نمودار شدت اغتشاشات برای انسدادهای مختلف در $x/d=6$ ۱۲۰
- شکل (۶-۳۸): جهت چرخش سیلندر در اتاقک آزمایش ۱۲۲
- شکل (۶-۳۹): پروفیل سرعت متوسط در $Re=11700$ و $\lambda=2/618$ برای موقعیتهای مختلف ۱۲۳
- شکل (۶-۴۰): پروفیل سرعت متوسط در سرعتهای متفاوت برای $Re=5900$ و $x/d=1/5$ ۱۲۴
- شکل (۶-۴۱): نمودار شدت اغتشاشات در سرعتهای متفاوت برای $Re=5900$ و $x/d=1/5$ ۱۲۵
- شکل (۶-۴۲): پروفیل سرعت متوسط در سرعتهای متفاوت برای $Re=5900$ و $x/d=3$ ۱۲۶
- شکل (۶-۴۳): نمودار شدت اغتشاشات در سرعتهای متفاوت برای $Re=5900$ و $x/d=3$ ۱۲۷
- شکل (۶-۴۴): پروفیل سرعت متوسط در سرعتهای متفاوت برای $Re=5900$ و $x/d=6$ ۱۲۸

- شکل (۶-۴۵): نمودار شدت اغتشاشات در سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۵۹۰۰$ و $x/d = ۶$ ۱۲۸
- شکل (۶-۴۶): نمودار $velocity defect$ در نسبت‌های سرعت مختلف برای $Re = ۵۹۰۰$ ۱۳۰
- شکل (۶-۴۷): نمودار ضریب پسا بر حسب λ در $Re = ۵۹۰۰$ ۱۳۱
- شکل (۶-۴۸): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۹۴۰۰$ و $x/d = ۱/۵$ ۱۳۳
- شکل (۶-۴۹): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۹۴۰۰$ و $x/d = ۱/۵$ ۱۳۳
- شکل (۶-۵۰): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۹۴۰۰$ و $x/d = ۳$ ۱۳۴
- شکل (۶-۵۱): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۹۴۰۰$ و $x/d = ۳$ ۱۳۵
- شکل (۶-۵۲): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۹۴۰۰$ و $x/d = ۶$ ۱۳۶
- شکل (۶-۵۳): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۹۴۰۰$ و $x/d = ۶$ ۱۳۷
- شکل (۶-۵۴): نمودار $velocity defect$ در نسبت‌های سرعت مختلف برای $Re = ۹۴۰۰$ ۱۳۸
- شکل (۶-۵۵): نمودار ضریب پسا بر حسب λ در $Re = ۹۴۰۰$ ۱۳۸
- شکل (۶-۵۶): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۱۱۸۰۰$ و $x/d = ۱/۵$ ۱۳۹
- شکل (۶-۵۷): نمودار اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۱۱۸۰۰$ و $x/d = ۱/۵$ ۱۴۰
- شکل (۶-۵۸): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۱۱۸۰۰$ و $x/d = ۳$ ۱۴۰
- شکل (۶-۵۹): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۱۱۸۰۰$ و $x/d = ۳$ ۱۴۱
- شکل (۶-۶۰): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۱۱۸۰۰$ و $x/d = ۶$ ۱۴۱
- شکل (۶-۶۱): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۱۱۸۰۰$ و $x/d = ۶$ ۱۴۲
- شکل (۶-۶۲): نمودار $velocity defect$ در نسبت‌های سرعت مختلف برای $Re = ۱۱۸۰۰$ ۱۴۲
- شکل (۶-۶۳): نمودار ضریب پسا در نسبت‌های سرعت مختلف برای $Re = ۱۱۸۰۰$ ۱۴۳
- شکل (۶-۶۴): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۱۷۶۵۰$ و $x/d = ۱/۵$ ۱۴۴
- شکل (۶-۶۵): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۱۷۶۵۰$ و $x/d = ۱/۵$ ۱۴۴
- شکل (۶-۶۶): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۱۷۶۵۰$ و $x/d = ۳$ ۱۴۵
- شکل (۶-۶۷): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۱۷۶۵۰$ و $x/d = ۳$ ۱۴۵
- شکل (۶-۶۸): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۱۷۶۵۰$ و $x/d = ۶$ ۱۴۶
- شکل (۶-۶۹): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = ۱۷۶۵۰$ و $x/d = ۶$ ۱۴۶
- شکل (۶-۷۰): نمودار $velocity defect$ در نسبت‌های سرعت مختلف برای $Re = ۱۷۶۵۰$ ۱۴۷
- شکل (۶-۷۱): نمودار ضریب پسا در نسبت‌های سرعت مختلف برای $Re = ۱۷۶۵۰$ ۱۴۷
- جدول (۲-۱): مقادیر عدد استروهل بر حسب نسبت سرعتی (α) برای عدد رینولدز ۶۰ ۱۴
- جدول (۳-۱): مشخصات فیزیکی شبکه‌های توربولانس ساز ۲۷

فهرست علائم اختصاری



C_d	ضریب پسا
D	قطر سیلندر دایره‌ای
f	فرکانس گردابه‌های خارج شونده از پشت سیلندر
F_D	نیروی پسا
F_{D_p}	نیروی پسای فشاری
F_{D_f}	نیروی پسای اصطکاکی
F_L	نیروی برآ
H	ارتفاع محفظه آزمایش تونل باد
h	ضریب جابجایی هوا
KC	عدد کئولگان-کارپنتر $\left(KC = \frac{U_m T}{D}\right)$
L	طول سیلندر دایره‌ای
Nu	عدد ناسلت
pr	عدد پراتل
R_w	مقاومت الکتریکی سیم داغ
Re	عدد رینولدز $\left(\frac{U_\infty D}{\nu}\right)$
St	عدد استروهل $\left(\frac{fD}{U}\right)$
T	زمان

Tu	درصد شدت اغتشاشات جریان سیال $\left(\frac{U_{rms}}{U_{\infty}}\right)\%$
U_{∞}	سرعت جریان آزاد در جهت محور X
U	سرعت جریان در هر نقطه در جهت محور X
U_{rms}	شدت اغتشاشات جریان سیال $\sqrt{u'^2}$
u'	سرعت لحظه‌ای جریان در جهت محور X
$\bar{u}$	سرعت لحظه‌ای در جهت محور X
V	سرعت خطی دوران سیلندر $\left(\frac{\pi dw}{60}\right)$
Vd	<i>velocity defect</i> (تفاضل سرعت جریان آزاد و کمترین سرعت در داخل دنباله)
x	فاصله طولی از مرکز سیلندر
y	ارتفاع از مرکز سیلندر
α	نسبت دید $\left(\frac{L}{D}\right)$
β	نسبت انسداد $\left(\frac{H}{D}\right)$
μ	لزجت دینامیکی
ρ	چگالی سیال
ν	لزجت سینماتیکی $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)$
λ	نسبت سرعت خطی $\left(\frac{V}{U_{\infty}}\right)$
ω	سرعت دورانی سیلندر بر حسب دور بر دقیقه

فصل اول

مقدمه

بررسی آیرودینامیک سیلندر از صد سال قبل مورد مطالعه قرار گرفته است. جریان لزج غیرقابل تراکم اطراف یک سیلندر دایره‌ای از مسائل کلاسیک مکانیک سیالات بشمار می‌رود و علیرغم هندسه ساده سیلندر، در حقیقت، جریان حول آن بسیار پیچیده است. بخصوص در اعداد رینولدز بالا که حل عددی معادلات حرکت به آسانی بدست نمی‌آیند. از این رو هنوز هم فهم تجربی و توصیفی جریان حول سیلندر مورد نیاز است. بخاطر ارتباط این موضوع با مسائل مهندسی و اهمیت فهم اساسی جریان سیال، تحقیقات آزمایشگاهی و عددی جریان عبوری از سیلندر دایره‌ای، یک حوزه فعال و پویا برای محققان بشمار می‌رود. با توجه به قدمت ۱۰۰ ساله بررسی جریان حول سیلندر، هنوز هم تعیین درست نیروی پسا یکی از مسائل اساسی در جریان حول سیلندر می‌باشد. بنابراین برای مسائل آیرودینامیک سیلندر نیاز به انجام آزمایشها و شبیه‌سازی عددی می‌باشد.

پس از اولین حل دقیق جریان حول استوانه ثابت توسط بلاسیوس [۱] در سال ۱۹۰۸، این موضوع مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. عوامل متعددی مانند عدد رینولدز [۲]، میزان اغتشاشات جریان ورودی [۳]، نسبت انسداد [۴]، نسبت دید [۵]، زبری سطح [۶] و مشخصات صفحات انتهایی نگهدارنده سیلندر [۷] بر مشخصه‌های جریان حول استوانه ثابت تأثیرگذار می‌باشد. در این تحقیق ابتدا اثرات عدد رینولدز بر مشخصه‌های دنباله سیلندر بررسی شده سپس به اثرات شدت اغتشاشات ورودی به سیلندر و

اثرات نسبت انسداد بر روی دنباله سیلندر ثابت پرداخته شده و در انتها نیز دنباله سیلندر چرخان با سرعت دورانی مختلف با دنباله سیلندر ثابت مقایسه شده است.

برای بررسی اثرات فوق بصورت آزمایشگاهی، از تونل باد مادون صوتی با توانایی ایجاد جریان هوایی با سرعت حداکثر ۳۰ متر بر ثانیه استفاده شده است. سطح مقطع محفظه آزمایش این دستگاه ۴۰ سانتیمتر مربع بوده و حداکثر شدت اغتشاشات در این محفظه ۰/۱ درصد اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان، از جریان‌سنج سیم داغ استفاده شده است که توانایی اندازه‌گیری سرعت متوسط، شدت اغتشاشات و فرکانس گردابه‌های خارج شونده از پشت سیلندر را دارد. دستگاه تونل باد و دستگاه جریان‌سنج سیم داغ هر دو ساخت شرکت فراسنجش صبا می‌باشند.

داده‌برداری برای این آزمایشها، در سه مقطع طولی در پشت سیلندر انجام شده است که با استفاده از این داده‌ها نمودار پروفیل سرعت متوسط، شدت اغتشاشات و ضریب پسا بدست می‌آید.

نتایج بدست آمده از آزمایشهای صورت گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز و نسبت انسداد ضریب پسا افزایش و با شدت اغتشاشات ورودی به سیلندر، ضریب پسا کاهش می‌یابد. از نتایج این آزمایشها می‌توان در صنایع هوا و فضا، اتومبیل‌سازی، ساخت آسمان‌خراشها، ستون پلها، دودکشها و دکلهای مخابراتی و ... استفاده کرد.

پس از آنکه پرانتل [۸] در تحقیق خود در سال ۱۹۰۴ به بررسی اثرات چرخش سیلندر بر روی جدائی لایه مرزی پرداخت، افراد بسیاری این موضوع را به صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند. چرخش سیلندر به علت حرکت سطوح بالائی و پائینی آن باعث ایجاد تغییرات زیادی در مشخصه‌های دنباله آن می‌شود. این تغییرات، پروفیل سرعت متوسط، پروفیل شدت اغتشاشات، عدد استروهال، ضریب پسا، زاویه جدائی و ... را در برمی‌گیرد.

برای بررسی اثرات چرخش بر روی دنباله سیلندر، با استفاده از یک الکتروموتور سیلندر را با سرعت‌های ۰ تا ۳۰۰۰ دور بر دقیقه دوران داده‌ایم. داده‌بردارها برای سه موقعیت طولی در پشت سیلندر و برای سرعت دوران مختلف و عدد رینولدز متفاوت انجام شده است. نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که چرخش سیلندر باعث تغییرات اساسی در نمودارهای سرعت متوسط و شدت اغتشاشات سیلندر و در نهایت کاهش ضریب پسا می‌شود.

ویژگیهای تحقیق انجام گرفته شامل موارد زیر می‌شود:

- استفاده از دستگاه تونل باد دقیق با حداکثر شدت اغتشاشات ۰/۱ درصد که از دقیقترین دستگاههای موجود می‌باشد.

- استفاده از مدلی از جنس پلکسی گلاس با زبری سطح بسیار پائین.

- بررسی اثرات نسبت انسداد و شدت اغتشاشات ورودی به سیلندر و همچنین بررسی دنباله سیلندر دوار

برای اولین بار در کشور.

- بررسی منحصر بفرد اثرات نسبت انسداد با تغییر در ارتفاع محفظه آزمایش بجای افزایش قطر سیلندر.

- بررسی اثرات عدد رینولدز و نسبت سرعت‌های مختلف بر روی دنباله سیلندر دوار.

فصل دوم

مروری بر کارهای گذشته

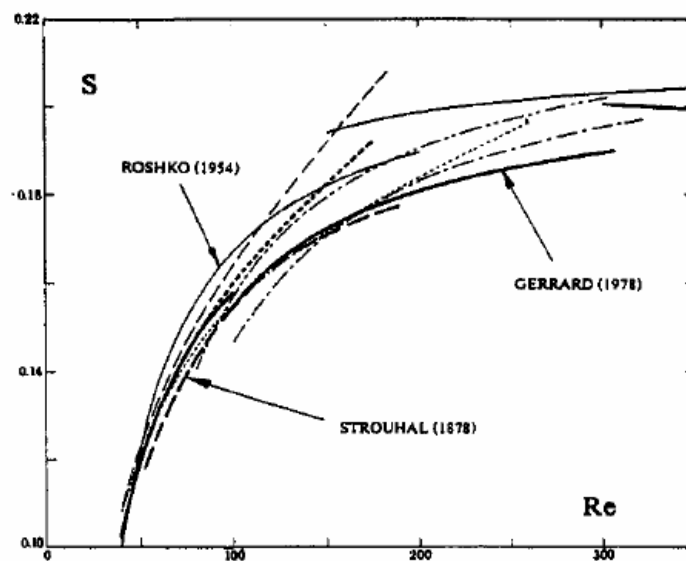
جریان دارای اصطکاک و تراکم پذیر حول استوانه دایره‌ای از مسایل کلاسیک مکانیک سیالات بشمار می‌رود و همیشه مورد توجه محققان بسیاری بوده است.

اولین حل دقیق از جریان حول استوانه دایره‌ای توسط بلاسیوس [۱] در سال ۱۹۰۸ ارائه گردید. وی سرعت جریان پتانسیل را به فرم سری توانی بر حسب X بیان نمود که در آن X فاصله از نقطه سکون می‌باشد که در امتداد خط تراز اندازه‌گیری می‌شود. روش بلاسیوس علیرغم محدودیتهایی مانند کارایی نداشتن برای اجسام خط جریانی، از اهمیت بنیادی زیادی برخوردار می‌باشد. بعد از بلاسیوس افرادی مانند هایمنز [۹]، هوارث [۱۰]، فراسلینگ [۱۱] و الریخ [۱۲] به تصحیح ضرایب موجود در سری توانی بلاسیوس پرداختند و روش فوق را کاملتر نمودند.

اولین حل تقریبی برای یک استوانه با سطح مقطع دایره توسط پل هاوسن [۱۳] در سال ۱۹۲۱ ارائه شد. وی تابع توزیع فشار تجربی بدست آمده توسط هایمنز را در مورد استوانه دایره‌ای بکار برده و با نتایج هایمنز مقایسه نمود. روش پل هاوسن در نواحی جریان پتانسیل با شتاب مثبت به نتایج بسیار رضایت‌بخشی منجر می‌گردد ولی در نواحی با جریان با پتانسیل کند شونده از قابلیت اطمینان خوبی برخوردار نیست.

اطلاعات اولیه ما درباره گردابه‌های متناوب خارج شده از سیلندر مربوط به آزمایشهای استروهل [۱۴] است. استروهل آزمایشهای مختلفی بر روی فرکانس صوتی که از قرار دادن ردیفهایی از سیلندر در میان

هوا تولید شد، انجام داد. در سال ۱۹۱۵ لرد رایلی [۱۵] با استفاده از داده‌هایی که از آزمایشهای استروهاال بدست آمد، عدد استروهاال را بنا نهاد و رابطه‌ای بین عدد استروهاال و عدد رینولدز بدست آورد. در شکل (۲-۱) مقادیر ابتدایی بدست آمده عدد استروهاال با مقادیر بدست آمده جدید مقایسه شده است. مقادیر جدید عدد استروهاال، با استفاده از جریان سنج سیم داغ و تحلیل کننده‌های طیفی بدست آمده است (مانند نتایج جرارد [۱۶] و روشکو [۱۷]). همانطور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، با گذشت ۱۰۰ سال، مقادیر مختلف بدست آمده اختلافهای کمی با هم دارند.



شکل (۲-۱): نمودار عدد استروهاال بر حسب عدد رینولدز در طول ۱۰۰ سال

بمنظور بدست آوردن عدد استروهاال، ضریب پسا، ضریب برآ، ضریب فشار، نقطه جدایی و تنش برشی سطحی، اندازه‌گیریهای زیادی بر روی پروفیل‌های سرعت متوسط، سرعت لحظه‌ای و تنشهای برشی انجام

شده است. نمونه‌ای از این اندازه‌گیریها را می‌توان در مقالات مروری مانند روزنهد (۱۹۵۳) [۱۸]، ویل

(۱۹۶۰) [۱۹]، مورکوین (۱۹۶۴) [۲۰]، برگر و ویل (۱۹۷۲) [۲۱]، اورتل (۱۹۹۰) [۲۲]، کوتانکیو و دفایه

(۱۹۹۱) [۲۳] را پیدا کرد.

هیجما و همکارانش [۲۴] گردابه‌های بزرگ خارج شونده از سطح اجسام حجیم مثل سیلندر دایره‌ای را

مورد بررسی قرار دادند. این گردابه‌های بزرگ باعث القای گردابه‌های نوسانی می‌شوند که فرکانس این

گردابه‌ها با فرکانس طبیعی الاستیکی جسم برابر است. جریانهای برشی اطراف سیلندر به فرکانس نوسانی

تحریک‌کننده مانند امواج صوتی که دارای فرکانس مخصوصی نسبت به لایه برشی هستند، حساسند. به

آسانی می‌توان با استفاده از یک فرکانس محرک نسبت به فرکانس مخصوص جریان اطراف جسم یک

اغتشاشات قویی در لایه‌های برشی ایجاد کرد. هدف از تحقیق هیجما و همکارانش بررسی اثرات القایی

سرعت نوسانی بر روی جریان اطراف سیلندر و نشان دادن رابطه‌ای میان پارامترهای جریان اطراف سیلندر

و پارامترهای ارتعاشی گردابه‌های القا شده است. آنها در تحقیقاتشان پی بردند که پارامتر سرعت کمینه

دنباله (*velocity defect*) هنگامیکه فرکانس تحریک ۴/۴۵ است، کاهش می‌یابد. همچنین آنها به این

نتیجه رسیدند که فرکانس گردابه‌های کوچک با فرکانس تحریک ۴/۴۵، ۱۰ درصد بیشتر از حالت بدون

تحریک است.

کوواسنی [۲۵] از تکنیک جریان سنج سیم داغ برای اندازه گیری الگوی مسیر گردابه ایی ایجاد شده پشت سیلندر برای اعداد رینولدز پائین پرداخت. کوواسنی در این آزمایشها از پراب سیم داغی با قطر ۱ میلیمتر استفاده کرد. در این تحقیق توزیع سرعت متوسط برای اعداد رینولدز بالاتر و پائینتر از عدد رینولدز بحرانی گردابه اندازه گیری شد. او دریافت که مقدار رینولدز بحرانی برای گردابه ها ۴۰ می باشد، همچنین وی مشاهده کرد که در بازه ای از اعداد رینولدز گردابه ها مستقیماً از سطح سیلندر تشکیل نمی شوند و در فاصله ای کمی دورتر از سیلندر به صورت ناپایدار تشکیل می شوند.

تاناکا [۲۶] به بررسی آزمایشگاهی جریان اطراف سیلندر چرخانی که بصورت عمود بر جریان سیال واقع شده بود، پرداخت. در آزمایشات او عدد رینولدز در محدوده ۳۷۱۰۰۰ - ۴۸۰۰۰ انتخاب شده است که در ناحیه گذرا قرار دارد. سطح مقطع اتاقک آزمایش در تونل باد استفاده شده 380×180 میلیمتر مربع بوده و قطر سیلندر مورد آزمایش ۷۰ میلیمتر انتخاب شده بود. نتایج آزمایشهای وی نشان می دهد که چرخش سیلندر باعث تغییرات مشخصی در دنباله سیلندر و کاهش در نیروی برآ می شود.

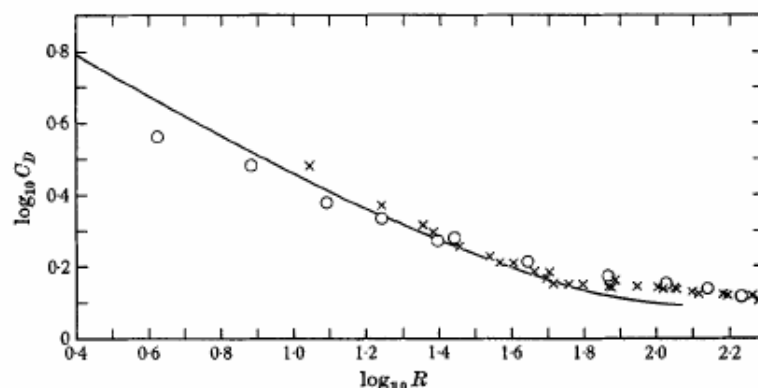
اولسن و همکارانش [۲۷] در سال ۲۰۰۰ بر روی یک سیلندر دایره ای به منظور مطالعه بر روی گردابه های کوچکی که از پشت سیلندر خارج می شوند، آزمایشهایی انجام دادند. سیلندر دایره ای استفاده شده در آزمایشهای آنان دارای یک شکاف محوری مقعری شکل در قسمت پشت سیلندر بود. توجه اصلی آنها در این آزمایشها بر روی رابطه بین عدد استروهل و عدد رینولدز و ضریب پسا بود. آنان در آزمایشهای خود،

سرعت متوسط را توسط لوله پیتوت و فرکانس گردابه‌ها را توسط جریان‌سنج سیم داغ اندازه‌گیری کردند. داده‌برداری آنان برای موقعیتهای $x/d = 30, 40, 10, 20$ انجام شد. در آزمایشهای آنان مشاهده شد که در یک عدد رینولدز مشخص عدد استروهل برای سیلندر بدون شکاف همیشه بزرگتر از سیلندر شکاف‌دار است. در این آزمایشها، در رینولدز ۲۲۰۰ و برای سیلندری دایره‌ای با یک شکاف مقعری شکل مقدار ضریب پسا حدود $1/41$ بدست آمد، در حالیکه مقدار ضریب پسا برای سیلندر بدون شکاف در این عدد رینولدز $0/94$ است.

میسون، دیاز و رویز [۲۸] به بررسی عددی و آزمایشگاهی دنباله سیلندر ثابت و دوار برای $Re=2000$ پرداختند. آزمایشهای آنها در تونل آبی با سطح مقطع 56×35 سانتیمتر مربع و طول ۲۵۰ سانتیمتر صورت گرفت و سیلندر انتخاب شده در آزمایشهای آنان دارای قطر ۳۰ میلیمتر بوده، که با توجه به قطر سیلندر و مشخصات اتاقک آزمایش، نسبت انسداد در آزمایشهای آنها $0/53$ می‌باشد. در این آزمایشها مقدار پارامتر λ برای سیلندر $1/5$ ، 2 و 3 انتخاب شده است. آنان آزمایشهای خود را بیشتر به بدست آوردن فرکانسهای خارج شونده از سیلندر ثابت و دوار معطوف کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزایش دور سیلندر عدد استروهل افزایش می‌یابد. آنها عدد استروهل را برای نسبتهای سرعتی $0, 1/5$ ، 2 و 3 بترتیب $0/22$ ، $0/27$ ، $0/38$ و $0/52$ بدست آوردند.

میتال [۲۹] در سال ۲۰۰۱ به بررسی عددی جریان سه بعدی حول سیلندر دایره‌ای در نسبت دید پائین پرداخت. میتال در این تحقیق از روش شبیه‌سازی المان محدود برای بررسی جریان ناپایدار عبوری از سیلندر، استفاده کرد. نتایج عددی برای اعداد رینولدز ۱۰۰، ۳۰۰ و ۱۰۰۰ با نسبت دید ۱۶ محاسبه شد. هدف از تحقیق میتال بدست آوردن الگوهای گردابه‌ها و وابستگی این الگوها به زمان در اعداد رینولدز مختلف بود. علاوه بر نتایج عددی، میتال در این تحقیق بصورت تجربی در رینولدز ۱۰۰۰۰۰ و نسبت شکل ۸ نیز نتایجی را ارائه داد.

تریتون [۳۰] در تحقیق خود، به ارائه نتایج آزمایشگاهی برای جریان دوبعدی حول سیلندر دایره‌ای در اعداد رینولدز پائین پرداخته و سپس نتایج بدست آمده را با نتایج تجربی دیگران و همچنین با نتایج تئوری موجود مقایسه می‌کند. اعداد رینولدز در آزمایشهای وی بین ۰/۵ تا ۱۰۰ انتخاب شده‌اند. در شکل (۲-۲) نمودار بدست آمده عدد رینولدز را بر حسب ضریب پسا نشان می‌دهد که با نتایج رلف [۳۱] و ویسلبرگر [۲] مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌کنیم در این بازه از عدد رینولدز با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب پسای ناشی از اصطکاک کاهش یافته ولی در عوض به علت جدایش سیال در پشت مدل، ضریب پسای فشاری افزایش می‌یابد. در این حالت کاهش ضریب پسا شدت بیشتری داشته و ضریب پسای کل نیز روند نزولی دارد که با افزایش عدد رینولدز از شیب نمودار کاسته می‌شود.



شکل (۲-۲): نمودار ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز؛ ×: رلف؛ ○: ویلسبرگر؛ ---: تریتون

ویلیامسن [۳۲] در سال ۱۹۸۹، به بررسی آزمایشگاهی دنباله سیلندر دایره‌ای برای اعداد رینولدز پائین پرداخت. وی برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان از سرعت‌سنج سیم داغ استفاده کرد محفظه آزمایش تونل باد استفاده شده در آزمایشهای وی دارای شدت اغتشاشات ۰/۱ درصد بود. ویلیامسن در آزمایشهای خود از سه سیلندر با قطرهای ۱/۰۴، ۰/۶۱ و ۰/۵۱ میلیمتر استفاده کرد. او ابتدا نمودار عدد استروهمال را برای هر سه سیلندر برای عدد رینولدز ۵۵ تا ۲۰۰ نمایش داد. سپس نمودار زوایای گردابه‌های کوچک خارج شده از سیلندر را بر حسب عدد رینولدز بدست آورد. ویلیامسن همچنین درباره الگوی گردابه‌های خارج شده از سیلندر نیز، آزمایشهایی انجام داده است. نتایج ویلیامسن نشان می‌دهد عدد استروهمال با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. وی عدد استروهمال را برای عدد رینولدز ۵۵ و ۲۰۰ به ترتیب ۰/۱۲۳ و ۰/۱۸۲ بدست آورد. نمودار زاویه جدائی بر حسب عدد رینولدز در تحقیق وی نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز از عدد ۶۵ تا ۱۰۰ زاویه جدائی کاهش می‌یابد و پس از آن ثابت می‌ماند. همچنین

برای اعداد رینولدز بین ۵۵ و ۶۵ زاویه جدائی افزایش می‌یابد که البته این افزایش زاویه جدائی منظم نیست.

البورن، ستو و نواک [۳۳] به بررسی رابطهٔ میان عدد استروهل، ضریب پسا، عدد رینولدز و پارامترهای هندسی دنباله برای سیلندر دایره‌ای، مربعی، مثلثی و نیم‌دایره پرداخته و نتایج بدست آمده از آزمایشهای دیگران را با نتایج بدست آمده از روابط تئوری مقایسه کرد. آنان برای عدد رینولدز بالا (بالا تر از رینولدز بحرانی) روابط زیر را معرفی کردند:

$$\beta \approx 1.2 \frac{C_D}{\sqrt{C_D + 1}} \quad St \approx 0.077 \frac{C_D + 1}{C_D}$$

که در این روابط C_D ضریب پسا، St عدد استروهل و β قطر سیلندر تقسیم بر قطر گردابه‌های تشکیل شده در پشت سیلندر می‌باشد.

بارنز [۳۴] در سال ۲۰۰۰ به بررسی تجربی دنباله سیلندر دوار در اعداد رینولدز پائین پرداخت. وی عدد استروهل را برای عدد رینولدز ۶۰ و نسبت سرعت $(\lambda) 1/2 - 0$ بدست آورده و با مقادیر بدست آمده از نتایج عددی کانگ و همکارانش [۳۵] و هو و همکارانش [۳۶] مقایسه کرد. نتایج آزمایشهای وی در جدول (۲-۱) نشان داده شده است. وی از نتایج بدست آمده آزمایشهای خود، مشاهده کرد که مقدار عدد استروهل با تغییر نسبت سرعت تغییر بسیار اندکی می‌کند. بارنز آزمایشها را توسط تونل آبی به طول ۲/۵

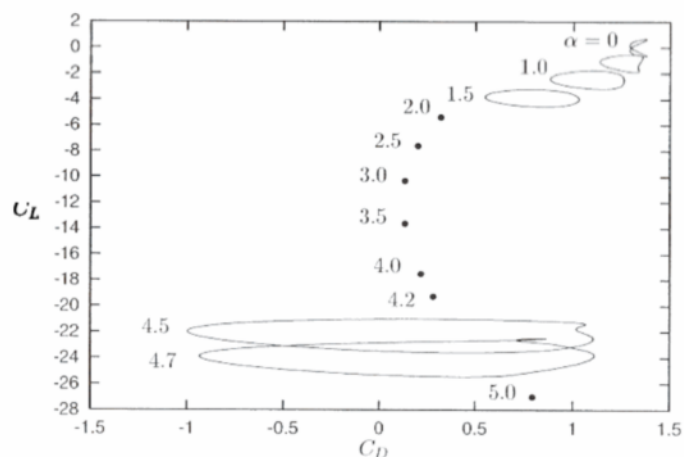
و عرض ۳/۱۵ و ارتفاع ۳ متر انجام داد. قطر سیلندر در آزمایشهای او ۵/۹۸۴ میلیمتر و طول آن ۲۷۶ میلیمتر انتخاب شده است.

هو و همکارانش [۳۶] از روش گالرکین برای بررسی رفتار جریان در اعداد رینولدز پائین استفاده کردند. مقدار عدد رینولدز در آزمایشهای آنان ۵۰ - ۴۵ و نسبت سرعت ۱-۰ در نظر گرفته شده بود. آنها مشاهده کردند که اگر مقدار نسبت سرعت از ۰ به ۱ افزایش یابد مقدار عدد استروهاال از ۰/۱۵۲ به ۰/۱۲۷ کاهش می‌یابد. کانگ و همکارانش [۳۵] در ادامه تحقیقات هو و همکارانش به حل عددی معادلات ناویر-استوکس برای اعداد رینولدز ۴۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۶۰ و نسبت سرعت ۲/۵-۰ پرداختند. نتایج آنها برای عدد رینولدز ۶۰ با نتایج هو و همکارانش توافق خوبی نشان می‌دهد. نتایج تحقیق کانگ و همکارانش و هو و همکارانش در جدول (۱-۲) آمده است.

جدول (۱-۲): مقادیر عدد استروهاال بر حسب نسبت سرعتی (α) برای عدد رینولدز ۶۰

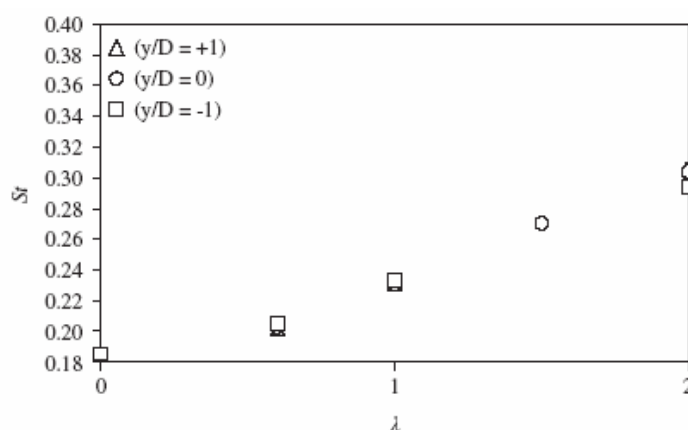
نسبت سرعتی	عدد رینولدز	عدد استروهاال	نتایج کانگ	نتایج هو
.	۶۰/۰۳	۰/۱۳۶۱	۰/۱۳۵۷	۰/۱۵۲۵
۰/۲	۶۰/۰	۰/۱۳۵۵	۰/۱۳۵۸	۰/۱۵۱۶
۰/۴	۵۹/۹۹	۰/۱۳۶۲	-----	۰/۱۴۸۷
۰/۵	۶۰/۰۱	۰/۱۳۵۸	۰/۱۳۶۴	-----
۰/۶	۶۰/۰۴	۰/۱۳۶۶	-----	۰/۱۴۳۲
۰/۸	۶۰/۰۴	۰/۱۳۶۶	-----	۰/۱۳۵۵
۱/۰	۶۰/۰۱	۰/۱۳۶۵	۰/۱۳۷۶	۰/۱۲۶۵
۱/۱	۶۰/۰۶	۰/۱۳۷۷	۰/۱۳۷۷	-----
۱/۲	۶۰/۰۲	۰/۱۳۷۰	۰/۱۳۷۵	-----

میتال [۳۷] در سال ۲۰۰۲ با استفاده از روش المان محدود، ناپایداریهای دنباله ناشی از سیلندر دایره‌ای چرخان را در عدد رینولدز ۲۰۰ و نسبت سرعتی ۵-۰ مورد بررسی قرار داد و نمودار ضریب پسا و ضریب برآ را در شرایط فوق بدست آورد. شکل (۲-۳) نتایج به دست آمده از تحقیق میتال را نشان می‌دهد. میتال در نتایج بدست آمده مشاهده کرد که دو ناحیه ناپایدار در دنباله سیلندر چرخان مشاهده می‌شود. اولین ناپایداری در نسبت سرعت ۰-۱/۹۱ و دومین ناپایداری در نسبت سرعت ۴/۳۷-۴/۷۵ مشاهده می‌شود که در این دو ناحیه ضریب پسا و ضریب برآ مقدار ثابتی ندارد. این دو ناحیه در شکل (۲-۳) کاملاً مشخص شده است. علاوه بر این، در نتایج بدست آمده میتال مشاهده می‌گردد که مقدار ضریب برآ با افزایش نسبت سرعت، کاهش یافته ولی ضریب پسا با افزایش مقدار نسبت سرعت ابتدا کاهش و سپس در نسبت سرعت حدود ۳/۵ افزایش می‌یابد.



شکل (۲-۳): نمودار ضریب پسا و برآ بر حسب پارامتر α در عدد رینولدز ۲۰۰

شام، گوپ و مارتینزی [۳۸] در تحقیق خود که در سال ۲۰۰۸ منتشر شد، به بررسی آزمایشگاهی دنباله سیلندر دوار برای عدد رینولدز ۹۰۰۰ و نسبت سرعت ۰-۲/۷ پرداختند. آنها در آزمایشهای خود از جریان سنج سیم داغ برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان استفاده کردند. آزمایشهای آنها در تونل بادی با محفظه آزمایشی به طول ۱۵۰ سانتیمتر و سطح مقطع مربعی شکلی با ارتفاع و عرض ۴۵ سانتیمتر انجام گرفت. اغتشاشات جریان آزاد این تونل باد توسط جریان‌سنج سیم داغ ۱ درصد اندازه‌گیری شد. قطر سیلندر فولادی استفاده شده در این آزمایشها ۲۴ میلیمتر و سطح سیلندر صاف انتخاب شده است. نتایج آزمایشها به صورت نمودار عدد استروهل بر حسب نسبت سرعت برای عدد رینولدز ۹۰۰۰ در شکل (۴-۲) نشان داده شده است. علاوه بر اندازه‌گیری پارامترهای دنباله سیلندر دوار توسط جریان‌سنج سیم داغ در این تحقیق، نتایج مرئی‌سازی برای رینولدز ۲۰۰۰ نیز بررسی شده است. همچنین آنها بررسیهایی نیز درباره فواصل گردابه‌های خارج شده از سیلندر انجام دادند که در تحقیقشان بدان اشاره شده است.



شکل (۴-۲): نمودار عدد استروهل بر حسب نسبت سرعتی (λ) برای عدد رینولدز ۹۰۰۰

دایریخ و گرسن و شلاتمن [۳۹] به بررسی تجربی جریان اطراف یک سیلندر دوار توسط دستگاه جریان سنج سیم داغ پرداختند. در آزمایشهای آنان جریان حول سیلندر، ساکن در نظر گرفته شده است و اثرات چرخش سیلندر بر روی سیال حول آن بررسی شده است. عدد رینولدز در این آزمایشها بین ۱۰۰۰۰-۱۵۰۰۰ در نظر انتخاب شده که سرعت در این عدد رینولدز سرعت سیال چسبیده به سطح سیلندر در نظر گرفته شده است که همان سرعت خطی سیلندر می باشد. نتایج بدست آمده شامل تغییرات ضریب اصطکاک، تغییرات سرعت در جهت شعاع سیلندر و تغییرات اغتشاشات در جهت شعاع سیلندر می باشد که مقادیر بدست آمده با مقادیر تئوری یا مقادیر تجربی دیگران مقایسه شده است. نتایج آنان نشان می دهد که با افزایش دور سیلندر ضریب اصطکاک و تنش برشی در روی سطح سیلندر افزایش می یابد.

شکادوا [۴۰] در تحقیق خود که در سال ۱۹۸۰ منتشر گردید حل عددی معادلات ناویر-استوکس را برای بدست آوردن روابط جدید برای جریان لزج حول سیلندر دوار مورد توجه قرار داد و معادلاتی برای بدست آوردن پسا و برآ در محدوده عدد رینولدز بین ۱۰ تا ۱۰۰ ارائه داد. در ادامه معادلات بدست آمده از نتایج وی نشان داده شده است:

$$C_x = \frac{4\pi}{\text{Re}} \int_0^1 \left(\omega^a - \frac{1}{\pi} \frac{\partial \omega^a}{\partial z} \right)_{z=0} \sin(\pi\eta) d\eta$$

$$C_y = \frac{4\pi}{\text{Re}} \int_0^1 \left(\omega^s - \frac{1}{\pi} \frac{\partial \omega^s}{\partial z} \right)_{z=0} \cos(\pi\eta) d\eta$$

که در این روابط ω سرعت زاویه‌ای سیلندر است.

آناگنوپولوس و مینیر [۴۱] در سال ۲۰۰۵ به بررسی اثرات نسبت انسداد بر روی پارامترهای دنباله سیلندر

دایره‌ای به ویژه ضریب پسا پرداختند. آنان در این تحقیق نسبت انسداد را ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ درصد در

نظر گرفتند. آناگنوپولوس و مینیر پارامترهای مختلف دنباله را بر حسب عدد کئولگان-کارپنتر

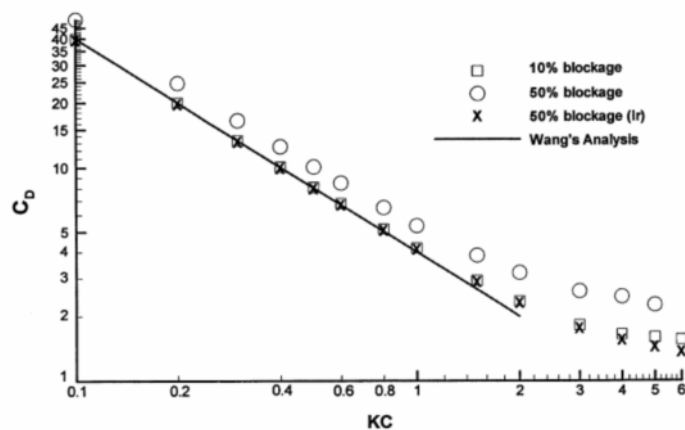
(*Keulegan-Carpenter*) بدست آوردند. این پارامتر به صورت $KC = \frac{U_m T}{D}$ تعریف می‌شود که U_m

حداکثر سرعت سیال، T دامنه گردابه‌ها و D قطر سیلندر می‌باشد. در شکل (۵-۲) نمودار ضریب پسا بر

حسب عدد KC برای نسبت انسدادهای مختلف نشان داده شده است. آنان برای شرایط آزمایشگاهی خود

به این نتیجه رسیدند که اگر نسبت انسداد کمتر از ۲۰ درصد انتخاب شود اثرات انسداد بر روی نتایج قابل

صرفنظر خواهد بود.



شکل (۵-۲): نمودار ضریب پسا بر حسب عدد KC برای انسدادهای مختلف

نوربرگ [۴۲] در سال ۱۹۸۷ در تحقیق خود، به بررسی تجربی اثرات اغتشاشهای ورودی بر روی پارامترهای ضریب پسا، ضریب برآ و عدد استروهل سیلندر دایره‌ای پرداخت. وی در تحقیق خود برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان، از جریان سنج سیم داغ استفاده کرد. عدد رینولدز در آزمایشهای او ۳۰۰۰ و ۸۰۰۰ و شدت اغتشاشات ورودی ۰/۱ و ۱/۴ درصد در نظر گرفته شده است. نتایج آزمایشهای وی نشان می‌دهد که در جریانی با شدت اغتشاشات ۱/۴ درصد (بسته به عدد رینولدز) ضریب پسا ۵ تا ۶ درصد کاهش می‌یابد.

توتار و همکارانش [۴۳] در سال ۲۰۰۶ به بررسی عددی اثرات اغتشاشات جریان ورودی بر روی دنباله سیلندر دایره‌ای توسط روش *(LES) large eddy simulation* پرداختند. آنان جریان حول استوانه را لزج، غیرقابل تراکم و دوبعدی فرض کردند. عدد رینولدز در تحقیق آنها ۱۴۰۰۰۰ انتخاب شده است. توتار و همکارانش تأثیرات اغتشاشهای مختلف ورودی را بر روی پارامترهای دنباله مانند ضریب پسا، ضریب برآ، عدد استروهل و زاویه جدائی بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که اگر اغتشاشات جریان ورودی به سیلندر را از ۰/۶ درصد به ۶ درصد برسانیم، ضریب پسا ۱۸/۶ درصد کاهش می‌یابد.

سامنر و همکارانش [۴۴] در سال ۲۰۰۷ به بررسی مشخصه‌های دنباله سیلندر دایره‌ای در عدد رینولدز ۶۰۰۰۰ پرداختند. آنان سیلندر را به صورت قائم در تونل باد قرار داده و برای نسبت شکلهای ۳، ۵، ۷ و ۹ آزمایشهای خود را انجام دادند. سامنر و همکارانش برای ایجاد جریان سیال، از تونل بادی با سطح مقطع

۱۱۳×۹۱ سانتیمتر مربع استفاده کردند که شدت اغتشاشات در محفظه آزمایش این تونل باد، ۰/۶ درصد اندازه‌گیری شد. برای سنجش پارامترهای جریان در این تحقیق، از یک لوله فشارسنج ۷ سوراخه استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مشخصه‌های جریان در پشت سیلندر با تغییر طول سیلندر به قطر آن (نسبت دید) تغییر می‌کند.

پادرینو و جوزف [۴۵] در تحقیق خود به بررسی عددی جریان حول استوانه دوار پرداختند. آنان این تحقیق را با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی، و برای جریان دوبعدی، غیرقابل تراکم و ناپایدار حول سیلندر چرخان انجام دادند. آن دو برای عدد رینولدز ۲۰۰ نسبت سرعت را ۴ و ۵، برای عدد رینولدز ۴۰۰ نسبت سرعت را ۴، ۵ و ۶ و برای عدد رینولدز ۱۰۰۰ نسبت سرعت را ۳ انتخاب کردند. نتایج آنان نشان می‌دهد که چرخش سیلندر باعث تغییراتی در مقادیر ضریب پسا، برآ، توزیع فشار سیلندر می‌شود.

فصل سوم

تجهيزات آزمایشگاهی

برای انجام کلیه آزمایشات انجام شده در این تحقیق، از لوازم و تجهیزات آزمایشگاه تونل باد دانشگاه تربیت معلم سبزواری استفاده شده است. تجهیزات استفاده شده در این آزمایشها را می‌توان به بخشهای مهم زیر تقسیم کرد:

۱-۳) تونل باد

تونل باد یک وسیله آزمایشگاهی است که توانایی تولید جریان هوا مشابه جریان هوا در اتمسفر را دارد. به علت انجام آزمایشهای ساده و اقتصادی بر روی نمونه‌های تولید شده، تونل باد یکی از مهمترین وسائل طراحان در زمینه آیرودینامیک و ساخت هواپیما است. تونلهای باد را می‌توان از لحاظ سرعت جریان هوا، ابعاد و معیارهای دیگر تقسیم‌بندی کرد. سرعت در تونل باد مادون صوت با جریان تراکم‌ناپذیر محدوده عدد ماخ (۰/۳-۰/۷)، تونل باد حوالی عدد ماخ (۰-۰/۳)، تونل باد مادون صوت با جریان تراکم‌پذیر محدوده عدد ماخ (۰/۳-۰/۷)، تونل باد حوالی صوت محدوده عدد ماخ (۰/۷-۱/۳)، تونل باد مافوق صوت محدوده عدد ماخ (۱/۳-۵) و تونل باد ماورای صوت محدوده عدد ماخ (۵-۱۰) را داراست. با توجه به بازه سرعت جریان سیال مورد نظر برای کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم داغ، می‌توان از تونل باد با بازه‌های مختلف سرعت استفاده نمود. از آنجایی که تونل باد مورد استفاده در این تحقیق قادر به تولید جریان حداکثر ۳۰ متر بر ثانیه می‌باشد در نتیجه در ادامه به معرفی تونل باد مادون صوت با جریان تراکم‌ناپذیر می‌پردازیم.

تونل باد با سرعت کم از لحاظ مسیر جریان هوا به دو گروه تونل باد مدار باز و مدار بسته تقسیم‌بندی می‌شود. در تونل باد مدار باز، هوا از محیط مکیده شده و پس از عبور از قسمتهای مختلف تونل باد و اتاق آزمایش دوباره به محیط برمی‌گردد. در این نوع تونل باد جریان ورودی و خروجی با هم ارتباطی نداشته و برهم تأثیری نمی‌گذارند.

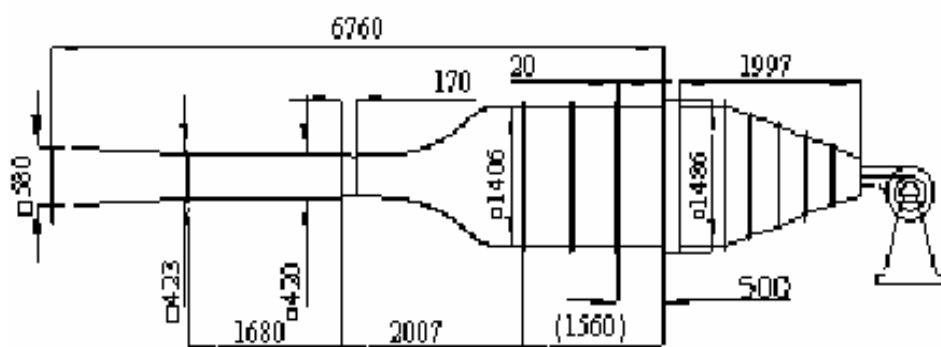
با توجه به محل قرارگیری فن تونل باد، در بالا دست و یا پائین دست اتاق آزمون، تونل باد به دو گروه دمنده و مکنده تقسیم می‌شود. در تونل باد مدار باز مکنده با اتاق آزمون بسته، فشار استاتیکی جریان هوا از فشار خارجی اتاق آزمون کمتر است، در نتیجه جریان هوا از محیط خارج اتاق از طریق محفظه‌هایی وارد اتاق آزمون می‌شود، به همین دلیل استفاده از تونل باد مدار باز مکنده با اتاق آزمون باز ممکن نیست، مگر آن که در اطراف آن، محفظه بزرگتری ایجاد شده تا فشار استاتیکی در این اتاق برابر با فشار استاتیکی جریان شود. در تونل باد مدار بسته، جریان هوا در کانالی که ابتدا و انتهای آن به هم متصل است عبور می‌کند. تونل باد مدار بسته به دو گروه اتاق آزمون باز و اتاق آزمون بسته تقسیم می‌شود. در اتاق آزمون باز، تمام قسمتهای تونل باد بجز اتاق آزمون با محیط ارتباط نداشته، یعنی اتاق آزمون آن فاقد دیوار است. در اتاق آزمون بسته هیچ یک از قسمتهای تونل باد با محیط ارتباط ندارد و اتاق آزمون هم دارای دیوار است [۴۶].

تونل باد مادون صوت مورد استفاده در این تحقیق، از نوع دمشی با مقطع آزمونی با ارتفاع و عرض ۴۰ سانتیمتر و طول ۱۶۸ سانتیمتر می‌باشد. این تونل باد دارای موتور AC با قدرت ۷ کیلو وات است که می‌توان با تغییر فرکانس موتور، سرعت جریان داخل تونل باد را از ۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه تغییر داد که البته

در عمل می‌توان در محدوده سرعت ۲۸-۵ متر بر ثانیه نتایج درستی از آزمایشها گرفت. برای سرعتهای کمتر از این بازه سرعت ورودی و لوله پیتوت دارای دقت لازم نخواهد بود و جریان یکنواختی نخواهیم داشت و در سرعتهای بزرگتر (در صورت دستیابی به آن) لرزش پراب زیاد بوده و دقت دستگاه کاهش می‌یابد. نمایی از تونل باد مورد استفاده در این تحقیق در اشکال (۳-۱) و (۳-۲) آمده است.



شکل (۳-۱): نمایی از تونل باد استفاده شده در این تحقیق



شکل (۳-۲): شکل شماتیک تونل باد استفاده شده در این تحقیق

قسمتهای مختلف تونل باد و تجهیزات آن به شرح زیر می‌باشند.

۱. محفظه آزمایش با دیواره‌هایی شفاف (از جنس پلکسی گلاس) جهت دیدن داخل آن

۲. سیستم جابجاکننده (تراورس) پراب سیم داغ

۳. مبدل الکترونیکی فشار، لوله پیتوت و لوله‌های ارتباطی مربوطه جهت اندازه‌گیری گرادیان فشار طولی و

همچنین کالیبراسیون سیم داغ

۴. پراب سیم داغ و سیستم داده‌برداری

۵- موتور

۶- شبکه‌های لانه زنبوری به منظور یک بعدی کردن جریان

۷- صفحات مشبک به منظور کاهش اغتشاشات جریان

۸- دیفیوزر

۲-۳) مکانیزم جابه‌جا کننده پراب

دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، سرعت لحظه‌ای جریان سیال را در مکانی که پراب در آن قرار دارد،

اندازه‌گیری می‌کند. برای آنکه بتوان توزیع سرعت و یا تغییرات سرعت جریان سیال را نسبت به مکان

اندازه‌گیری نمود، نیاز به مکانیزمی است که بتوان پراب را در نقاط مختلف حرکت داد.

در تونل باد مورد استفاده در این آزمایشها از یک مکانیزم دقیق سه درجه آزادی، با دقت 0.01 میلیمتر،

برای جابجایی پراب سیم داغ استفاده شده است. این مکانیزم به کمک نرم‌افزاری کنترل شده و اطلاعات

موقعیت لحظه‌ای پراب قابل ثبت می‌باشد. در نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق می‌توان به صورت

دستی مختصات نقاطی که نیاز به نمونه‌گیری دارند را در سه جهت وارد کرد و در هر بار نمونه‌گیری بدون نیاز به جابجائی دستی نقاط زیادی را نمونه‌گیری کرد. در مکانیزم انتقال دهنده از سه موتور پله‌ای برای جابجائی پراب در سه جهت مختصات استفاده شده است. با توجه به این که موتورهای پله‌ای قادر به حرکت دورانی با دقت ۱ درجه هستند دقت پیشروی پراب در این مکانیزم ۰/۰۱ میلیمتر می‌باشد. در تونل بادهایی که سطح مقطع کوچک دارند (مانند تونل باد استفاده شده در این تحقیق) برای جلوگیری از انسداد محفظه آزمایش تونل، مکانیزم انتقال دهنده پراب را در خارج تونل نصب می‌کنند. مکانیزم فوق بر روی قابهای جداگانه‌ای مستقل از پایه‌های تونل باد نصب شده است تا ارتعاشات احتمالی بدنه تونل باد به مکانیزم جابجاکننده پراب منتقل نگردد و کیفیت داده‌برداری افزایش یابد. در شکل (۳-۳) مکانیزم جابجا-کننده پراب را بر روی محفظه آزمایش نشان داده شده است.



شکل (۳-۳): مکانیزم جابجاکننده پراب

۳-۳ مدل آزمایش

در آزمایشهای صورت گرفته در مراحل مختلف این تحقیق، از یک مدل استوانه‌ای استفاده شده است. این مدل از جنس پلکسی گلاس تهیه شده و دارای سطحی کاملاً صاف همانند سطح شیشه است. در نتیجه در این مدل می‌توان از تأثیرات زبری سطح چشم‌پوشی کرد. این استوانه دارای طول ۴۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۰ میلی‌متر است. با توجه به ابعاد استوانه و ابعاد کانال تونل باد نسبت انسداد و نسبت دید در این مدل ۰/۰۵ و ۲۰ می‌باشد. شکل (۳-۴) نمایی از سیلندر را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴): مدل استفاده شده از جنس پلکسی گلاس با قطر ۲۰ میلی‌متر

۳-۴ شبکه‌های توربولانس‌ساز

برای بررسی اثرات اغتشاشهای جریان ورودی بر روی مشخصه‌های دنباله سیلندر از شبکه‌های توربولانس‌ساز استفاده شده است. میزان شدت توربولانسی این نوع شبکه‌ها به مقدار سرعت جریان تونل باد، اندازه قطر میله‌های شبکه و فاصله موقعیت نصب آن تا سطح سیلندر بستگی دارد. به منظور تخمین اولیه از قطر میله‌های استوانه‌ای که باید در شبکه توربولانس‌ساز واقع شوند، از یک رابطه توانی برای ارتباط بین شدت توربولانسی جریان آزاد با قطر میله‌های شبکه به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$Tu = 0.8 \left(\frac{x}{d} \right)^{-\frac{5}{7}} \quad (3-1)$$

در این رابطه Tu شدت توربولانسی جریان آزاد، d قطر میله‌ها و x فاصله طولی از شبکه توربولانس‌ساز

مورد نظر می‌باشد. [۴۷]

معادله (۳-۱) که با عنوان قانون $\left(-\frac{5}{7} \right)$ شناخته می‌شود دارای محدودیتهای زیر می‌باشد:

۱- معادله بالا محدود به نواحی ایزونتروپیک یا کاملاً توسعه یافته می‌باشد.

۲- جریان ورودی باید عمود بر شبکه باشد.

۳- جریان ورودی به شبکه توربولانس‌ساز باید دارای اغتشاشات کمی باشد.

شبکه‌های استفاده شده در این تحقیق با استفاده از یک فریم چوبی و میله‌های پلاستیکی ساخته شده

است. بر روی فریم چوبی ساخته شده، سوراخهایی متناسب با قطر میله‌های مورد نظر و با فواصلی

مشخص ایجاد شده و سپس لوله‌های پلاستیکی بریده شده بر روی این سوراخها قرار داده می‌شود. در این

تحقیق برای ایجاد شدت اغتشاشات مختلف، قطرهای میله‌های شبکه را تغییر داده‌ایم که به منظور

دستیابی به شدت اغتشاشات $3/5$ و 5 درصد به ترتیب از میله‌هایی با قطر 8 و 12 میلیمتر استفاده کردیم.

در جدول (۳-۱) مشخصات شبکه‌های توربولانس‌ساز ذکر شده است.

جدول (۳-۱): مشخصات فیزیکی شبکه‌های توربولانس‌ساز

فاصله‌های بین میله‌ها (میلیمتر)	قطر میله‌ها (میلیمتر)	شدت اغتشاشات تولید شده
۳۰	۸	$3/5$ درصد
۲۵	۱۲	۵ درصد

اشکال (۳-۵) و (۳-۶) شبکه‌های توربولانس‌ساز استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵): شبکه توربولانس ساز ۳/۵ درصد



شکل (۳-۶): شبکه توربولانس ساز ۵ درصد

اغتشاشات تولید شده توسط شبکه‌ها تا فاصله معینی از آن در پائین دست شبکه ناهمگن می‌باشد، لذا برای اطمینان از همگن بودن اغتشاشات ایجاد شده در جریان آزاد، باید فاصله قرارگیری این شبکه تا

سطح سیلندر حداقل ۱۰ برابر فاصله بین میله‌های شبکه انتخاب گردد که در آزمایشهای انجام گرفته در این تحقیق این فاصله، ۲۰ برابر فاصله بین میله‌های شبکه انتخاب شده است.

لازم به ذکر است که میزان اغتشاشهای ورودی جریان به سرعت جریان سیال نیز وابسته است که در اینجا به علت تغییر ناچیزی که در اغتشاشهای جریان ورودی به سیلندر برای دو سرعت سیال رخ می‌دهد، از این تغییرات صرف‌نظر کردیم.

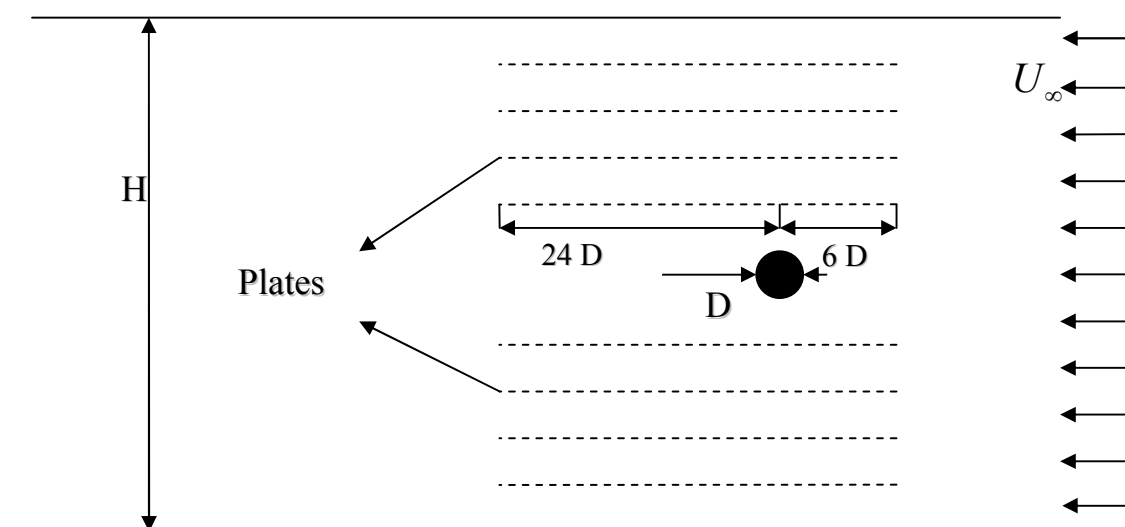
۵-۳) نسبت انسداد

یکی از کارهای انجام گرفته در این تحقیق بررسی نسبت انسداد محفظه آزمایش و مدل انتخاب شده در نتایج بدست آمده می‌باشد. در تحقیقات آزمایشگاهی با توجه به ابعاد اتاقک آزمایش تونل باد مورد استفاده، برای انتخاب ابعاد سیلندر محدودیتهایی وجود دارد. یکی از پارامترهایی که باید در انتخاب سیلندر به آن توجه داشت نسبت انسداد می‌باشد. این پارامتر را بصورت ارتفاع اتاقک آزمایش تونل باد (H) تقسیم بر قطر سیلندر (D) تعریف می‌کنیم و با β نمایش می‌دهیم در نتیجه داریم:

$$\beta = \frac{H}{D} \quad (\text{Blockage ratio})$$

برای ایجاد نسبت انسدادهای مختلف می‌توان دو پارامتر ارتفاع کانال یا قطر سیلندر را تغییر داد. با افزایش قطر سیلندر نسبت طول به قطر سیلندر (نسبت دید) کاهش می‌یابد که خود باعث تأثیر در مشخصه‌های دنباله می‌شود. همچنین زبری سطوح سیلندره‌ای انتخاب شده نیز ممکن است با هم تفاوت داشته باشد

که این نیز باعث ایجاد تغییرات در پارامترهای دنباله سیلندر می‌شود. با توجه به تأثیرات نامطلوب افزایش قطر سیلندر بر روی دنباله در این تحقیق با کاهش ارتفاع اتاقک آزمایش اقدام به تغییر نسبت انسداد کرده‌ایم، که این کاهش ارتفاع را با قرار دادن صفحات پلکسی گلاس در داخل اتاقک آزمایش انجام شده است. این صفحات دارای ضخامت ۳ میلیمتر، طول ۶۰ سانتیمتر و عرض ۴۰ سانتیمتر می‌باشند. در هنگام نصب صفحات پلکسی گلاس باید دو نکته را در نظر داشته باشیم. نکته اول لزوم موازی بودن صفحات قرار داده شده در تونل باد است و دومی اندازه و محل قرار دادن صفحه در اتاقک آزمایش است. در این تحقیق نکته اول کاملاً رعایت شده است و برای نکته دوم بر اساس تحقیق استنسبای [۵۰] عمل شده است. در شکل (۳-۷) موقعیت صفحات در داخل محفظه تونل باد بصورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل (۷-۳): موقعیت صفحات پلکسی گلاس در داخل محفظه آزمایش

۶-۳) مکانیزم دوران سیلندر

شاید بتوان مشکلترین قسمت این تحقیق را انتخاب مکانیزم تأمین دوران سیلندر نامید. مکانیزمی که

برای این تحقیق انتخاب می شود باید دارای ویژگیهای زیر باشد:

- نیروی محرکه مناسب از نظر قدرت و سرعت دوران.

- تأمین دورههای مختلف برای دوران سیلندر.

- انتقال نیروی محور دوران موتور به سیلندر.

- دوران مناسب و بدون ارتعاش و لرزش سیلندر در داخل محفظه آزمایش تونل باد.

در ادامه به بررسی هر یک از ویژگیهای نام برده پرداخته و سپس تجهیزات استفاده شده در این مکانیزم را

معرفی می کنیم.

۱-۶-۳) نیروی محرکه

موتوری که باید در این مکانیزم استفاده شود باید دارای قدرت مناسب برای چرخش سیلندر بوده و بتوان

توسط آن به دورههای مورد نظر در این تحقیق دست پیدا کرد.



شکل (۳-۸): نمایی از موتور استفاده شده در این تحقیق

با توجه به بررسی و آزمایش چند موتور، شامل موتور پله‌ای، موتور گیربکسی و الکتروموتور AC، الکتروموتوری با دور خروجی ۱۴۵۰ دور بر دقیقه و قدرت ۳ اسب بخار برای تأمین دورهای سیلندر (شکل (۳-۸)) انتخاب شد.

۲-۶-۳) تأمین دورهای مختلف

برای تأمین دورهای مختلف سیلندر می‌توان از دستگاه اینورتور و یا یک مکانیزم انتقالی با تغییر در قطرهای دو محور (قطر محور موتور و قطر محور سیلندر) استفاده کرد. بعلاوه راحتی و ارزانی، در این تحقیق از یک مکانیزم پولی و تسمه برای تأمین دورهای مختلف سیلندر استفاده شده است. مکانیزم فوق دارای پولیهایی با قطرهای مختلف می‌باشد که البته قطر پولی محور موتور ثابت انتخاب شده است. قطر پولی موتور ۴۰ میلیمتر و قطر پولیهای محور سیلندر ۲۰، ۲۴، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ میلیمتر انتخاب می‌شود. با توجه به اندازه قطر پولیهای انتخاب شده در این تحقیق، می‌توان سیلندر را با سرعتهای دورانی ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰ دور بر دقیقه دوران داد. شکل (۳-۹) پولیها و شکل (۳-۱۰) تسمه‌های استفاده شده در این آزمایشها را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۹): پولیهای استفاده شده برای تنظیم دور سیلندر



شکل (۳-۱۰): تسمه‌های دنده‌ای استفاده شده در انتقال نیرو از موتور به سیلندر

برای سنجش سرعت دورانی سیلندر از یک دورسنج دیجیتال استفاده شده است که در هر لحظه سرعت دورانی سیلندر را بر حسب دور بر دقیقه نشان می‌دهد.

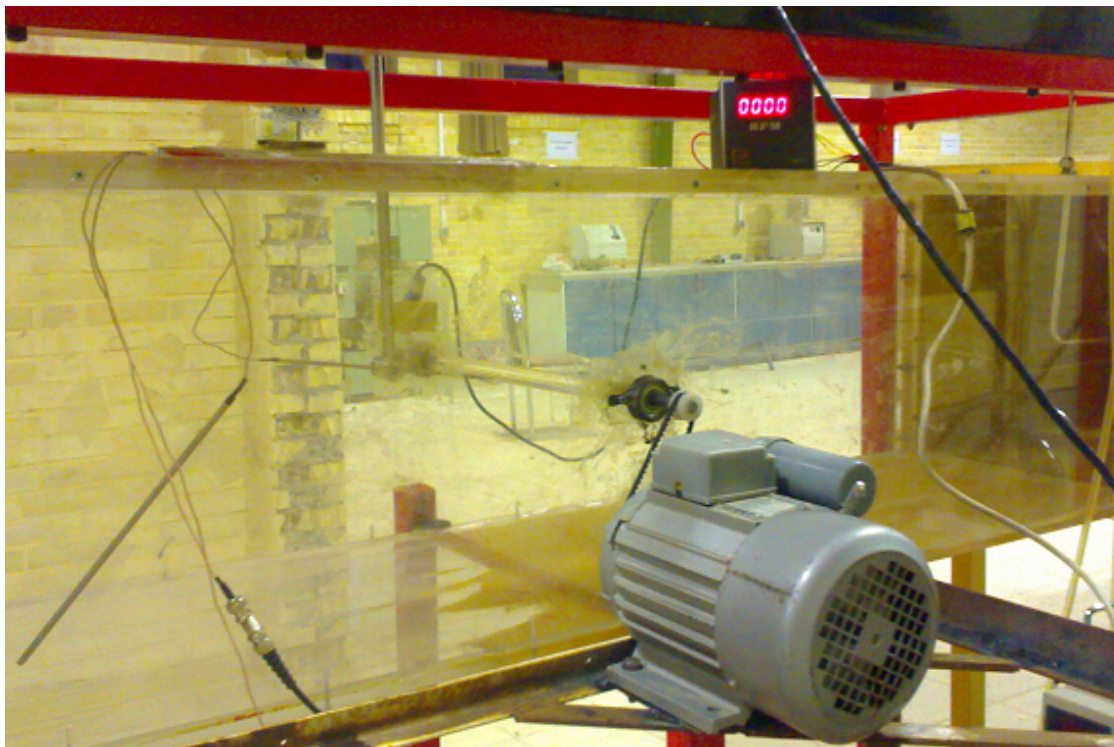
۳-۶-۳) انتقال نیرو

همانطور که در مبحث قبل توضیح داده شد، در این پروژه به علت دستیابی به دورهای مختلف سیلندر از مکانیزم تسمه و پولی استفاده شده است.

۴-۶-۳) دوران سیلندر

برای قرار دادن سیلندر در داخل محفظه تونل باد دو شفت با قطر ۱۰ سانتیمتر در دو قاعده سیلندر قرار می‌دهیم. این دو شفت بر روی دو عدد بلبرینگ بر روی محفظه آزمایش قرار داده می‌شوند. برای رسیدن به نتایج صحیح، باید سیلندر در داخل محفظه تونل باد بدون انحراف از مرکز و لنگی دوران کند که بدین منظور باید سوراخها و رزوه‌های ایجاد شده در دو قاعده سیلندر و دو شفت استفاده شده کاملاً هم‌مرکز و یکنواخت باشند.

شکل (۱۱-۳) نمایی از موتور، تسمه و پولی، سیلندر و دورسنج را قبل از شروع آزمایش نشان می‌دهد.



شکل (۱۱-۳): طریقه چرخش سیلندر در محفظه آزمایش

فصل چهارم

جریان سنج سیم داغ

۴-۱) مقدمه

برای بدست آوردن مشخصه‌های جریان بسته به شرایط مسئله، می‌توان از روشهای مختلفی استفاده کرد. بطور کلی روشهای موجود را به دو دسته روشهای عددی و روشهای آزمایشگاهی طبقه‌بندی می‌کنند در ادامه به معرفی این دو روش می‌پردازیم.

۴-۱-۱) روشهای عددی:

با رشد سریع رایانه‌ها در دهه‌های اخیر، روشهای دینامیک سیالات محاسباتی (*CFD*) مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. روشهای عددی می‌توانند نتایج قابل قبول و معتبری را در مورد جریانهای پیچیده نظیر جریانهای چرخشی با هندسه پیچیده، لایه مرزی، احتراق و جریانهای دوفازی و ... ارائه دهند. هم‌اکنون در بخش وسیعی از فرآیند طراحی سیستمهای مکانیک سیالات همانند توربین، کمپرسور، پمپ و ... از این روشهای عددی استفاده می‌شود. روشهای عددی معمولاً به دو صورت حل مستقیم معادله‌های حاکم بر جریان سیالات (*DNS*) و یا مدلسازی آشفتگی (*Turbulence Modeling*) انجام می‌پذیرند.

در روش *DNS*، ابتدا باید محدوده حل موردنظر را شبکه‌بندی نموده، سپس معادله‌های ناویر-استوکس را به صورت جبری درآورده و با استفاده از شرایط مرزی و شرایط اولیه معادله‌های جبری را حل نمود.

خطاهای ناشی از انتخاب و میزان دقت در تبدیل مشتقهای جزئی معادله‌های ناویر-استوکس به عبارتهای جبری، انتخاب درست نقاط شبکه و حساسیت شدید حل نهایی معادله به شرایط مرزی و شرایط اولیه را می‌توان از مشکلات روش عددی *DNS* دانست. همچنین برای حل این معادله با استفاده از این روش، نیاز به رایانه‌هایی با سرعت بسیار بالا می‌باشد که بتواند محاسبه‌ها را به طور موازی انجام دهد.

۲-۱-۴) روش آزمایشگاهی:

در روشهای تجربی، تعیین سرعت جریان سیال به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود. در روش غیرمستقیم، سرعت جریان سیال به وسیله اندازه‌گیری فشار و با استفاده از قوانین مکانیک سیالات و در روش مستقیم با استفاده از دستگاههایی نظیر جریان‌سنج لیزری، جریان‌سنج سیم داغ اندازه‌گیری می‌شود. در روش مستقیم، خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ که معمولاً به صورت ولتاژ می‌باشد، باید در ابتدا کالیبره شده و سپس با استفاده از ولتاژ خروجی و معادله‌های کالیبراسیون سرعت جریان سیال اندازه‌گیری شود. در روش غیرمستقیم با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت، فشار جریان سیال اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از قوانین مکانیک سیالات، سرعت متوسط جریان سیال تعیین می‌شود. در این روش، اغتشاشهای جریان سیال را نمی‌توان اندازه‌گیری کرد. از طرف دیگر، پاسخ فرکانسی دستگاههای اندازه‌گیر فشار، بالا نبوده و با استفاده از این روش، فقط می‌توان سرعت لحظه‌ای را با فرکانس چند صد سیکل در ثانیه اندازه‌گیری نمود. برای اندازه‌گیری سرعتهای لحظه‌ای با فرکانس بالا و همچنین هنگامیکه

پاسخ سریع وسیله اندازه گیر در مقابل تغییرات جریان سیال مدنظر باشد، از دستگاه جریان سنج سیم داغ و یا از دستگاه جریان سنج لیزری استفاده می شود.

اندازه گیری مقدار و جهت سرعت به منظور بدست آوردن اطلاعات در مورد شرایط در محل نمونه گیری و کسب اطلاعات لازم در روی یک صفحه برای محاسبه دبی جرمی و حجمی جریان مهم و حیاتی است. وسایل گوناگون موجود برای اندازه گیری مقدار سرعت در یک نقطه را می توان برای بدست آوردن اطلاعات در جریانهای دارای موجهای غیردرهم و تغییرات آهسته به کار برد. از روشها و وسایل مورد استفاده در روشهای تجربی می توان به لوله پیتوت، جریان سنج سیم داغ، جریان سنج لیزری، جریان سنج صوتی، جریان سنج الکترومکانیکی و الکترومغناطیسی اشاره کرد.

به علت استفاده از جریان سنج سیم داغ در این پروژه، در ادامه به معرفی این دستگاه می پردازیم.

۲-۴) جریان سنج سیم داغ [۴۶]

دستگاه جریان سنج سیم داغ یکی از دستگاههای اندازه گیری دقیق محسوب می شود که قابلیت اندازه گیری جزئیات ساختاری و نوسانات فرکانس بالای جریانهای توربولانس و انتقالی را دارد. اصول عملکرد این نوع جریان سنج بر مبنای اثرات سرمایشی جریان سیال از روی یک سیم داغ استوار است. به کمک این دستگاه می توان سرعت لحظه ای جریان ها را در هر نقطه اندازه گیری نمود و طیف پیوسته ای از

نوسانات دقیق سرعت بر حسب زمان (برای هر نقطه از جریان) را ترسیم کرد. مقادیر سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده به کمک روشهای آماری تجزیه و تحلیل می‌شوند تا وضعیت جریان و فرکانس‌های حاکم بر آن شناسایی گردد. با تحلیل نتایج خروجی دستگاه می‌توان کمیت‌هایی نظیر سرعت متوسط جریان و شدت توربولانسی جریان را به سادگی تعیین نمود. شکل (۴-۱) جریان‌سنج استفاده شده در این آزمایشها را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱): جریان‌سنج سیم داغ

همانطور که قبلاً بیان شد جریان‌سنج سیم داغ به عنوان یکی از ابزارهای اصلی اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال می‌باشد. این دستگاه دارای امتیازات و معایبی می‌باشد که در ادامه به معرفی آن می‌پردازیم.

۴-۲-۱) قابلیت‌های جریان‌سنج سیم داغ

۱- استفاده از دستگاه آسان بوده و کالیبراسیون دستگاه، جمع‌آوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل آنها به سادگی انجام می‌پذیرد.

۲- با کاهش سرعت، دقت دستگاه‌های دیگر اندازه‌گیری سرعت جریان سیال به شدت پایین می‌آید اما دقت دستگاه جریان‌سنج سیم داغ با کاهش سرعت، افزایش می‌یابد.

۳- با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سیم داغ می‌توان جریان هوا را در محدوده سرعت ۵-۱۰۰ متر بر ثانیه اندازه‌گیری کرد.

۴- دقت دستگاه جریان‌سنج سیم داغ در شرایط مناسب در حدود ۰/۱ تا ۰/۲ درصد می‌باشد.

۵- پاسخ فرکانسی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ حدود ۵۰ کیلو هرتز می‌باشد که می‌توان پاسخ فرکانسی را تا چند صد کیلو هرتز افزایش داد.

۶- نسبت سیگنال به نویز در این دستگاه کم می‌باشد.

۷- خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ به صورت یک ولتاژ آنالوگ پیوسته است و تجزیه و تحلیل آن به سادگی انجام می‌پذیرد.

۸- سنسورهای این دستگاه نسبت به دستگاه‌های اندازه‌گیری دیگر فضای کمتری اشغال می‌کنند.

(سنسورهای متداول دستگاه سیم داغ دارای قطر ۵ میکرومتر و طول ۱/۲۵ میلیمتر هستند)

۹- جریان‌سنج سیم داغ، را می‌توان در سیالات دو فازي همانند مایع/گاز به کار برد.

۱۰- با استفاده از قرار دادن دو یا چند پراب در جریان سنج سیم داغ در نقاط مختلف جریان آشفته، علاوه

بر محاسبه سرعت لحظه‌ای، می‌توان تغییرات آن را نیز نسبت به مکانهای مختلف بررسی نمود.

۱۱- با استفاده از این دستگاه می‌توان هر سه مؤلفه مکانی سرعت را به صورت همزمان اندازه‌گیری کرد.

۲-۲-۴) معایب جریان سنج سیم داغ

۱- آلودگیهای موجود در جریان روی سنسور اثر گذاشته، در نتیجه انتقال حرارت تغییر کرده و

مشخصه‌های کالیبراسیون را تغییر می‌دهد. در این حالت باید پراب را تمیز نموده و دوباره کالیبراسیون را

انجام داد.

۲- سنسور جریان سنج سیم داغ بسیار ظریف است و به سادگی از بین می‌رود، اما در صورتی که با دقت از

آن استفاده شود، مدت زمان طولانی قابل استفاده خواهد بود. (در مطالعات جریان هوا با سرعت کم،

مهمترین عاملی که سبب از بین رفتن سنسور می‌شود بی‌تجربگی کاربر می‌باشد)

۳- در جریانهای با سرعت بالا، ممکن است سنسور سیم داغ در اثر برخورد ذرات ریز موجود در جریان

سیال پاره شود، که این مشکل را می‌توان با قرار دادن فیلتر در مسیر جریان رفع نمود.

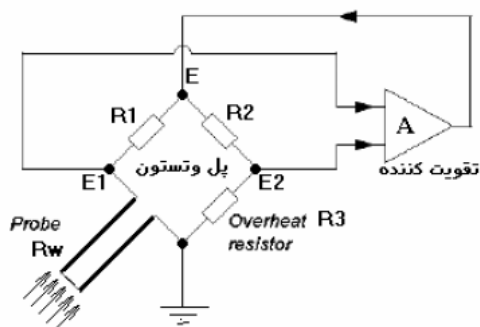
۴- پراب سیم داغ هنگامی که در جریان قرار می‌گیرد، اغتشاشهایی در جریان سیال ایجاد می‌کند که با

طراحی مناسب پراب می‌توان خطاهای آن را به حداقل رساند.

۵- در مواردی مثل اندازه‌گیری سیال در مجاورت ملخها، فنها، و یا توربوماشینها که محدودیت مکانی داریم نمی‌توان از دستگاه سیم داغ استفاده کرد. در این مواقع می‌توان از جریان‌سنج لیزری برای اندازه‌گیری جریان استفاده نمود.

۳-۲-۴) اصول عملکرد دستگاه:

اندازه‌گیری سرعت به وسیله این دستگاه از طریق سنسورهای سیم داغ انجام می‌شود که این سنسورها بر روی دو پایه فلزی بر روی پراب قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری سرعت و دمای سیال بر پایه میزان انتقال حرارت جابجایی از یک سنسور گرم شده (سیم داغ) به جریان سیال می‌باشد. سنسور این دستگاه به عنوان یک مقاومت الکتریکی در یک مدار پل وتستون قرار می‌گیرد (شکل ۲-۴)). با تغییر شرایط جریان سیال، میزان انتقال حرارت از سنسور تغییر می‌کند، لذا ولتاژ مورد نیاز جهت ثابت نگه‌داشتن دمای سنسور (و یا مقاومت الکتریکی آن) عوض می‌شود.



شکل (۲-۴): محل قرارگیری سنسور در پل وتستون

انتقال حرارت از سیم داغ، که در دمای T_w است، به هوا و یا سیال دیگری، که در دمای T_a است، از رابطه

$$Q = h.(T_w - T_a) \quad \text{روبرو تبعیت می کند.}$$

که در آن Q نرخ انتقال حرارت در واحد سطح و h ضریب جابجایی هوا می باشد. این انتقال حرارت و یا

در واقع مقدار ضریب جابجایی هوا h ، متغیری است که مقدار آن به خواص سیال نظیر لزجت

سینماتیکی (μ)، چگالی (ρ)، ضریب پخش حرارتی (α)، سرعت سیال (U)، و همچنین هندسه سیم (قطر

سیم d) وابسته می باشد که در اعداد بی بعد رینولدز (Re)، پرانتل (Pr) و ناسلت (Nu)، خلاصه

می شود.

انتقال حرارت از سیم داغ به جریان سیال سبب می شود که مقاومت الکتریکی سیم داغ (R_w) تغییر کرده و

مقدار جریان الکتریکی، که سبب گرم شدن سیم می شود نیز تغییر کند. این تغییر به عنوان یک سیگنال

خروجی از دستگاه گرفته شده و با توجه به معادله کالیراسیون مورد نظر، می توان سرعت و یا دمای سیال

را اندازه گیری نمود.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که قسمتی از انتقال حرارت از سیم داغ، از طریق هدایت به پایه پراب

منتقل می شود. به همین دلیل توزیع دمای سنسور در راستای طولی آن ثابت نخواهد بود. از این رو معمولاً

طول سیم داغ را طوری تعیین می کنند که این نوع انتقال حرارت درصد بسیار ناچیزی از کل انتقال

حرارت سیم داغ را به خود اختصاص دهد.

۴-۲-۴) مدار الکترونیکی دستگاه جریان سنج سیم داغ

نوع مدار الکترونیکی دستگاه جریان سنج سیم داغ از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. برای

اندازه‌گیری سرعت جریان سیال، سه نوع مدار الکترونیکی وجود دارد:

۱- مدار الکترونیکی جریان ثابت CC (*Constant Current*): با استفاده از این مدار الکترونیکی،

جریان الکتریکی عبور کننده از سنسور سیم داغ را ثابت نموده و سرعت جریان سیال اندازه‌گیری

می‌شود.

۲- مدار الکترونیکی ولتاژ ثابت CV (*Constant Voltage*): در این حالت مدار الکترونیکی، ولتاژ

بالای سنسور سیم داغ را ثابت نگه داشته و سرعت جریان سیال اندازه‌گیری می‌شود.

۳- مدار الکترونیکی دما ثابت CT (*Constant Temperature*): با استفاده از این مدار الکترونیکی،

مقاومت سنسور سیم داغ را ثابت نگه داشته و سرعت جریان سیال اندازه‌گیری می‌شود.

مدار الکترونیکی CV و CT دارای حلقه بازخورد (*Feedback*) بوده و به طور خودکار برای اندازه‌گیری

سرعت جریان قابل تنظیم است، ولی مدار الکترونیکی CC دارای حلقه بازخورد نبوده و باید به صورت

دستی آن را برای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال تنظیم نمود. به علت اینکه دستگاه جریان سنج

استفاده شده در این تحقیق از نوع دما ثابت می‌باشد به توضیح این نوع مدار الکترونیکی می‌پردازیم.

۴-۲-۵) مدار الکتریکی دما ثابت:

مدار الکترونیکی دما ثابت (CT)، یکی از قسمتهای اصلی دستگاه جریان سنج سیم داغ است. شکل (۳)-

(۴) این مدار را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در وضعیت دما ثابت، اینرسی حرارتی المان سنسور

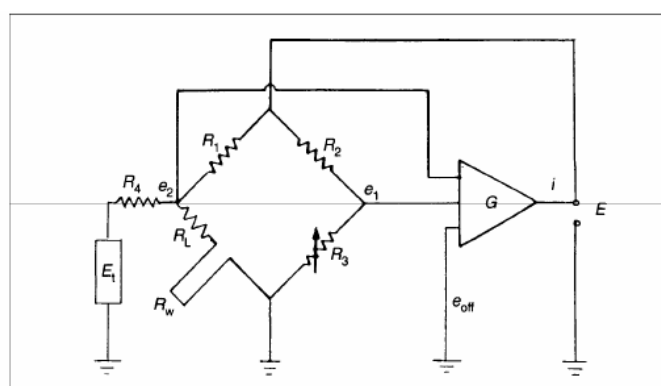
همزمان با تغییر شرایط جریان سیال، به طور خودکار تطبیق داده می‌شود. این قابلیت همراه با مزایای

عمده‌ای در شرایط اندازه‌گیری خواهد بود. این وضعیت عملکرد، با قرار دادن تقویت‌کننده تفاضلی در

مدار سیم داغ برای به دست آوردن یک تغییر سریع در جریان گرم‌کننده سنسور به دست می‌آید تا

تغییرات ناگهانی در سرعت جریان سیال را جبران کند. مدار الکترونیکی دما ثابت شامل پل وتستون،

تقویت‌کننده تفاضلی، تنظیم‌کننده پاسخ فرکانسی و تقویت‌کننده جریان است.



شکل (۳-۴): مدار دما ثابت شامل یک پل وتستون، یک تقویت‌کننده فیدبک و یک مدار آزمایش الکترونیکی

پل وتستون، شامل چهار مقاومت است که مقاومت‌های R_1 و R_2 آن ثابت، مقاومت R_3 متغیر و

مقاومت چهارم آن R_w ، سنسور است. مدار الکترونیکی دما ثابت طوری طراحی شده است که به طور

خودکار پل وتستون را متوازن می‌کند، به صورتی که در حالت توازن $(E_1 - E_2)$ نزدیک به صفر است.

هنگامی که سنسور در جریان سیال قرار می‌گیرد، مقاومت سنسور کاهش یافته و پل وتستون از حالت توازن خارج می‌شود در نتیجه اندازه $(E_1 - E_2)$ افزایش می‌یابد. این افزایش توسط تقویت‌کننده تفاضلی، تقویت شده و با استفاده از تقویت‌کننده جریان، به طور خودکار به پل وتستون جریان الکتریکی بیشتری اعمال می‌شود. بنابراین ولتاژ بالای پل افزایش یافته و توسط رابطه‌ای می‌توان از این ولتاژ، سرعت جریان سیال را بدست آورد. تقویت‌کننده‌های امروزی پاسخ خیلی سریعی دارند و می‌توانند مقاومت سیم را در مدارهای دما ثابت، ثابت نگه دارند.

در انتخاب و تنظیم مقاومت متغیر R_3 باید دقت نمود تا اندازه آن طوری انتخاب شود که باعث افزایش شدید دمای سنسور و سوختن سنسور از جنس تنگستن نشود.

۴-۲-۶) پراب سیم داغ

یکی از اجزای دستگاه جریان سنج سیم داغ، پراب است که شامل سنسور، پایه‌ها، بدنه، کابل و اتصالات است (شکل (۴-۴)).



شکل (۴-۴): قسمت‌های مختلف پراب یک بعدی سیم داغ

تاکنون پرابهای گوناگونی برای دستگاه جریان سنج داغ طراحی و ساخته شده است. مسأله مهم در طراحی این پرابها این است که سنسور و مدار الکترونیکی دستگاه جریان سنج باید بتواند نسبت به تغییر شرایط جریان سریعاً عکس العمل نشان دهد. پرابهای سیم داغ معمولی، دارای طول ۱/۲۵ میلیمتر و قطر ۴ تا ۵ میکرومتر می باشند و برای اندازه گیریهای آماری مانند مؤلفه های سرعت متوسط و دقت قابل قبولی دارند.

هر پراب سیم داغ بطور کلی شامل اجزای زیر است:

۱- سنسور (المان گرمایی)

۲- پایه ها که نگهدارنده سنسور و هادی جریان به داخل آن هستند.

۳- بدنه پراب که پایه ها به آن متصل هستند.

۴- اتصالاتی که ارتباط الکتریکی پایه ها با کابل پراب را ایجاد می کنند.

پرابها را می توان بر حسب معیارهای مختلفی نظیر نوع جنس، نوع کاربرد آنها در جریانها، یک، دو

و یا سه بعدی بودن آنها و یا نوع سیالی که می توانند اندازه گیری نمایند، تقسیم بندی نمود. پرابها

ممکن است که دارای یک، دو و یا سه سنسور باشند و یا سنسور آنها از نوع سیمی و یا فیلمی باشد.

قطر سنسور سیم داغ بسیار کم و دارای پاسخ فرکانسی بالا بوده، ولی شکننده است. سنسور فیلم داغ

دارای استحکام بالا ولی پاسخ فرکانسی پائین است. به علت استفاده از سنسور سیم داغ در این تحقیق

به معرفی این نوع سنسور می‌پردازیم:

۱-۶-۲-۴) پراب‌های سیمی

پراب سیم داغ شامل یک یا چند سنسور با قطر بسیار کم که هر یک به دو پایه وصل شده‌اند. قسمت

فعال سیم ممکن است تا پایه‌ها امتداد داشته باشد (بدون روکش) یا به یک قسمت مرکزی در خط

واصل دو پایه محدود شده باشد (روکش‌دار). این پراب‌ها می‌توانند یک، دو یا سه سنسور داشته باشند

که در این حالت هر سنسور دارای یک مدار مستقل است (شکل (۴-۵)). برای انتخاب یک نوع پراب

باید به نکاتی مانند قابلیت‌های پراب، قیمت آن، مدت استفاده از آن و زمان کالیبراسیون آن توجه

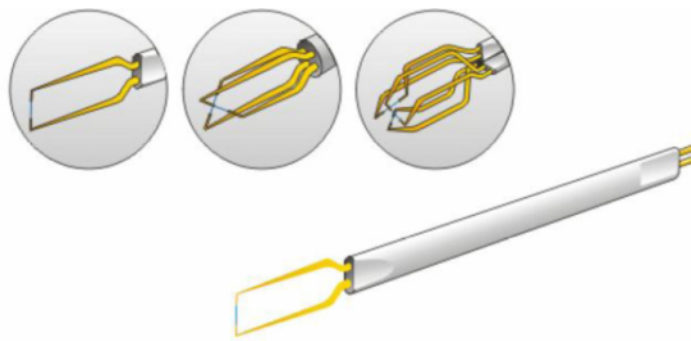
داشت. سنسور سیم داغ بر روی پایه‌های پراب نصب شده و از طریق کابل‌های الکتریکی به مدار دما

ثابت (یکی از شاخه‌های پل وتستون) متصل می‌شوند. با توجه به اینکه هدف از استفاده از جریان‌سنج

سیم داغ اندازه‌گیری اغتشاشات جریان به صورت کمی و کیفی است، لذا پراب‌ها باید طوری طراحی

شوند که حداقل اثرات را روی جریان ایجاد کنند. همچنین سنسور و مدارهای الکترونیکی مربوطه،

باید به گونه‌ای باشند که پاسخ بسیار سریعی نسبت به تغییرات جریان، از خود نشان دهند.



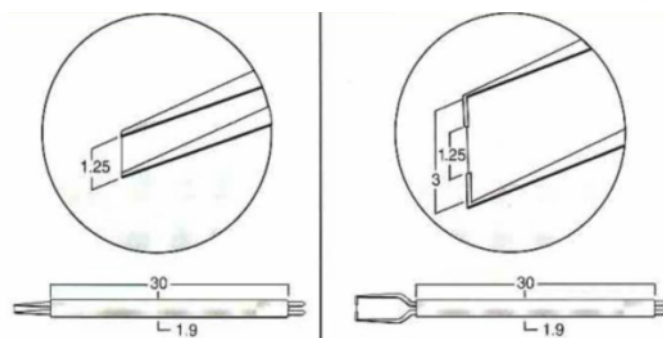
شکل (۴-۵): پرابهای چند سنسوره برای اندازه‌گیری جریانهای چند مؤلفه‌ای

پایه‌های پراب معمولاً از جنس نیکل و یا فولاد ضد زنگ است و دارای استحکام کافی می‌باشد. برای آن که اثرات تداخلی پایه‌ها در جریان به حداقل رسانده شود، پایه‌ها معمولاً به شکل سوزن که قطر نوک آن حدود ۱ میلی‌متر است، ساخته می‌شود. همچنین به منظور هدایت الکتریکی بهتر، پایه‌های پراب با طلا پوشش داده می‌شوند. بدنه پراب از جنس سرامیک بوده که سوزن‌ها در آن قرار می‌گیرند. سرامیک، عایق بسیار مناسبی بوده و اثر خازنی آن ناچیز می‌باشد.

سنسور سیم داغ یک سیم بسیار نازک است که به دو پایه متصل و برای اندازه‌گیری جریان هوا و سایر گازها، قابل استفاده می‌باشد. سنسورهای سیم داغ پاسخ فرکانس بالایی نسبت به تغییرات جریان سیال داشته، ولی استحکام مکانیکی آنها محدود می‌باشد. همچنین با توجه به قطر کم آنها نسبت به ذرات موجود در جریان، بسیار حساس می‌باشند. سنسور پراب سیم داغ را می‌توان به دو دسته بدون روکش و روکش‌دار تقسیم‌بندی نمود. سنسور بدون روکش متشکل از سیم تنگستن با قطر حدود ۵ میکرومتر و طول ۱/۲۵ میلی‌متر می‌باشد که با لایه‌ای از پلاتین، پوشش داده شده و

مستقیماً به دو سر پایه‌ها جوش داده می‌شود (شکل (۴-۶)). باید توجه داشت که اثر تداخلی پایه‌ها، دقت اندازه‌گیریهای شدت اغتشاشات در این پرابها را کاهش می‌دهد، لذا کاربرد این سنسورها برای اندازه‌گیری در جریان یک بعدی و یا دو بعدی با شدت اغتشاشات حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد مناسب است.

سنسور روکش‌دار از سیم تنگستن با قطر ۵ میکرومتر و طول ۳ میلیمتر تشکیل شده که با لایه‌ای از پلاتین به ضخامت ۰/۱ میکرومتر پوشش داده می‌شود. قسمت فعال سیم که طولی حدود ۱/۲۵ میلیمتر دارد در وسط سنسور قرار دارد (شکل (۴-۶)). این پرابها برای اندازه‌گیری در شدت اغتشاشات بالا طراحی شده است. بعلت اینکه قسمت فعال سنسور از پایه‌ها فاصله دارد، اثرات تداخلی پایه‌ها در این سنسورها بسیار کمتر و در نهایت، دقت اندازه‌گیری در اغتشاشات بالا، افزایش خواهد یافت. با استفاده از این پرابها می‌توان شدت اغتشاشات را تا حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد اندازه‌گیری نمود.



شکل (۴-۶): پرابهایی با سنسور سیمی (روکش دار و بدون روکش)

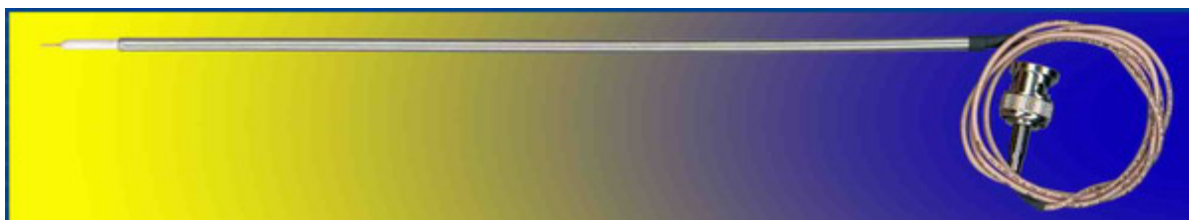
سنسور سیم داغ می‌تواند از جنس تنگستن، پلاتین، آلیاژ پلاتین-رودیم با نسبت ۹۰-۱۰ و یا آلیاژ

پلاتین-ایریدیم با نسبت ۸۰-۲۰ ساخته شود.

شکل (۴-۷) پراب استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. این پراب بدون روکش و یک بعدی

بوده و طول پایه‌های آن ۶ میلیمتر می‌باشد. سیم استفاده شده در این پراب دارای طول ۱/۲۵

میلیمتر و قطر ۵ میکرومتر می‌باشد.



شکل (۴-۷): پراب یک بعدی استفاده شده در این تحقیق

۴-۲-۷) تطبیق دهنده سیگنال

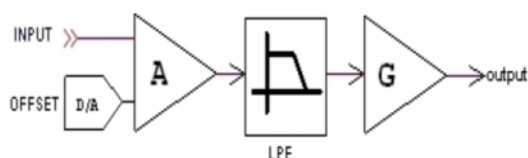
سیگنال خروجی مدار الکترونیکی دما ثابت به صورت ولتاژ است و می‌توان آن را از طریق کارت DAQ به

رایانه ارسال نمود. تغییرات ولتاژ نسبت به سرعت جریان سیال به ویژه در سرعت‌های بالا کم است، به

صورتی که ارسال داده‌ها به طور هم‌زمان به رایانه به درستی میسر نبوده و نمی‌توان در سرعت ۲۰ متر بر

ثانیه، شدت اغتشاش‌های کمتر از ۰/۲ درصد را اندازه‌گیری نمود. برای آنکه سیگنال خروجی مدار

الکترونیکی دما ثابت، بدون مشکل از طریق کارت DAQ به رایانه ارسال شود و همچنین نویزهای الکترونیکی سیگنال خروجی حذف و تا حد ممکن کاهش یابد، نیاز به واحد تطبیق‌دهنده سیگنال است. مطابق شکل (۸-۴) واحد تطبیق‌دهنده سیگنال از مدار آفست، فیلتر پائین‌گذر و تقویت‌کننده تشکیل شده است. مدار آفست، ولتاژ منفی ایجاد نموده که با ولتاژ خروجی از مدار الکترونیکی دما جمع شده، سپس ولتاژ آفست داده شده از فیلتر پایین‌گذر عبور می‌کند. معمولاً با توجه به اندازه فرکانس قطع، فیلتر پایین‌گذر انتخاب می‌شود.



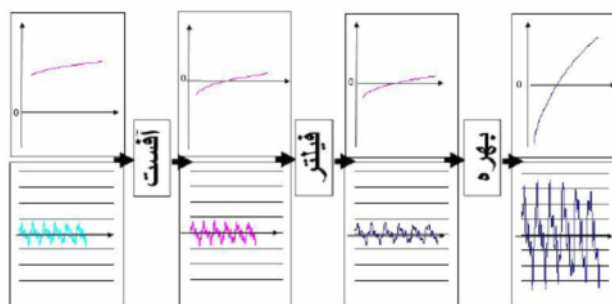
شکل (۸-۴): مدار شماتیک تطبیق‌دهنده سیگنال

با استفاده از فیلتر پایین‌گذر، نویزها و سیگنالهای بالاتر از فرکانس قطع حذف و یا خیلی کوچک می‌شوند. بنابراین در هنگام کار باید دقت داشت که اندازه فرکانس قطع طوری انتخاب شود که سیگنالهای مربوط به سرعت لحظه‌ای از آن حذف نشود. پس از فیلتر نمودن سیگنال آفست داده شده، باید سیگنال فوق به طور مناسبی تقویت شده و در بازه ولتاژ ورودی DAQ قرار گیرد. بنابراین ابتدا باید بازه تغییرات سرعت جریان سیال و یا ولتاژ خروجی از مدار الکترونیکی دما ثابت را مشخص کرده، سپس اندازه مناسب آفست و بهره را تعیین نمود.

شکل (۴-۹) منحنی کالیبراسیون و ولتاژ خروجی قسمتهای مختلف مدار تطبیق‌دهنده را به صورت نمونه

نشان می‌دهد. در این مثال منحنی کالیبراسیون دستگاه جریان‌سنج سیم داغ در بازه ۵ تا ۲۵ متر بر ثانیه

دارای ولتاژ متناظر $1/3$ تا $1/8$ ولت می‌باشد.



شکل (۴-۹): منحنی کالیبراسیون و ولتاژ خروجی قسمتهای مختلف واحد تطبیق‌دهنده سیگنال

۴-۲-۸ جمع آوری و دریافت داده‌ها

ولتاژ خروجی از طریق مدار الکترونیکی دما ثابت و یا واحد تطبیق‌دهنده ولتاژ از طریق کارت DAQ،

شکل (۴-۱۰) و یا درگاه سریال، به رایانه ارسال می‌شود و با استفاده از نرم‌افزار، ولتاژهای مربوطه به

صورت کمیتهای فیزیکی پردازش و تحلیل می‌شوند. برای ارتباط با رایانه و ارسال داده از طریق کارت

DAQ و یا درگاه سریال باید نوع ولتاژ، مقدار ولتاژ و تعداد آنها را بررسی نمود.



شکل (۱۰-۴): نمونه‌هایی از کارت DAQ

همانگونه که بیان شد، دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، قادر به اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال با دقت بالا و پاسخ فرکانسی بالاتر از ۵۰ کیلو هرتز است، بنابراین باید ولتاژ خروجی مدار الکترونیکی دما ثابت و یا واحد تطبیق‌دهنده ولتاژ که در حوزه زمان می‌باشند را به صورت دیجیتال تبدیل و به رایانه ارسال نمود.

۹-۲-۴) ارتباط از طریق کارت DAQ

با استفاده از کارت DAQ، ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم داغ که به صورت آنالوگ می‌باشد به دیجیتال تبدیل و سپس به رایانه ارسال می‌شود. کارت DAQ که توسط شرکت‌های مختلف ساخته می‌شود، به راحتی قابل تهیه است. قیمت کارتهای DAQ مختلف بوده و انتخاب مناسب آن با هزینه کمتر مهم است. به طور کلی تعداد کانالهای ورودی و خروجی، نرخ نمونه‌برداری و دقت اندازه‌گیری در قیمت کارت DAQ تأثیرگذار است.

تعداد کانالهای ورودی کارت DAQ با توجه به تعداد دستگاه جریان‌سنج سیم داغ مورد استفاده در آزمایشها، مشخص می‌شوند. معمولاً هر دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، نیاز به دو کانال کارت DAQ دارد که یکی از آنها خروجی مدار الکترونیکی CTA و دیگری خروجی واحد تطبیق‌دهنده سیگنال را به رایانه ارسال می‌نماید. همچنین یک کانال ورودی برای اندازه‌گیری دما و یک کانال ورودی دیگر برای خروجی

مبدل الکترونیکی فشار برای اندازه‌گیری سرعت متوسط در هنگام کالیبراسیون مورد نیاز است. اکثر کارتهای DAQ دارای حداقل ۱۶ کانال ورودی است که این تعداد برای ۷ دستگاه جریان‌سنج سیم داغ کافیت.

۱۰-۲-۴) کالیبراسیون استاتیکی

قبل از انجام هر آزمایشی، دستگاه اندازه‌گیر بایستی کالیبره شود. کالیبراسیون یک دستگاه، به منظور زیر انجام می‌شود:

۱- ایجاد مقادیر مرجع و ایجاد رابطه بین خروجی یک دستگاه اندازه‌گیر با کمیت‌های اندازه‌گیری شده.

۲- حصول اطمینان از صحت مقادیر اندازه‌گیری شده در هنگام آزمایش.

۳- تعیین دقت دستگاه موردنظر و عدم قطعیت‌های مربوط به دستگاه اندازه‌گیر و شرایط محیط اندازه‌گیری.

همانطور که قبلاً بیان شد، خروجی یک دستگاه جریان‌سنج سیم داغ به صورت ولتاژ می‌باشد بطوریکه هر مقدار ولتاژ متناظر با یک سرعت معین جریان می‌باشد و می‌توان بین ولتاژ و سرعت رابطه‌ای یک به یک برقرار کرد.

به طور کلی هدف از انجام کالیبراسیون در دستگاه جریان‌سنج سیم داغ تعیین رابطه بین سرعت و ولتاژ به صورت $E = F(U)$ می‌باشد، که E ولتاژ خروجی جریان‌سنج و U سرعت متوسط جریان است. از

آنجائیکه دستگاه جریان سنج دارای دقت بسیار بالایی بوده و کوچکترین تغییری در شرایط جریان، نحوه قرارگیری پراب، آلودگی محیط اندازه گیری و ... می تواند بر روی مقدار ولتاژ خروجی آن تأثیر بگذارد، لذا کالیبراسیون قبل از انجام هر آزمایشی ضروری به نظر می رسد.

در تعیین رابطه میان ولتاژ و سرعت در مرحله کالیبراسیون دستگاه جریان سنج، نیاز به سرعت معلوم و مشخصی داریم تا ولتاژ خروجی متناظر با این سرعت اندازه گیری شود. این سرعت مرجع یا U_R نامیده می شود. همچنین این جریان باید دارای شدت توربولانسی کمتر از ۰/۵ درصد باشد. جهت ایجاد چنین سرعت مشخصی و به طور کلی برای تعیین رابطه میان سرعت و ولتاژ خروجی از دستگاه جریان سنج، از روش فیت کردن داده ها و دستگاه های کالیبراسیون استفاده می شود.

۱۱-۲-۴) پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ

همانگونه که قبلاً بیان شد، یکی از مزیت های قابل توجه دستگاه جریان سنج سیم داغ، اندازه گیری سرعت لحظه ای و در نتیجه اغتشاش های سرعت جریان می باشد. فرکانس اغتشاشات سرعت جریان سیال دارای بازه گسترده ای بوده و بسته به عدد رینولدز و نوع جریان سیال از چند هرتز تا ده ها کیلو هرتز می تواند تغییر کند. بنابراین برای اندازه گیری صحیح اغتشاش های سرعت جریان، دستگاه جریان سنج سیم داغ باید قادر به اندازه گیری سرعت لحظه ای با فرکانس بالا باشد. اغتشاش های سرعت سیال را می توان ترکیبی از موجهای سینوسی با فرکانسها و دامنه های متفاوت دانست.

خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ به صورت ولتاژ است که این ولتاژ با توجه به معادله کالیبراسیون، سرعت جریان سیال را مشخص می‌کند. برای اندازه‌گیری صحیح اغتشاشهای سرعت جریان سیال، دستگاه جریان سنج سیم داغ باید دارای سه ویژگی باشد:

۱- فرکانس ولتاژ خروجی دستگاه برابر فرکانس اغتشاشهای سرعت جریان سیال باشد.

۲- نسبت دامنه خروجی دستگاه به دامنه ورودی اغتشاشهای سرعت جریان سیال برای تمام فرکانسها یکسان باشد.

۳- اختلاف فاز ایجاد شده میان فرکانس خروجی دستگاه و ورودی اغتشاشهای سرعت جریان سیال برای تمام فرکانسها تقریباً یکسان باشد.

لازم به تذکر است که قابلیت اغتشاشهای سرعت جریان سیال با استفاده از دستگاه جریان سنج سیم داغ، تا فرکانس مشخصی است و فراتر از این فرکانس، نسبت دامنه ورودی اغتشاشهای سرعت جریان سیال به دامنه ولتاژ خروجی دستگاه کاهش یافته و اختلاف فاز آنها نیز به شدت تغییر می‌کند، بنابراین دستگاه جریان سنج سیم داغ قادر به اندازه‌گیری صحیح اغتشاشهای سرعت جریان سیال با فرکانس بالاتر از آن نیست. این فرکانس را فرکانس قطع می‌نامند.

۳-۴) تجزیه و تحلیل سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده

پس از اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال نیاز به تجزیه و تحلیل آن می‌باشد که این امر به دو صورت زمانی و آماری انجام می‌شود.

در تجزیه و تحلیل زمانی، سرعت لحظه‌ای جریان سیال را می‌توان در حوزه زمان و فرکانس مورد بررسی قرار داد. در حوزه زمان، نمایش سرعت لحظه‌ای به صورت اسیلوگرام است که با استفاده از اسیلوگرام سرعت جریان سیال، می‌توان تغییرات سرعت لحظه‌ای جریان سیال را نسبت به زمان بررسی کرد. به منظور بررسی دقیق سرعت لحظه‌ای، بهتر است که آن را در حوزه فرکانس بررسی نمود. سپس مقدار انرژی اغتشاشهای سرعت جریان سیال را در فرکانس خاص مشخص نموده و کیفیت جریان سیال را تعیین نمود.

۴-۴) کالیبراسیون و آماده‌سازی سیستم داده‌برداری

قبل از شروع آزمایشها و انجام مرحله داده‌برداری ابتدا باید فعالیتهای زیر انجام می‌شدند:

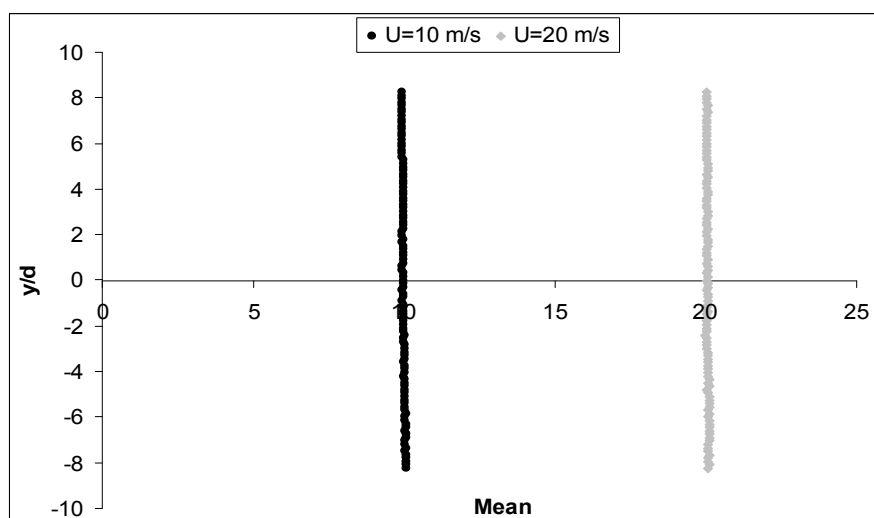
۱. کالیبره نمودن تونل باد

۲. انجام کالیبراسیون پراب سیم داغ در دامنه سرعتهای آزمایش

در ادامه به شرح این فعالیتهای می‌پردازیم.

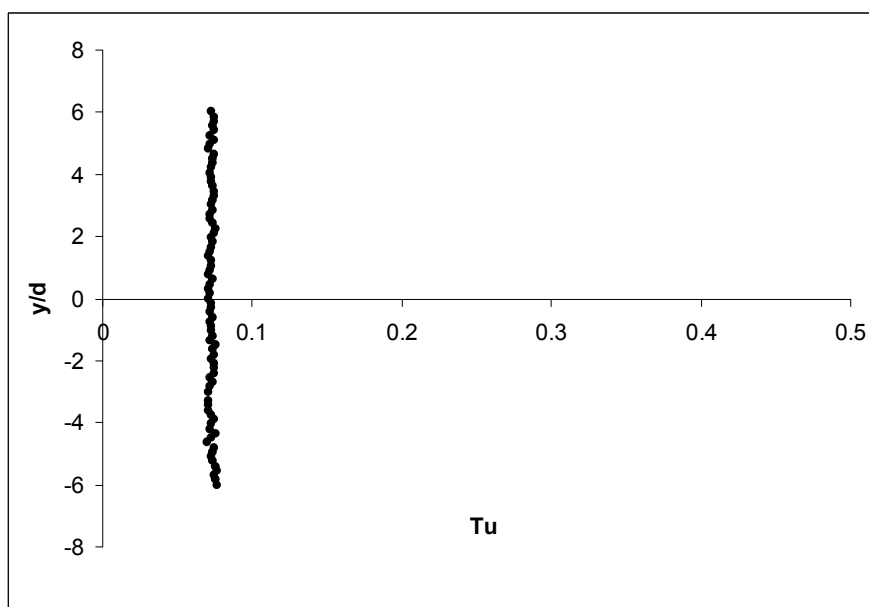
۴-۴-۱) کالیبره نمودن تونل باد

برای اطمینان از صحت عملکرد تونل و ایجاد الگوی مناسب جریان در مقطع آزمون، لازم است تا آزمایشهای کالیبراسیون تونل انجام شود. برای این منظور ابتدا باید با اندازه‌گیری سرعت جریان آزاد در راستاهای طولی و عرضی مقطع آزمون، به کمک سنسور سیم داغ، از یکنواخت بودن پروفیل سرعت تونل اطمینان حاصل کرد. نمودار سرعت متوسط برای سرعت ۱۰ و ۲۰ متر بر ثانیه در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۱): نمودار تغییرات سرعت متوسط در تونل باد برای سرعتهای ورودی ۱۰ و ۲۰ متر بر ثانیه

آزمایش دیگری که باید انجام شود، اندازه‌گیری شدت توربولانسی جریان آزاد در سرعتهای مختلف تونل می‌باشد (شکل (۴-۱۲)). با توجه به نمودار شدت اغتشاشی محفظه آزمایش تونل باد، شدت توربولانسی در محل داده‌برداری حدود ۰/۰۸ درصد است.

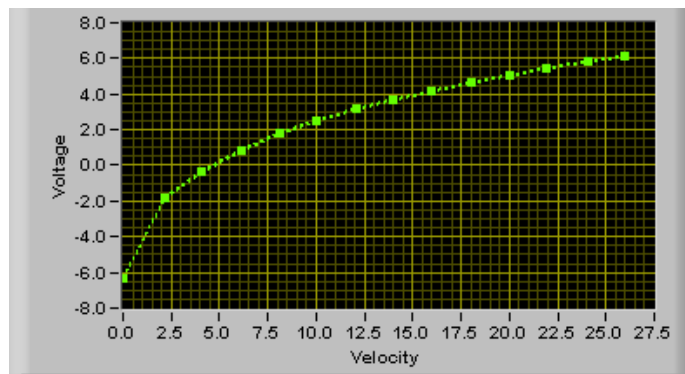


شکل (۴-۱۲): نمودار تغییرات درصد شدت اغتشاشات در تونل باد در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

۲-۴-۴) کالیبراسیون پراب سیم داغ

قبل از انجام آزمایشها، پراب سیم داغ انتخاب شده برای داده‌برداری می‌بایست کالیبره شود. دامنه سرعت‌های کالیبراسیون بین ۰ تا ۲۶ متر بر ثانیه انجام شده است. برای کالیبراسیون پراب سیم داغ از یک لوله پیتوت که به مبدل الکترونیکی فشار متصل است، استفاده می‌شود. در کلیه مراحل فوق، ولتاژهای خروجی از دستگاه CTA و سرعت‌های معادل آنها که از لوله پیتوت بدست می‌آید اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند. بدین ترتیب منحنی کالیبراسیون پراب سیم داغ به دست می‌آید که نمونه‌ای از آن در شکل (۴-۱۳) مشاهده می‌شود.

پس از بدست آوردن نقاط مورد نظر برای کالیبراسیون پراب سیم داغ، باید از نقاط بدست آمده منحنی سرعت رسم شود.

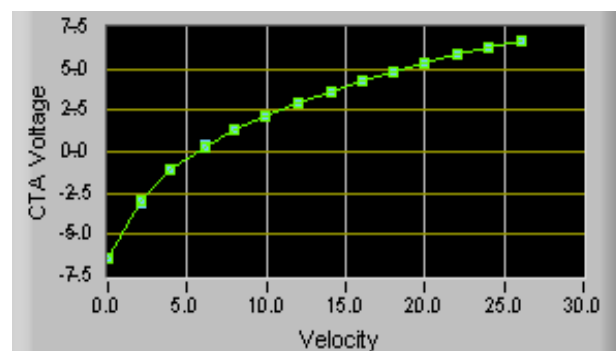


شکل (۴-۱۳): منحنی کالیبراسیون سرعت برای یک پراب سیم داغ

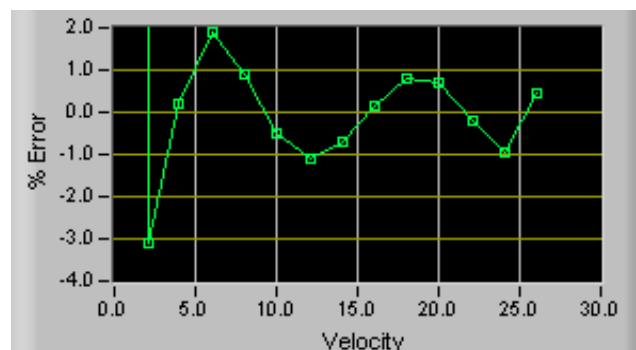
در این مرحله با توجه به نقاط بدست آمده منحنی سرعتی را می‌توان از درجه ۱ تا ۶ رسم کرد که انتخاب

درجه منحنی با توجه به داشتن حداقل خطا انتخاب می‌شود. در شکل (۴-۱۴) منحنی نهائی کالیبراسیون

و در شکل (۴-۱۵) نمودار خطا برای این منحنی از درجه ۵ در سرعت‌های مختلف رسم شده است.



شکل (۴-۱۴): منحنی نهائی کالیبراسیون



شکل (۴-۱۵): نمودار خطا در سرعت‌های مختلف

فصل پنجم

تئوری مسئله و معادلات حاکم

۵-۱) مقدمه

محاسبه پارامترهای جریان و نیروهای وارد شده از طرف سیال به جسم غوطه‌ور، جزء مسائل اصلی مکانیک سیالات بشمار می‌آید. در این میان روشهای متعددی برای حل مسائل سیالات و دستیابی به پارامترهای مجهول در این زمینه ابداع شده است. با وجود پیشرفت چشمگیر روشهای تحلیلی، اما اینگونه روشها هنوز قادر به حل بعضی از مسائل موجود نبوده و ناچار به استفاده از روشهای عددی و تجربی می‌باشیم.

در ابتدای این فصل به بیان رژیمهای جریان در پشت سیلندر پرداخته و سپس معادلات حاکم بر جریان مغشوش و کمیت‌های مؤثر در تحلیل این جریانها را معرفی می‌کنیم. در ادامه روشها و روابط تحلیلی موجود برای بدست آوردن ضرایب برآ و پسای جسم غوطه‌ور در سیال را بیان نموده و علل ناتوانی آنها را در تحلیل اینگونه مسائل بررسی می‌کنیم و در انتهای فصل به توضیح روشهای و روابط تجربی موجود پرداخته، همچنین نحوه محاسبه ضریب پسا با استفاده از روشهای تجربی را بیان می‌نمائیم.

۵-۲) رژیمهای دنباله

با وجود این حقیقت که ناپایداری دو و سه بعدی گردابه، چندین سال است که به یک موضوع جالب برای علوم مهندسی تبدیل شده است ولی هنوز فهمیدن درست جریان پشت اجسام حجیم، یک چالش بزرگ بشمار می‌آید. دنباله پشت اجسام حجیم به علت برهم‌کنش سه لایه برشی بسیار پیچیده می‌باشند. این

لایه‌ها شامل لایه مرزی، لایه برشی جدا شده است از سطح جسم و یک دنباله می‌باشد. بر طبق تحقیق منتشر شده از روشکو [۴۸]، هر چند علم ما در مورد جریان بر روی اجسام حجیم گسترش پیدا کرده است، ولی در حوزه توصیفی و تجربی نیز ما با مشکلات زیادی روبرو هستیم. در سالهای اخیر روشهای آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی مستقیم، درک خیلی خوبی در این زمینه داده‌اند. در مورد دنباله سیلندر دایره‌ای به تنهایی تاکنون صدها مقاله منتشر شده است که بخشی از آن مربوط به اهمیت این موضوع در علوم مهندسی است و بخش دیگر مربوط به ساده‌سازی روشهای عددی و یا راه‌اندازی بهتر آزمایشها می‌باشد. در ادامه به معرفی رژیمهای مختلف جریان در پشت استوانه در اعداد رینولدز متفاوت می‌پردازیم. اولین تعریف از رژیمهای جریان بر پایه اندازه‌گیریهای سرعت لحظه‌ای و فرکانس گردابه‌ها، توسط روشکو [۴۹] ارائه شد. او دریافت که رژیم لایه‌ای و پایدار گردابه‌ها در بازه $40 < Re < 150$ ، رژیم انتقالی گردابه‌ها در بازه $150 < Re < 300$ ، و رژیم بی‌قاعده و نامنظم گردابه‌ها در بازه $300 < Re < 10000$ رخ می‌دهد. رژیمهای مشابه‌ای نیز توسط بلور [۵۰] در سال ۱۹۶۴ انتشار یافت.

اگر بخواهیم بطور کلی رژیم دنباله پشت سیلندر را توصیف کنیم در رینولدزهای پائین جریان حول استوانه خزشی بوده و هیچ جدائی و گردابه نداریم. با افزایش عدد رینولدز لایه مرزی روی دنباله ضخیم‌تر شده و حرکت معکوس جریان باعث تشکیل گردابه می‌شود. گردابه‌های تشکیل شده در مدت کوتاهی از جسم جدا شده و در پشت سیلندر حرکت می‌کند. در فواصل دورتر از جسم می‌توان نمونه‌های منظمی از

گردابه‌ها را ملاحظه نمود که متناوباً در جهت عقربه‌های ساعت و خلاف عقربه‌های ساعت حرکت می‌کنند

که به آن جریان گردابه کارمن گفته می‌شود. در ادامه به معرفی بیشتر این رژیم‌ها می‌پردازیم

رژیم A: رژیم پایدار لایه‌ای ($Re < 49$)

در اعداد رینولدز کوچکتر از یک، جریان کاملاً خزشی بوده و هیچگونه جدائی و تشکیل گردابه مشاهده

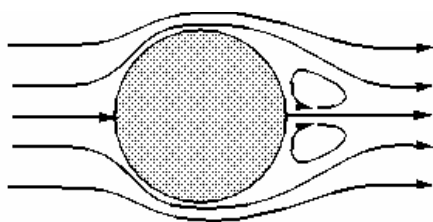
نمی‌گردد (شکل (۵-۱))، ولی با افزایش عدد رینولدز، گردابه‌ها در پشت سیلندر تشکیل می‌شوند. در اعداد

رینولدز کمتر از ۴۹ دنباله تشکیل شده پشت سیلندر پایدار خواهد بود و گردابه‌های متقارنی در هر طرف

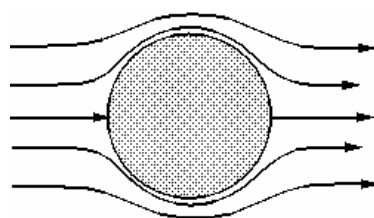
دنباله تشکیل می‌شود (شکل (۵-۲)). در این ناحیه با افزایش عدد رینولدز طول گردابه‌ها رشد کرد.

محققانی مانند تاندا [۲۶]، دنیس و چانک [۵۱]، کونتانکیو و بویارد [۵۲] و جرارد [۱۶] در این ناحیه از

اعداد رینولدز بصورت آزمایشگاهی تحقیقاتی انجام داده‌اند.



شکل (۵-۲): تشکیل دنباله‌های متقارن در $Re < 49$



شکل (۵-۱): جریان خزشی در $Re < 1$

رژیم A-B: تشکیل ورتکس شیدینگهای لایه‌ای ($190 < Re < 49$)

در نزدیکی عدد رینولدز ۴۹ ناپایداری دنباله شروع می‌شود و با افزایش عدد رینولدز ناپایداری و تنشهای

رینولدز افزایش و طول تشکیل گردابه کاهش می‌یابد. حد بالایی ناحیه گردابه‌های لایه‌ای از عدد رینولدز

۱۴۰ تا ۱۹۴ متغیر است. بلور [۵۰] با انجام آزمایشهای مختلف دریافت که مقدار عدد رینولدز بحرانی ثابت و مشخص نمی‌باشد و وابستگی زیادی به مقدار آشفتگی جریان آزاد دارد. روشکو [۴۹] و تریتون [۳۰] مقدار رینولدز بحرانی را ۱۵۰، ژانگ و همکارانش [۵۳] این مقدار را ۱۶۰ و ویلیامسون [۵۴] مقدار رینولدز بحرانی را ۱۷۸ بدست آوردند. علاوه بر تأثیر مقدار آشفتگی جریان آزاد بر روی مقدار رینولدز بحرانی، هامچه و غریب [۵۵] نشان دادند که شرایط صفحات انتهایی دیواره تونل باد نیز در این مقدار تأثیر دارد.

رژیم B-C: ناحیه انتقالی دنباله ($Re \sim 190-260$)

در این ناحیه با افزایش عدد رینولدز، دو ناپیوستگی در دنباله مشاهده می‌شود. اولین ناپیوستگی در عدد رینولدز ۱۸۰ تا ۱۹۴ (بسته به شرایط آزمایش) رخ می‌دهد که این را ناپایداری حالت A می‌نامیم. در این حالت گردابه‌های متناوبی که از سطح سیلندر خارج می‌شوند، دارای طول موجی حدود ۳-۴ برابر قطر سیلندر هستند. برای بدست آوردن اطلاعات بیشتر در این ناحیه از گردابه، می‌توان به تحقیق ژانگ و همکارانش [۵۳] رجوع کرد. دومین ناپیوستگی (حالت B) در این ناحیه، در عدد رینولدز ۲۳۰ تا ۲۵۰ اتفاق می‌افتد که گردابه‌های متناوب تشکیل شده در پشت سیلندر با طول موجی برابر قطر سیلندر از سطح سیلندر خارج می‌شوند.

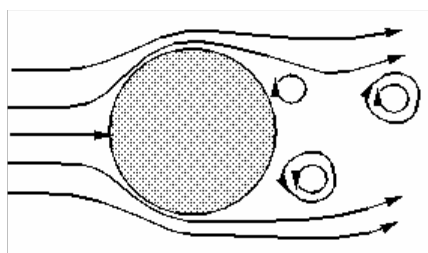
رژیم C-D: افزایش بی‌نظمی در دنباله به صورت سه‌بعدی و در مقیاس کوچک

در نزدیکی عدد رینولدز ۲۶۰، آشفتگیهایی در مقیاس کوچک در دنباله سیلندر مشاهده می‌کنیم

(شکل (۳-۵)). در این ناحیه با افزایش عدد رینولدز میزان بی‌نظمی افزایش و تنشهای رینولدز دوبعدی

کاهش می‌یابد. برای بدست آوردن اطلاعات بیشتر می‌توان به تحقیقات ویلیامسن [۵۶] و راکول و یونال

[۵۷] مراجعه کرد.



شکل (۳-۵): تشکیل ورتکس شیدینگها

رژیم D-E: ناحیه انتقالی لایه برشی ($1000 < Re < 200000$)

در این ناحیه تنشهای دوبعدی رینولدز افزایش و عدد استروهال، بتدریج کاهش می‌یابد. با افزایش عدد

رینولدز نقطه جدایی به سمت بالادست جریان متمایل می‌شود. همچنین در این ناحیه با افزایش عدد

رینولدز ضریب پسا تا حدودی افزایش می‌یابد. به علت تحقیقات ابتدایی و مهمی که شیلر و لینکه [۵۸]

در سال ۱۹۳۳ در این ناحیه انجام دادند، این ناحیه را ناحیه شیلر-لینکه نیز می‌نامند. بجز آنها روشکو

[۴۸]، راکول و یونال [۵۷]، لین [۵۸] و بلور [۵۰] نیز در این ناحیه تحقیقهایی را انجام داده‌اند.

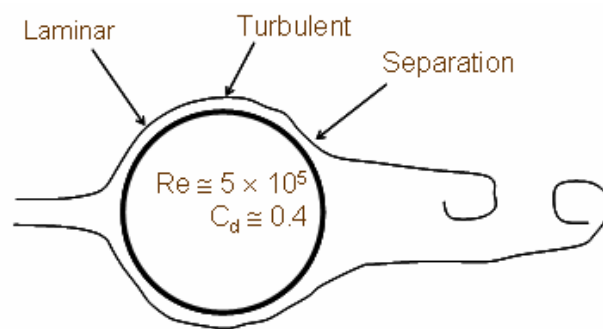
رژیم E-G: ناحیه انتقالی بحرانی ($Re=200000$)

در این ناحیه ضریب پسا بشدت کاهش می‌یابد، که این پدیده به علت آشفته شدن جریان عبوری از سیلندر و انتقال نقطه جدایی به زاویه ۱۴۰ درجه در پشت سیلندر می‌باشد.

رژیم G-H: ناحیه فوق بحرانی ($Re=500000$)

در عدد رینولدز ۵۰۰۰۰۰ لایه مرزی روی سیلندر در ابتدا آرام بوده اما در زاویه حدود ۹۰ درجه لایه مرزی روی سیلندر مغشوش می‌شود که این اتفاق باعث پائین آمدن ضریب پسا تا حدود ۰/۴ می‌شود

(شکل (۵-۴)).



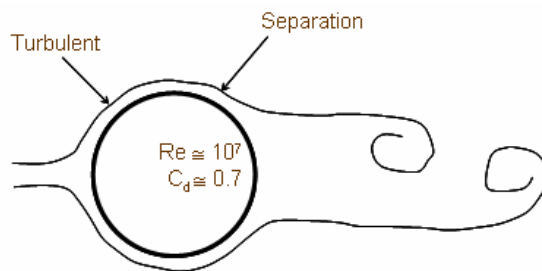
شکل (۵-۴): رژیم دنباله در حالت فوق بحرانی

رژیم H-J: ناحیه فرا بحرانی ($Re=1000000$)

با افزایش عدد رینولدز (بسته به رژیمهای مختلف دنباله) سه حالت گذرا داریم : ناحیه انتقالی دنباله، ناحیه انتقالی لایه برشی و ناحیه انتقالی لایه مرزی. با افزایش عدد رینولدز لایه مرزی روی سیلندر درهم شده و پس از آن، دنباله کاملاً آشفته می‌شود. در این ناحیه ما انتظار گردابه‌های منطقی را نخواهیم داشت اگر چه در سال ۱۹۶۱ روشکو [۵۹] توانست در این ناحیه برای گردابه‌های متناوب خارج شونده از سیلندر

نتایج قابل قبولی ارائه دهد. در این ناحیه پسا نسبت به رژیم قبلی افزایش پیدا کرده و مقدار ضریب پسا

۰/۷ می شود همچنین نقطه جدایی به سمت بالا دست جریان متمایل می شود (شکل (۵-۵)).



شکل (۵-۵): رژیم دنباله در حالت فرا بحرانی

۵-۳) معادلات حاکم بر جریان مغشوش [۶۰]

در جریان درهم به علت نوسانات اتفاقی و نامنظم سرعت و فشار، حل دقیق معادلات ناویر-استوکس حتی

با روشهای عددی کار پیچیده و دشواری می باشد. از این نظر بهتر است هر کمیت را به صورت مجموع یک

متوسط زمانی و یک جزء نوسانی بیان نمائیم. به عنوان مثال سرعت لحظه ای سیال در سه جهت را می توان

به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \end{aligned} \quad (۵-۱)$$

که در این روابط، پارامترهای که به صورت $\bar{x}$ نشان داده شده است، میانگین زمانی آن کمیت و قسمتی که

به صورت x' نشان داده شده است، جزء نوسانی آن کمیت در زمان موردنظر می باشد. بدین صورت سرعت

متوسط زمانی و مؤلفه های نوسانی را می توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\bar{u} = u_{mean} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt \quad \text{یا} \quad \bar{u} = \frac{1}{N} \sum_1^N u_{(N)} \quad (5-2)$$

$$u' = u - \bar{u}$$

حد انتگرال گیری T ، مدت زمانی است که از دوره تناوب نوسانات بزرگتر است و مقدار آن به نوع جریان

بستگی دارد. با توجه به اینکه نوسانات سرعت در طول دوره تناوب خود تکرار می‌شوند، پس اگر از جزء

نوسانی سرعت متوسط گیری نمائیم خواهیم داشت:

$$\overline{u'} = \frac{1}{T} \int_0^T (u - \bar{u}) dt = \bar{u} - \bar{u} = 0 \quad (5-3)$$

به منظور بررسی شدت اغتشاشات جریان درهم، کمیتی به صورت زیر با عنوان متوسط مربعات جزء نوسانی

تعریف می‌نماییم:

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{T} \int_0^T (u - \bar{u})^2 dt \quad \text{یا} \quad \overline{u'^2} = \frac{1}{N-1} \sum_1^N (u_{(N)} - \bar{u})^2 \quad (5-4)$$

بعد کمیت فوق به صورت توان دوم سرعت یا $(ms^{-1})^2$ می‌باشد و به منظور تبدیل آن به پارامتر هم‌بعد با

سرعت از آن جذر می‌گیریم. جذر کمیت فوق یا به عبارت دیگر جذر متوسط مربعات نوسانات سرعت،

مشخص کننده شدت اغتشاشات جریان سیال است و با u_{rms} نشان داده می‌شود:

$$u_{rms} = \sqrt{\overline{u'^2}} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T (u - \bar{u})^2 dt \right)^{0.5} \quad \text{یا} \quad u_{rms} = \left(\frac{1}{N-1} \sum_1^N (u_{(N)} - \bar{u})^2 \right)^{0.5} \quad (5-5)$$

در تمامی موارد، متوسط جزء نوسانی صفر است اما متوسط مربعات آن صفر نیست. مقدار بی‌بعد عبارت

u_{rms} را به صورت درصد بیان می‌کنند و بیانگر درصد شدت اغتشاشات جریان سیال می‌باشد.

$$Tu = \frac{u_{rms}}{\bar{u}} \% \quad (5-6)$$

اگر در معادله پیوستگی برای جریان تراکم ناپذیر، هر یک از سرعتها را به صورت مجموع سرعت متوسط و

سرعت نوسانی بنویسیم، پس از متوسط گیری و ساده کردن خواهیم داشت:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5-7)$$

$$\boxed{\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0} \quad (5-8)$$

همین عمل را می توانیم برای معادله مومنتوم نیز انجام دهیم بدین ترتیب که کمیتها را به صورت مجموع

مقدار متوسط و جزء نوسانی آنها بنویسیم و سپس از معادله متوسط گیری نماییم:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial}{\partial x}(p + \gamma h) + \mu \Delta u \quad (5-9)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\bar{p} + \gamma \bar{h}) + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho \overline{u'^2}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \overline{u'w'}) = \rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (5-10)$$

با تکرار همین عمل برای معادله مومنتوم در جهتهای y و z ، حالتی از معادله مومنتوم برای جریان

درهم که بر حسب مؤلفه های نوسانی و مقدار متوسط سرعت می باشد، بدست می آید. با توجه به معادله

(5-10) درمی یابیم که تأثیر جملات $-\rho \overline{u'^2}$ ، $-\rho \overline{u'v'}$ و $-\rho \overline{u'w'}$ همانند تأثیر تنشهای برشی و لزجی

است. این جملات در حقیقت ترمهای شتاب جابجایی هستند، اما چون در معادلات ریاضی اثرشان مانند

اثر تنش است، آنها را تنشهای رینولدزی می نامند. در جریان درهم تنشهای رینولدزی عامل تبادل

مومنتوم و اختلاط محسوب می شوند و کاملاً بر تنشهای لزجی غلبه دارند. مؤلفه های تنش رینولدزی را

می توان به صورت یک تانسور تنش نیز بیان کرد:

$$\tau_{ij} = \rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

پارامتر مهم دیگری که با استفاده از متوسط مربعات اجزاء نوسانی سرعت تعریف شده و در بررسی پدیده

آشفته‌گی نقش مهمی دارد، انرژی جنبشی آشفته‌گی می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (5-12)$$

روابط بیان شده در این قسمت همگی مربوط به مشخصه‌های آشفته‌گی در رژیم جریان درهم که مؤلفه‌های

نوسانی سرعت بزرگتر شده و اهمیت پیدا می‌کنند، می‌باشد.

۵-۴ ضریب پسا

اثرات پسا در زندگی هر شخصی موجود می‌باشد. هنگامیکه شما در حال رانندگی در شهر هستید در واقع

پسا را تجربه می‌کنید. موتور ماشین شما برای غلبه بر نیروی پسا باید کمی قویتر کار کند. حتی

هنگامیکه شخصی در خیابان مشغول راه رفتن است با پسا روبروست هر چند مقدار این پسا کوچک است.

با قرار گرفتن جسم جامدی در سیال که نسبت به هم در حال حرکت می‌باشند، نیرویی از طرف سیال به

جسم غوطه‌ور وارد می‌شود که شناخت کامل این پدیده و عوامل اثرگذار بر آن و در نهایت محاسبه

نیروهای وارده بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در حالت کلی جهت این نیرو نه در راستای جریان است و نه

در راستای عمود بر آن. بر روی سطح جسم غوطه‌ور در سیال، هم تنش برشی اثر می‌کند و هم تنش

فشاری، که هر دو در ایجاد نیروی وارده به جسم نقش بسزایی دارند. نیروی وارده از سیال به جسم

متحرک، بر اثر کنش دینامیکی سیال و جسم متحرک ایجاد می‌شود و نیروهایی مانند وزن و شناوری در

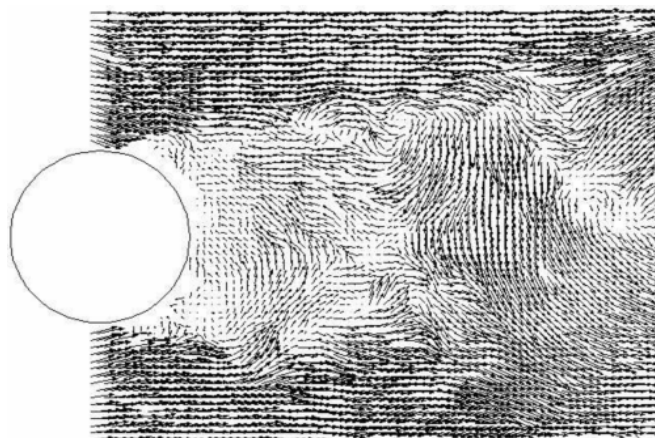
آن دخالتی ندارند. این نیرو را می‌توان به مؤلفه‌هایی در راستای جریان و عمود بر مسیر جریان تجزیه نمود که به مؤلفه در راستای جریان، نیروی پسا یا درگ و مؤلفه عمود بر راستای جریان، نیروی بالابرنده یا برآ (لیفت) گفته می‌شود. نیروهای برآ و پسا خود حاصل نیروهای اصطکاکی و فشاری می‌باشند که نیروی اصطکاکی در اثر ویسکوزیته سیال و نیروهای فشاری در اثر تنش‌های عمودی، وارد می‌شوند. نیروی برآ عمدتاً ناشی از اختلاف فشار در بالا و پایین جسم می‌باشد ولی در ایجاد نیروی پسا علاوه بر گرادیان فشار در جلو و عقب جسم، تنشهای برشی نیز سهم می‌باشند. در واقع نیروی پسا، مؤلفه نیروی مؤثر بر یک جسم است که در راستای جریان اثر می‌کند و به طور کلی این نیرو تابعی از هندسه جسم، سرعت، چگالی و ویسکوزیته سیال می‌باشد. در بین مسائل مربوط به مکانیک سیالات، موارد بسیار کمی وجود دارد که در آنها بتوان نیروی پسا را با استفاده از روابط تحلیلی و بدون استفاده از نتایج آزمایشگاهی محاسبه نمود. در واقع مقدار نیروی پسا، به الگوی جریان در پیرامون جسم وابستگی زیادی دارد که ایجاد لایه مرزی و رشد آن در روی سطح جسم از جمله عوامل تأثیرگذار می‌باشد. متأسفانه در بسیاری از موارد نمی‌توان الگوی جریان و توزیع فشار وارد بر جسم را بطور کامل تعیین نمود و بطور تحلیلی به محاسبه نیروی پسا پرداخت. زیرا در اکثر موارد، وجود گرادیان معکوس فشار، باعث جدایی جریان شده که در این حالت روابط تحلیلی قادر به تعیین نیروهای وارده از سیال به جسم نمی‌باشند. تئوری لایه مرزی، تنها قادر به پیش‌بینی محل جدایش جریان می‌باشد، اما نمی‌تواند بطور دقیق توزیع فشار را در ناحیه جدایش برآورد کند.

گرادیان فشار ایجاد شده بین ناحیه پر فشار جلوی جسم و ناحیه کم فشار پشت جسم باعث ایجاد نیروی پسا زیادی می‌شود که به آن پسای فشاری می‌گویند. این نیرو با مجموع تنشهای برشی روی سطح جسم که در راستای جریان می‌باشد، جمع شده و نیروی پسای کل را بوجود می‌آورد. سهم نسبی پسای اصطکاکی و فشاری در نیروی کل، بستگی به شکل جسم، میزان ناصافی سطوح آن و بخصوص ضخامت جسم دارد. اگر ضخامت جسم ناچیز باشد، یعنی به یک صفحه مسطح تبدیل شود، در این حالت می‌توان کل نیروی پسای وارد آمده به جسم را حاصل از پسای اصطکاکی دانست. زیرا در این حالت خطوط جریان در موازات یکدیگر و بدون جدایش از روی جسم عبور کرده و هیچ گرادیان فشاری در جلو و عقب جسم بوجود نمی‌آید. اما با افزایش ضخامت جسم، سهم پسای فشاری از پسای کل زیاد می‌شود بطوریکه در مورد استوانه که ضخامت جسم با طول آن برابر است، پسای اصطکاکی تنها حدود ۳۰ درصد پسای کل را تشکیل می‌دهد. البته این نسبت به زبری سطح استوانه نیز بستگی دارد. با ادامه این روند، سهم پسای اصطکاکی از پسای کل، کمتر شده بنحوی که می‌توان در مورد اجسامی که هندسه غیرآیرودینامیک داشته و ضخامت آنها نسبت به طولشان زیاد می‌باشد، از نیروی پسای اصطکاکی در مقابل پسای فشاری صرف‌نظر نمود. در اکثر موارد برای محاسبه نیروی پسا بجای استفاده از روشهای تحلیلی از ضریبی که بطور آزمایشگاهی محاسبه می‌شود، استفاده می‌کنند. این ضریب را معمولاً به شکل C_D نشان می‌دهند و در حالت کلی تابعی از پارامترهای بی‌بعد رینولدز، فرود و ویسکوزیته سیال می‌باشد.

نتایج بدست آمده برای ضریب پسا معمولاً برای هندسه‌های مختلف بصورت نمودارهایی بر حسب عدد رینولدز ارائه شده و کاربر به راحتی می‌تواند از آنها استفاده نماید. در اغلب این نمودارها، تابع یکنواخت

نبوده و در مقادیر مختلف رینولدز، رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهد. در محدوده‌ای از رینولدز، نمودار بصورت ناگهانی کاهش شدیدی پیدا می‌کند که این ناحیه معرف انتقال لایه مرزی از رژیم آرام به درهم است و پس از آن در محدوده خاصی، ضریب پسا مستقل از عدد رینولدز و ثابت می‌شود و هرچه شدت درهمی جریان آزاد بیشتر باشد عدد رینولدز انتقال کوچکتر خواهد بود.

در تقسیم‌بندیهای اجسام از لحاظ هندسه، سیلندر دایره‌ای جزء اجسام حجیم بشمار می‌رود (یک جسم حجیم جسمی است که طول بدنه آن در جهت سیال برابر با طول بدنه در جهت عمود بر سیال است) که با توجه به رژیم جریان عبوری از آن و زبری سطح، دارای جدایش سریع و منطقه وسیعی از گردابه‌ها در پشت مدل می‌باشد. در ابتدای برخورد ذرات سیال با سیلندر، ذرات به جسم چسبیده و ذرات بعدی خط جریانهایی همانند هندسه شکل پیدا می‌کنند. تا رسیدن ذرات به محل جدایش که بسته به پارامترهای گفته شده متغییر است، لایه مرزی به سرعت رشد کرده و بعد از آن، به دلیل تغییر در هندسه جسم، سیال از سطح جسم جدا شده و در پشت مدل جریان گردابی بوجود می‌آید. شکل (۵-۶) جریان پشت استوانه را نشان می‌دهد.

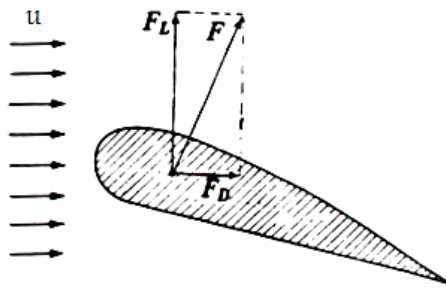


شکل (۵-۶): بردارهای سرعت در عبور از استوانه ثابت

جدایش سیال و ایجاد گردابه‌ها در پشت مدل باعث بوجود آمدن یک میدان فشار منفی در پایین‌دست جریان در مقابل یک ناحیه پر فشار در جلوی مدل می‌شود. این گرادیان فشار ایجاد شده علت اصلی نیروی وارده به جسم در راستای جریان می‌باشد. البته نمی‌توان نیروی مقاوم اصطکاکی را در ایجاد نیروی پسا بی‌تأثیر دانست چرا که وجود لزجت و ایجاد گرادیان سرعت در مرز تماس با جسم، خود عامل به وجود آمدن تنش برشی و در نهایت نیروی مقاومی در خلاف جهت حرکت سیال می‌باشد. ولی از دید کلی مقدار نیروی مقاوم حاصل از تنش برشی در مقابل نیروی مقاوم حاصل از گرادیان فشار سیال ناچیز بوده و در بعضی از موارد قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. علاوه براین، زبری بسیار کم سطوح مدلها نیز در کاهش نیروی مقاوم اصطکاکی سهم بسزایی دارد.

۵-۵) روش تحلیلی محاسبه پسا [۶۰]

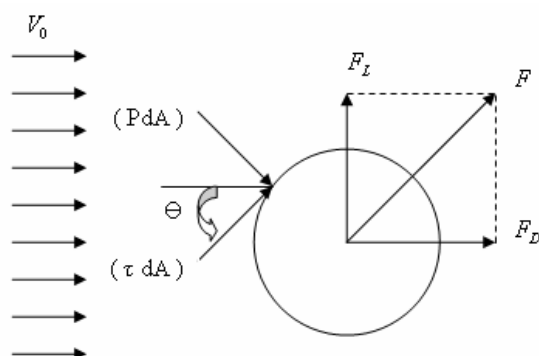
جسمی را با شکل نامعین که در یک سیال غوطه‌ور می‌باشد، در نظر بگیرید. در حالت کلی نیروی وارد از طرف سیال بر جسم نظیر شکل (۷-۵)، زاویه‌ای نسبت به مسیر حرکت جسم خواهد داشت، به طوریکه نیروی مزبور به نیروی پسا در راستای حرکت جسم و نیروی برآ در راستای عمود بر جسم تجزیه خواهد شد.



شکل (۵-۷): نیروهای مقاوم و بالا برنده

نیروی مقاوم (F_D) خود حاصل جمع دو نیروی مقاوم اصطکاکی و فشاری است. نیروی مقاوم اصطکاکی که به F_{D_f} نشان داده می‌شود، از گرانروی سیال و نیروی مقاوم فشاری یا به عبارت دیگر نیروی مقاوم شکلی که آنرا با F_{D_p} نشان می‌دهند، از تنشهای عمودی حاصل می‌شود.

برای محاسبه نیروهای مذکور، جسمی را نظیر شکل (۵-۸) که در جریان سیالی با سرعت V_0 قرار گرفته است، در نظر بگیرید. جزء سطح dA را از جسم جدا کرده و نیروهای وارده از طرف سیال به آنرا مشخص می‌نمائیم. بر هر جزء سطحی مانند dA ، دو نیروی مماس بر سطح τdA و عمود بر سطح PdA وارد می‌شود.



شکل (۵-۸): نیروهای برشی و فشاری از نوع مقاوم و بالا برنده

برای محاسبه نیروهای برآ و پسا می‌توان این نیروها را در دو راستای مسیر جریان و عمود بر مسیر جریان تجزیه نمائیم که بترتیب نیروی مقاوم اصطکاکی f_{D_f} و نیروی مقاوم فشاری f_{D_p} به دست می‌آید که مجموع آنها نیز نیروی مقاوم کل را مشخص می‌کند. بنابراین می‌توان نوشت :

$$F_{D_f} = \int_A \tau dA \cos \theta \quad (5-13)$$

$$F_{D_p} = \int_A p dA \sin \theta \quad (5-14)$$

$$F_D = F_{D_p} + F_{D_f} = \int_A p dA \sin \theta + \int_A \tau dA \cos \theta \quad (5-15)$$

به همین ترتیب نیروی بالا برنده از انتگرال‌گیری مؤلفه‌های نیروهای برشی و فشاری برای تمام سطح A ، در راستای عمود بر مسیر حرکت سیال بدست می‌آید:

$$F_L = \int_A p dA \cos \theta + \int_A \tau dA \sin \theta \quad (5-16)$$

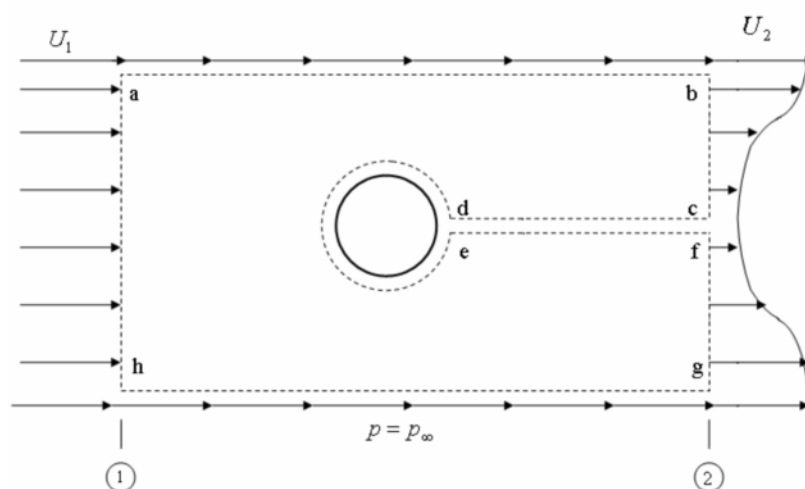
همانطور که در روابط بالا مشاهده می‌نمایید برای محاسبه نیروهای برآ و پسا نیاز به انتگرال‌گیری از میدان فشار و تنش برشی بر روی سطح A می‌باشد که لازمه آن، مشخص بودن میداین سرعت و فشار در اطراف جسم می‌باشد. در برخی از جریانها، بدلیل جدایش سیال در پشت جسم و وجود جریانهای برگشتی، محاسبه سرعت و فشار در آن نواحی با استفاده از روابط تحلیلی میسر نمی‌باشد. زیرا مقدار آنها به عوامل مختلفی از جمله محل تشکیل جریان انتقالی از لایه‌ای به متلاطم در لایه مرزی و همچنین محل جدایی جریان بستگی دارد. بدین صورت روابط بدست آمده تنها در زمانی کاربرد دارد که سرعت و فشار سیال در اطراف جسم مشخص باشد. در مواردیکه دستیابی به میدانهای سرعت و فشار در اطراف جسم میسر نمی‌باشد ناچار به استفاده از روشهای عددی و تجربی برای محاسبه پارامترهای مجهول می‌باشیم.

۵-۶) روش آزمایشگاهی محاسبه ضریب پسا

برای محاسبه ضرایب آیرودینامیکی اجسام با استفاده از روشهای تجربی، حجم کنترلی مطابق شکل (۴)-۵

(۵) در اطراف جسم فرض می‌نماییم. حجم کنترل را طوری انتخاب می‌کنیم که شامل مرز تماس سیال با

جسم باشد. مقاطع ورودی و خروجی حجم کنترل را با خطچین نشان می‌دهیم:



شکل (۴)-۵) حجم کنترل فرضی برای محاسبه نیروهای وارده به جسم

معادله زیر، به معادله انتقال رینولدز موسوم است و داریم :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \eta \rho dV + \int_{cs} \eta \rho v \cdot dA \quad (۵-۱۷)$$

که در آن N مقدار خاصیتی از سیال در لحظه مورد نظر، ρ چگالی سیال، η مقدار خاصیت N بر واحد

جرم سیال، v بردار سرعت سیال و dA معرف المان سطح می‌باشد. قانون دوم نیوتون بیان می‌کند که

برآیند تمام نیروهای خارجی وارد به حجم کنترل برابر است با نرخ تغییرات مومنتوم حجم کنترل نسبت

به زمان. بنابراین معادله مومنتوم برای حجم کنترل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sum F = \frac{d}{dt}(mv) \quad (۵-۱۸)$$

که m جرم سیستم، ΣF برآیند نیروهای خارجی و v سرعت مرکز جرم سیستم می‌باشد. حال اگر

بجای N در معادله (۵-۱۷)، مومنتوم سیستم یعنی mv را قرار دهیم خواهیم داشت:

$$N \rightarrow mv$$

$$\Rightarrow \Sigma F = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho v dV + \int_{cs} \rho v v \cdot dA \quad (۵-۱۹)$$

معادله فوق معادله مومنتوم برای حجم کنترل است و بیان می‌کند که برآیند نیروهای وارده به حجم

کنترل برابر است با نرخ افزایش مومنتوم داخل حجم کنترل بعلاوه نرخ خالص خروج مومنتوم از مرزهای حجم کنترل.

البته عبارت ΣF در معادله (۵-۱۹) شامل کل نیروهای وارده از جمله نیروی حاصل از فشار سیال به

حجم کنترل نیز می‌باشد. در این حالت برای محاسبه نیروی خالص وارده از طرف جسم به حجم کنترل

می‌بایست نیروهای فشاری دو طرف حجم کنترل را از معادله (۵-۱۹) کم کنیم که در نهایت داریم:

$$\Rightarrow \dot{\vec{R}} = \Sigma F - \iint_{abhi} p \vec{dS} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho v dV + \int_{cs} \rho v v \cdot dA - \iint_{abhi} p \vec{dS} \quad (۵-۲۰)$$

که در آن $\dot{\vec{R}}$ برآیند کل نیروهای وارده از طرف جسم به حجم کنترل و عبارت $\iint_{abhi} p \vec{dS}$ برابر است با کل

نیروهای فشاری وارده بر سطح $abhi$. معادله (۵-۲۰) رابطه‌ای برای محاسبه نیروهای وارد شده به یک

جسم غوطه‌ور در سیال متحرک با سرعت v می‌باشد. با فرض جریان پایا، ترم $\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho v dV$ ، که متغیر با

زمان می‌باشد حذف شده و معادله (۵-۲۰) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\Rightarrow \dot{\vec{R}} = \int_{cs} \rho \vec{v} v \cdot d\vec{A} - \iint_{abhi} p \vec{dS} \quad (۵-۲۱)$$

همچنین در زمان انتخاب حجم کنترل متذکر شدیم که مرزهای حجم کنترل را در فواصل دور نسبت به مدل که فشار آن نقاط با فشار محیط برابر است، انتخاب می‌کنیم. بنابراین ترم $\iint_{abhi} p d\vec{S}$ که بیانگر نیروهای فشاری در مرزهای حجم کنترل است، قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. پس از اعمال تغییرات در نهایت معادله (۵-۲۱) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Rightarrow \dot{K} = \int_{cs} \rho \vec{v} \vec{v} \cdot d\vec{A} \quad (۵-۲۲)$$

برای محاسبه نیروی وارده به جسم در راستای محور x که همان نیروی پسا است، می‌بایست مؤلفه x بردار بالا را حساب نمائیم. در اینصورت داریم:

$$D = \int_{cs} \rho u \vec{v} \cdot d\vec{A} \quad (۵-۲۳)$$

همانطور که در ابتدای فصل گفته شد، مرزهای جانبی حجم کنترل مماس بر خطوط جریان می‌باشد. در اینصورت حاصل عبارت $\vec{v} \cdot d\vec{A}$ در دو مرز جانبی حجم کنترل صفر می‌شود. بنابراین می‌توان معادله (۵-۲۳) را بصورت زیر خلاصه کرد:

$$D = - \int_i^a \rho_1 u_1 u_1 dy + \int_h^b \rho_2 u_2 u_2 dy \quad (۵-۲۴)$$

$$if \quad \rho_1 = \rho_2 \Rightarrow \boxed{D/\rho = - \int_i^a u_1^2 dy + \int_h^b u_2^2 dy} \quad (۵-۲۵)$$

توجه کنید که علامت منفی در جلو نخستین جمله طرف راست معادله (۵-۲۵)، به سبب خلاف جهت بودن بردارهای عمود بر سطح و سرعت در ورودی حجم کنترل می‌باشد.

با نوشتن معادله پیوستگی در حالت پایا برای حجم کنترل مورد نظر و همچنین فرض ثابت بودن چگالی سیال داریم:

$$\int_i^a u_1 dy - \int_h^b u_2 dy = 0 \quad (5-26)$$

حال معادله فوق را در مقدار ثابت u_1 ضرب کرده و حاصل را با معادله (5-25) جمع می‌کنیم. در اینصورت خواهیم داشت:

$$\int_i^a u_1^2 dy = \int_h^b u_2 u_1 dy \quad (5-27)$$

$$\frac{D}{\rho} = -\frac{\int_i^a u_1^2 dy + \int_h^b u_2^2 dy}{\Rightarrow D/\rho = -\int_h^b u_2(u_1 - u_2) dy} \quad (5-28)$$

نیروی محاسبه شده، نیروی وارده از طرف جسم به حجم کنترل بر واحد چگالی سیال می‌باشد. نیروی وارد شده از طرف حجم کنترل به جسم در خلاف جهت این نیرو می‌باشد، پس عبارت بالا را در یک منفی ضرب کرده و داریم:

$$D' = -\frac{D}{\rho} = \int_h^b u_2(u_1 - u_2) dy \quad (5-29)$$

$$Cd = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 d} = \frac{D'}{\frac{1}{2}U^2 d} \quad (5-30)$$

از معادله فوق برای محاسبه ضریب پسا اجسام مختلف استفاده می‌شود، بدین صورت که ابتدا با استفاده از دستگاههای سنجش سرعت مانند جریان سنج سیم داغ، سرعت سیال را در مقاطع ورودی و خروجی حجم کنترل در نظر گرفته شده، اندازه‌گیری می‌نماییم، سپس معادله فوق را بصورت قابل استفاده برای جزء سطحهای گسسته تبدیل کرده و با استفاده از سرعتهای اندازه‌گیری شده و معادله (5-29)، در ابتدا نیروی پسا و سپس ضریب پسا جسم مورد نظر را محاسبه می‌نماییم. نکته مهم در انتخاب حجم کنترل، دور

بودن مرزهای ورودی و خروجی جریان تا حد امکان، بسبب یکی شدن فشار مرزهای حجم کنترل با فشار محیط است.

همانطور که در معادله (۵-۳۰) مشاهده می‌کنیم در این معادله از اثرات مؤلفه‌های نوسانی سرعت چشم‌پوشی شده است. در ادامه به معرفی روش *wake-survey* می‌پردازیم که در این روش، اثرات مؤلفه‌های نوسانی سرعت نیز در محاسبه ضریب پسا لحاظ شده است.

معادلاتی که برای اندازه‌گیری نیروی پسا استفاده شده است، به راحتی و با اعمال قوانین مومنوم و بقای جرم در یک حجم کنترل، قابل استخراج می‌باشد.

۱-۶-۵) وارد کردن اثرات اغتشاشات جریان در معادله آزمایشگاهی ضریب پسا

چائو [۶۱]، آنتونیا و راجاکوپالان [۶۲] و وان دام [۶۳] تحقیقات بسیاری برای بررسی اثرات شدت اغتشاشات جریان در اندازه‌گیری نیروی پسا انجام دادند. وان دام [۶۳] معادله‌ای برای محاسبه ضریب نیروی پسا به دست آورد که در آن ترمهای تنشهای رینولدزی و شدت اغتشاشات جریان وجود داشتند اما

از تغییرات چگالی جریان و ترم لزج $\mu \frac{\partial u}{\partial x}$ صرف‌نظر شده بود. کل معادله به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_d = \int \left(\frac{P_{s,a} - P_{s,w}}{q_\infty} \right) d\left(\frac{z}{c}\right) + 2 \int \frac{\bar{u}}{U_\infty} \left(1 - \frac{\bar{u}}{U_\infty} \right) d\left(\frac{z}{d}\right) - 2 \int \frac{\bar{u}'^2}{U_\infty^2} d\left(\frac{z}{c}\right) \quad (۵-۳۱)$$

که در این رابطه $q_\infty = \frac{1}{2} \rho (\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)$ می‌باشد.

همانطور که می‌بینیم، این معادله از سه بخش زیر تشکیل شده است:

$$\int \left(\frac{P_{s,a} - P_{s,w}}{q_\infty} \right) d\left(\frac{z}{c}\right) \quad \text{۱- فشاری:}$$

$$2 \int \frac{\bar{u}}{U_\infty} \left(1 - \frac{\bar{u}}{U_\infty} \right) d\left(\frac{z}{c}\right) \quad \text{۲- مومنتوم:}$$

$$2 \int \frac{\overline{u'^2}}{U_\infty^2} d\left(\frac{z}{c}\right) \quad \text{۳- تنش رینولدزی:}$$

اما بر طبق تحلیل گلدشتاین [۶۴]:

$$P_{s,a} = P_{s,w} + \bar{q}'$$

$$\bar{q}' = \frac{1}{2} \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

اگر معادله بالا را در معادله اول قرار دهیم، به عبارت زیر می‌رسیم:

$$C_d = 2 \int \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_\infty}} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_\infty}} \right) d\left(\frac{z}{c}\right) + \int \frac{(\overline{v'^2} + \overline{w'^2} + \overline{u'^2})}{U_\infty^2} d\left(\frac{z}{c}\right) \quad (۵-۳۲)$$

با استفاده از رابطه (۵-۳۲) می‌توان ضریب پسا را به روش *wake-survey* بدست آورد.

۷-۵ روابط تجربی موجود برای بدست آوردن ضریب پسا

برای بدست آوردن مقدار صحیح ضریب پسا و مقایسه نتایج بدست آمده در این تحقیق، می‌توان از مقادیر

ضریب پسا بدست آمده از روشهای عددی و تجربی دیگران استفاده کرد. در این تحقیق برای بدست

آوردن مقدار صحیح ضریب پسا از رابطه (۵-۳۳) که توسط ساکر و برائر [۶۵] معرفی شده است، استفاده

می‌شود. رابطه ارائه شده توسط ساکر و برائر با استفاده از مقادیر تجربی بدست آمده و در محدوده

$$0.0001 < Re < 200000 \text{ با دقت خوبی معتبر می‌باشد.}$$

$$C_d \approx 1.18 + \frac{6.8}{Re^{0.89}} + \frac{1.96}{Re^{0.5}} - \frac{0.0004 Re}{1 + 3.64 \times 10^{-7} Re^2} \quad (5-33)$$

۸-۵) علل تغییرات ضریب پسا

همان گونه که می دانیم ضریب پسای اجسام مختلف وابسته به عدد رینولدز و همچنین محل تبدیل رژیم جریان سیال از آرام به درهم می باشد. همچنین میزان ناهمواری های سطح جسم نیز در مقدار نیروی پسای اصطکاکی مؤثر می باشد. به عبارت دیگر نیروی پسای وارد بر اجسام وابسته به مقادیر دو مؤلفه اصطکاکی و فشاری می باشد. بدین صورت می توان میزان و علل تغییرات ضریب پسای اجسام را به تغییر مؤلفه های اصطکاکی و فشاری نیروی پسا مربوط دانست. به عنوان مثال در مورد مدل سیلندر دایره ای مورد بحث در این تحقیق، در صورتیکه عدد رینولدز جریان بسیار پایین بوده و جریان کاملاً آرام باشد و هیچ دنباله ای در پشت مدل به وجود نیاید، می توان مؤلفه اصطکاکی نیروی پسا را غالب بر مؤلفه فشاری آن دانست. در این حالت مقدار ضریب پسا، متأثر از زبری سطح جسم می باشد. در حالی که عدد رینولدز جریان افزایش یابد، ذرات سیال زمان کمتری برای تماس با سطح جسم دارند بنابراین با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب پسای ناشی از اصطکاک کاهش می یابد ولی درعوض به علت جدایش سیال در پشت مدل، ضریب پسای فشاری افزایش می یابد. در این حالت کاهش ضریب پسا شدت بیشتری داشته و ضریب پسای کل نیز روند نزولی دارد. با افزایش عدد رینولدز به نقطه ای می رسیم که در برابر افزایش عدد رینولدز، ضریب پسای اصطکاکی تغییر محسوسی نداشته و تغییرات ضریب پسا تماماً ناشی از تغییرات فشار در قبل و بعد از مدل می باشد. در این حالت هر چه عدد رینولدز بیشتر شود، به علت وسیع شدن

دنباله پشت مدل، ضریب پسا نیز بیشتر می‌شود و این روند تا تبدیل جریان آرام به درهم ادامه دارد. لازم به ذکر است محدوده عدد رینولدزی که در این تحقیق انتخاب شده است در همین بازه قرار گرفته، در نتیجه با افزایش عدد رینولدز ضریب پسا افزایش می‌یابد که شیب این افزایش در مقایسه با شیب کاهش ضریب پسا در اعداد رینولدز قبلی کمتر است. با تبدیل رژیم جریان از آرام به درهم ضریب پسا کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کند و بعد از آن روند صعودی ضریب پسا با افزایش رینولدز ادامه می‌یابد. البته باید متذکر شویم که شیب قسمت نزولی ضریب پسا خیلی بیشتر از شیب قسمت صعودی آن است و افزایش ضریب پسا به علت افزایش عدد رینولدز چندان چشم‌گیر نمی‌باشد. مخصوصاً در این مدل که محل جدایش سیال معلوم بوده و نقطه جدایش با تغییرات رینولدز تغییری نمی‌کند. مسأله حائز اهمیت دیگر، اولویت جدایش و درهمی جریان است. یعنی اگر سعی شود قبل از جدایش جریان، رژیم جریان از آرام به درهم تبدیل شود، می‌توان ضریب پسای کمتری را انتظار داشته باشیم. در این حالت به علت انرژی زیاد لایه مرزی جریان درهم نسبت به آرام، جدایش دیرتر اتفاق افتاده و ضریب پسای فشاری کمتر می‌شود.

در تحقیق حاضر به علت صیقلی بودن سطوح مدل، نیروی پسای اصطکاکی بسیار ناچیز است و از طرف دیگر به علت درهم بودن رژیم جریان آزاد و همچنین مشخص بودن نقاط جدایش سیال در روی سطح سیلندر دایره‌ای، بخش اعظم نیروی پسای وارد به سیلندر، بعلاوه گرادیان فشار ایجاد شده در جلو و عقب مدل می‌باشد.

فصل ششم

ارائه و تحلیل داده‌ها

آزمایشهای انجام گرفته در این تحقیق را می توان به چهار دسته آزمایش تقسیم کرد:

۱- آزمایش اول: بررسی مشخصه های دنباله سیلندر ثابت

۲- آزمایش دوم: بررسی اثرات اغتشاشهای جریان ورودی به سیلندر بر روی پارامترهای دنباله

۳- آزمایش سوم: بررسی اثرات انسداد محفظه آزمایش بر روی مشخصه های دنباله سیلندر

۴- آزمایش چهارم: بررسی اثرات دوران بر روی پارامترهای دنباله سیلندر

برای بررسی آزمایشهای فوق، پروفیلهای سرعت متوسط و شدت اغتشاشات در موقعیتهای طولی مشخصی

در پشت سیلندر و برای حالت های مختلفی از سرعت سیال و شرایط مسئله، اندازه گیری شده است که

نهایتاً توسط نمودارهای سرعت متوسط و شدت اغتشاشات، مقادیر پارامترهای ضریب پسا و *velocity*

defect مشخص شده است.

۶-۱) بررسی دنباله سیلندر ثابت

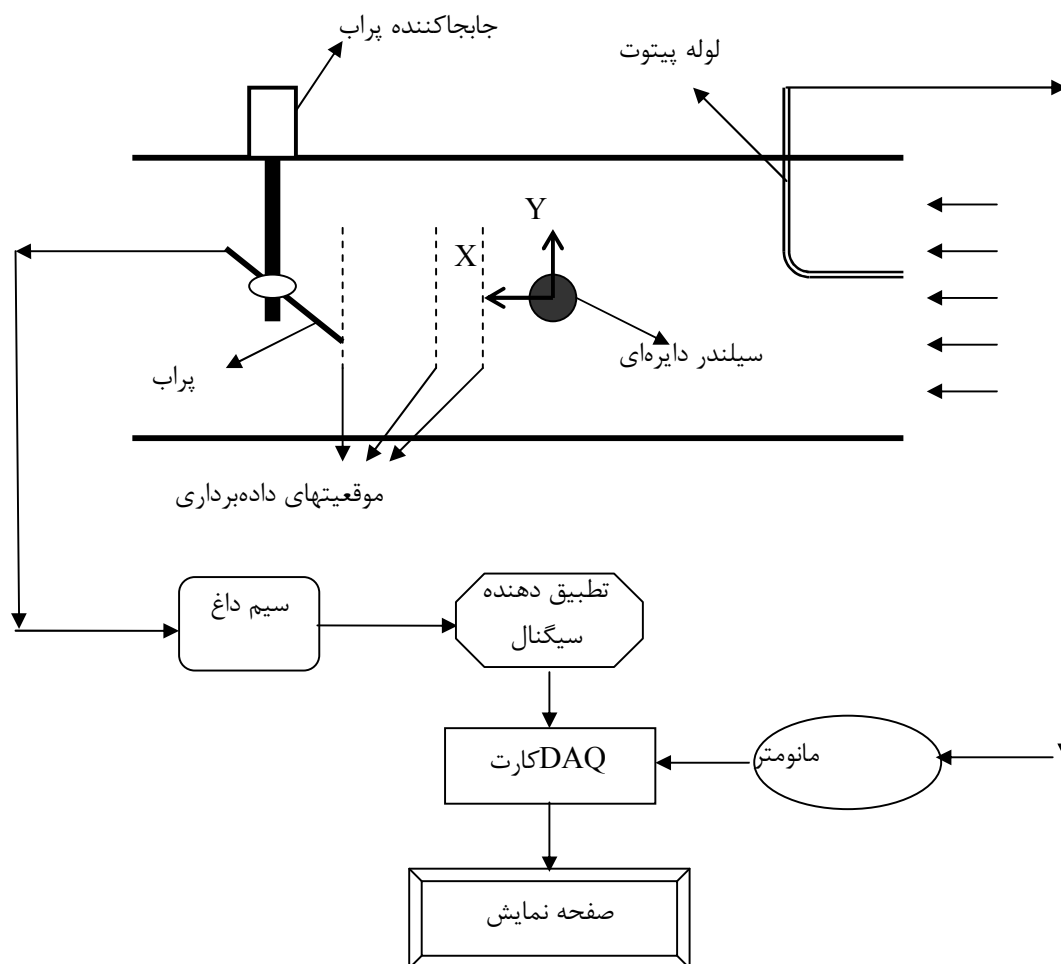
در این بخش دنباله سیلندر ثابت در اعداد رینولدز مختلف بررسی شده است. داده برداریها در شش

موقعیت ۱۸، ۱۲، ۶، ۳، ۱/۵، ۱ در $x/d=1$ در پشت سیلندر انجام شده است که x فاصله موقعیت داده برداری از

مرکز سیلندر و d قطر سیلندر می باشد. همچنین داده برداریها در بازه $y/d=(-3, +3)$ و برای ۱۲۰ نقطه

انجام شده است که Y ارتفاع نقاط تا مرکز سیلندر می‌باشد. در شکل (۶-۱) نمای شماتیکی از نحوه داده-

برداری و ثبت داده‌ها نشان داده شده است.

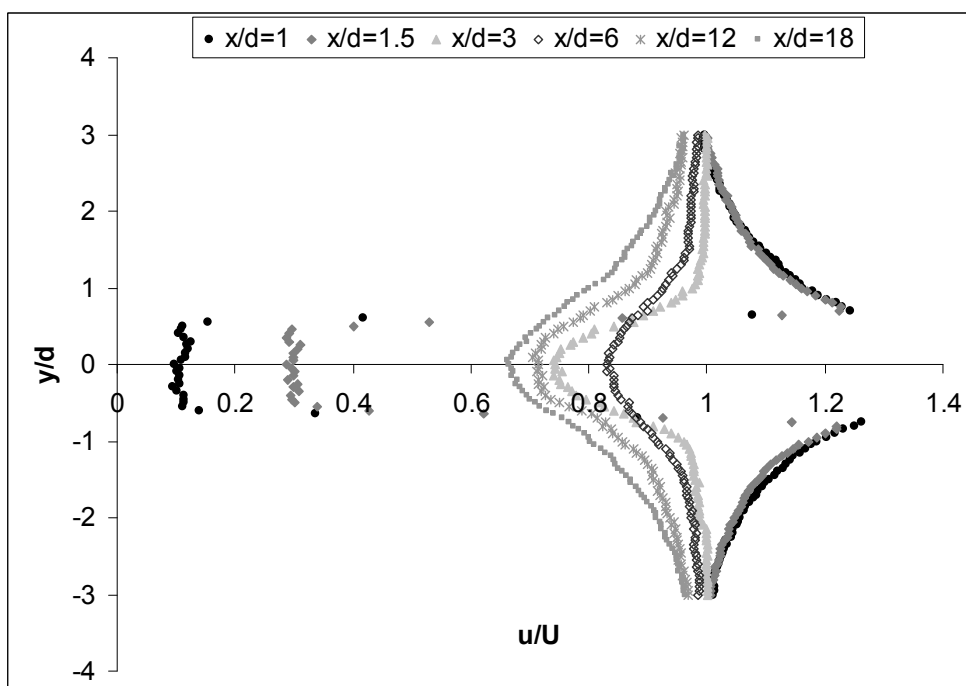


شکل (۶-۱): نمای شماتیکی از چگونگی داده برداری و ثبت داده‌ها

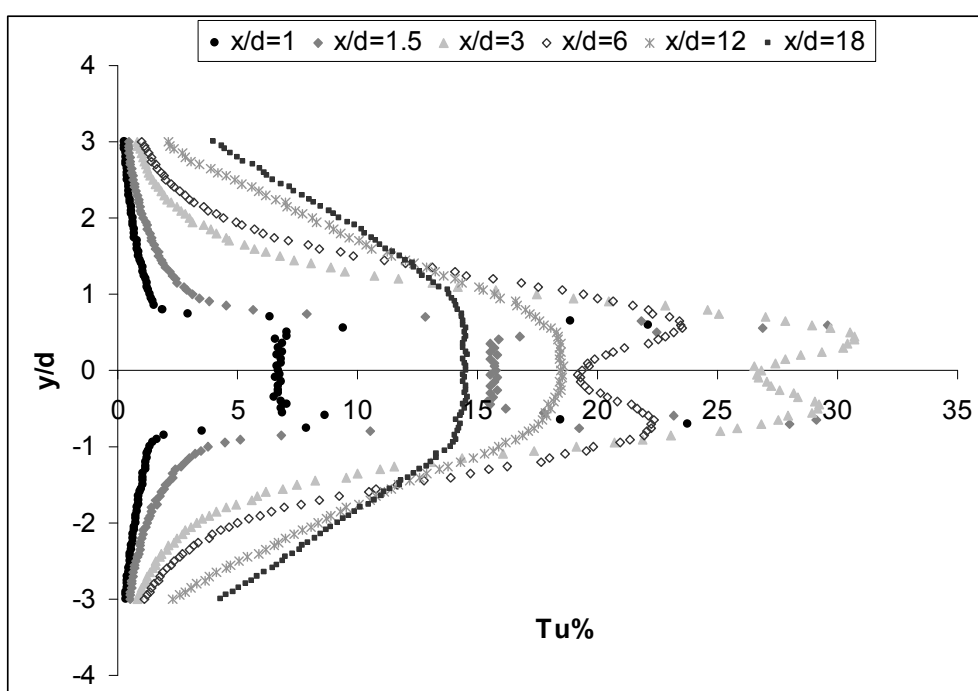
برای اطلاع از نمودارهای سرعت متوسط و شدت اغتشاشات در موقعیتهای متفاوت در پشت سیلندر برای

عدد رینولدز ۱۱۷۰۰ در شکل (۶-۲) و (۶-۳) نشان داده شده است.

همانطور که در شکل (۶-۲) نشان داده شده است، پروفیل‌های سرعت با توجه به طبیعت متغیر و غیردائم مؤلفه‌های نوسانی سرعت، در طول یک دوره تناوب متقارن می‌باشند. همانطور که می‌دانیم، گردابه‌ها به صورت لحظه‌ای و غیرمتقارن در پشت مدل تشکیل شده ولی با توجه به شکل (۶-۲)، حتی در مقاطع اولیه نزدیک به سیلندر هم، پروفیل‌های سرعت متوسط رسم شده کاملاً متقارن می‌باشند. توجیه این مطلب بدین صورت است که تشکیل گردابه‌ها در پشت سیلندر، لحظه‌ای بوده و به صورت تکراری در طول دوره تناوب خود تکرار می‌شوند. حال اگر زمان داده‌برداری در یک نقطه از زمان تناوب تشکیل گردابه‌ها بیشتر باشد، می‌توان با محاسبه متوسط زمانی سرعت در نقاط موردنظر، سرعت میانگین در هر نقطه را بدست آورد که اثرات نامتقارن بودن سرعت‌های لحظه‌ای در آن مشاهده نمی‌شود. در اشکال (۶-۲) و (۳-۶) زمان داده‌برداری تقریباً ۵۰۰ برابر زمان تناوب تشکیل گردابه‌ها می‌باشد. نکته حائز اهمیت دیگر این است که با افزایش فاصله از پشت سیلندر، اختلاف سرعت در داخل و خارج دنباله کاهش یافته و عرض دنباله افزایش می‌یابد که نتیجتاً پروفیل سرعت متوسط یکنواخت‌تر می‌شود. در فاصله‌های نزدیک سیلندر به علت وجود جدائی و جریانهای برگشتی افت جریان بیشتر می‌باشد که با دور شدن از سیلندر این افت کمتر شده و جریان در داخل دنباله یکنواخت‌تر می‌شود.



شکل (۶-۲): پروفیل سرعت متوسط برای موقعیتهای مختلف در $Re=11700$



شکل (۶-۳): پروفیل شدت اغتشاشات برای موقعیتهای مختلف در $Re=11700$

در این تحقیق، با توجه به مشخصات محفظه آزمایش تونل باد و محدودیتهای اندازه‌گیری نمی‌توان داده‌برداری را برای موقعیت دورتر از $x/d=18$ انجام داد. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌کنیم حتی در این موقعیت نیز اثرات وجود سیلندر در پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاشات وجود دارد و از بین نمی‌رود.

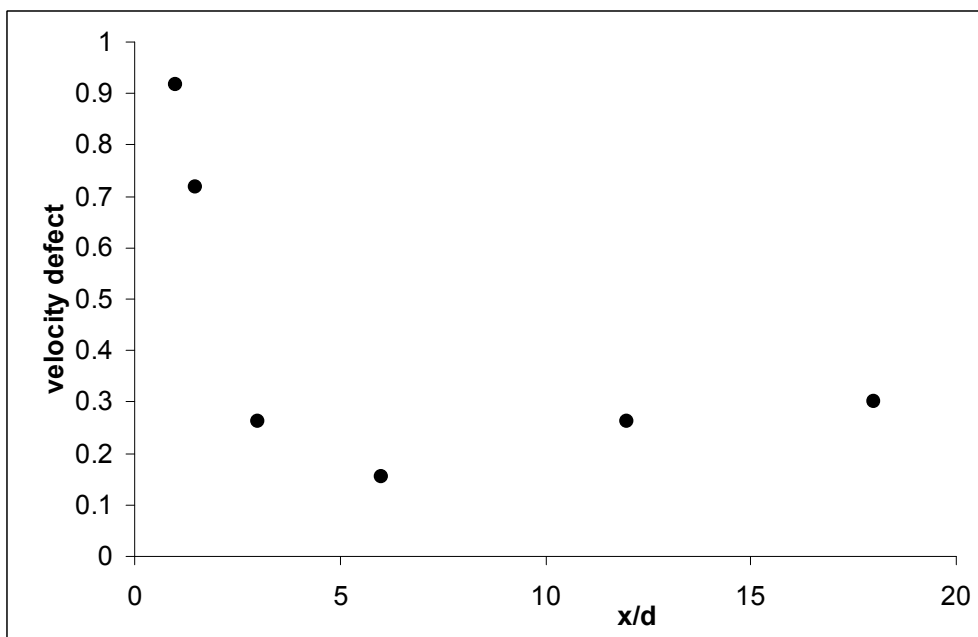
نکته قابل توجه دیگری که در شکل (۲-۶) مشاهده می‌شود، وجود دو ناحیه اکسترمم در پروفیل‌های سرعت مقاطع نزدیک به مدل می‌باشد. علت این مطلب را می‌توان در مومنتوم لایه مرزی ایجاد شده بر سطوح مدل دانست. بدین صورت که در مقاطع نزدیک به مدل، مومنتوم موجود در لایه مرزی تشکیل شده بر روی سطوح سیلندر، پس از انحلال لایه مرزی باعث افزایش انرژی نقاط مجاور و در نهایت افزایش سرعت آنها می‌شود که این مطلب در مقاطع دورتر پشت مدل اثر خود را از دست داده و قادر به ایجاد تغییر در سرعت ذرات سیال نمی‌باشد.

همانطور که در نمودار پروفیل سرعت متوسط مشاهده می‌کنیم، مقدار سرعت در داخل دنباله با افزایش فاصله از سیلندر ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. این نقطه در حوالی موقعیت $x/d=6$ روی می‌دهد. این پدیده را می‌توان ناشی از تغییرات رفتار جریان شامل از بین رفتن جریانهای برگشتی، یکنواخت شدن جریان و کم شدن اثرات جدائی جریان از موقعیتهای ابتدایی به موقعیتهای انتهایی داده‌برداری دانست.

در شکل (۳-۶) نمودار شدت اغتشاشات در موقعیتهای مختلف و برای عدد رینولدز ۱۱۷۰۰ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنیم پروفیل شدت اغتشاشات دارای دو ناحیه اکسترمم در روی مرز دنباله می‌باشد که با دور شدن از سیلندر این نقاط یکنواخت‌تر شده و اکسترمم‌ها از بین می‌رود. همچنین در این نواحی شاهد ماکزیمم تنش برشی هستیم که در خارج از مرکز دنباله روی می‌دهد. نکته مهم دیگر در این نمودارها این است که با افزایش فاصله از سیلندر، شدت اغتشاشات در داخل و روی مرز دنباله سیلندر ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و در فواصل دورتر از سیلندر نمودار شدت اغتشاشات یکنواخت می‌شود. این پدیده ناشی از وجود جریانهای برگشتی و چرخشی در نزدیک سیلندر و جریانهای یکنواخت در فاصله‌های دور از سیلندر می‌باشد.

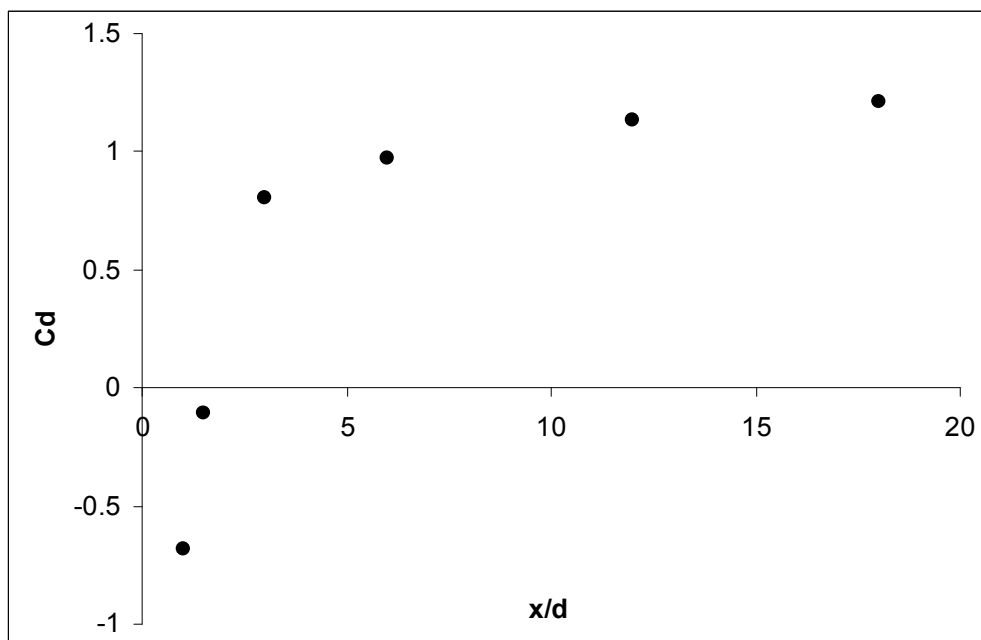
برای کمیت بخشیدن به نتایج پروفیل‌های سرعت متوسط پارامتر *velocity defect* را تعریف می‌کنیم. پارامتر *velocity defect* از تفریق سرعت جریان آزاد از سرعت مینیمم در داخل دنباله بدست می‌آید.

شکل (۴-۶) نمودار *velocity defect* در موقعیتهای مختلف برای عدد رینولدز ۱۱۷۰۰ در پشت سیلندر را نشان می‌دهد. همانطور که در پروفیل‌های سرعت متوسط نیز مشاهده کردیم، با افزایش فاصله از سیلندر ابتدا پارامتر *velocity defect* کاهش و سپس افزایش می‌یابد.



شکل (۴-۶): نمودار $velocity\ defect$ برای موقعیتهای مختلف در $Re=11700$

شکل (۵-۶) نمودار ضریب پسا در موقعیتهای مختلف در پشت سیلندر را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۶): مقادیر ضریب پسا در موقعیتهای مختلف

همانطور که مشاهده می‌کنیم با توجه به شرایط رابطه (۳۲-۵)، ویژگیهای دنباله و قابلیت‌های جریان‌سنج سیم داغ در موقعیتهای ابتدائی نزدیک سیلندر، مقدار ضریب پسا دارای خطای زیادی می‌باشد که با دور شدن از سیلندر و یکنواخت شدن جریان و کاهش اغتشاشات جریان خطای ضریب پسا بدست آمده نیز کاهش می‌یابد. مقدار ضریب پسای واقعی توسط رابطه (۳۳-۵) $1/1076$ بدست می‌آید. در نتیجه برای بدست آوردن ضریب درگ صحیح باید تا حد امکان داده‌برداری را در موقعیتهای دور از سیلندر انجام داد. نتایج بدست آمده در شکل (۵-۶) برای ضریب پسا در موقعیت $x/d=18$ نشان می‌دهد که نتیجه بدست آمده در این تحقیق، ۱۰ درصد بیشتر از مقدار بدست آمده از رابطه تجربی ساکر و برائر می‌باشد. این تفاوت به علت اختلاف در شرایط جریان ورودی، ابعاد سیلندر و محفظه آزمایش تونل باد و زبری سطح سیلندر می‌باشد.

اشکال (۶-۶) تا (۶-۱۰) اثرات عدد رینولدز در پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاشات سیلندر ثابت را در موقعیتهای مختلف نشان می‌دهد. اعداد رینولدز با توجه به تغییر سرعت جریان هوا بین ۹۴۰۰ تا ۲۸۲۰۰ متغیر می‌باشد. نتایج برای سه موقعیت ۳، ۶، $x/d=1/5$ بدست آمده است. به علت وجود جریانهای برگشتی در فواصل نزدیک سیلندر و عدم توانایی پراب در اندازه‌گیری برگشت جریان، موقعیت $x/d=1/5$ به عنوان موقعیت ابتدائی اندازه‌گیری و با توجه به مشخصات دنباله در موقعیتهای مختلف و

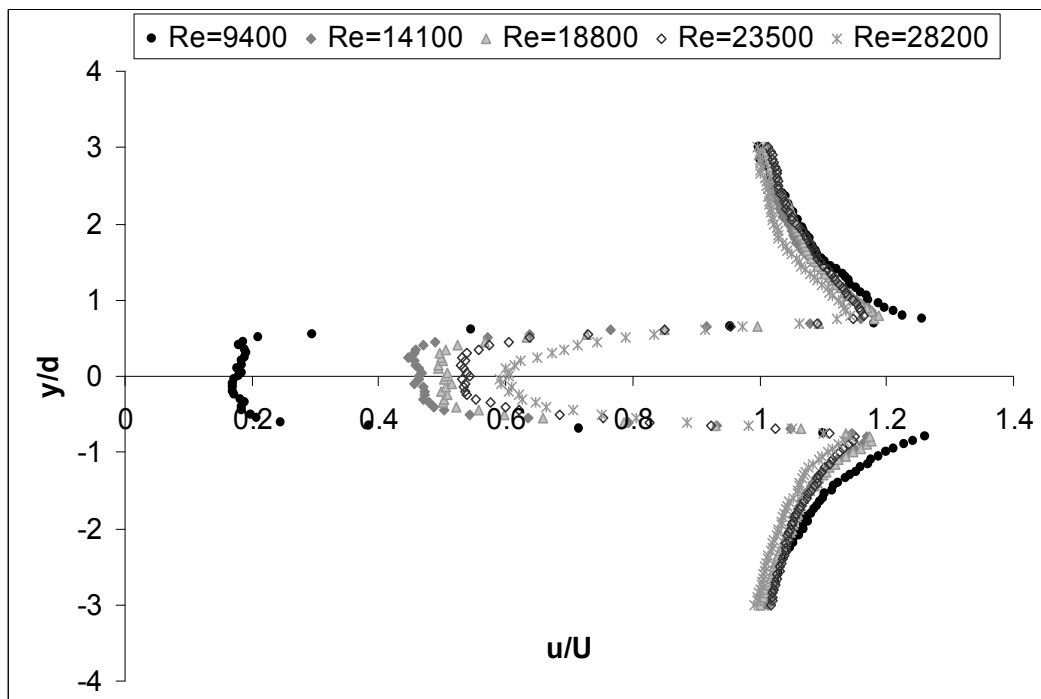
عدم تغییرات زیاد پروفیل‌های سرعت متوسط و شدت اغتشاشات در موقعیتهای دور، $x/d=6$ موقعیت بعنوان موقعیت انتهایی اندازه‌گیری، انتخاب شده است.

نتایج بدست آمده برای پروفیل‌های سرعت متوسط (اشکال (۶-۶) و (۶-۷) و (۶-۸)) نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز باعث تغییرات مهمی در پروفیل سرعت متوسط سیلندر می‌شود. با افزایش عدد رینولدز سرعت در داخل دنباله افزایش یافته و نمودار یکنواخت‌تر می‌شود. البته این الگو همانطور که در مبحث قبل توضیح داده شد بعلت وجود نقطه عطف برای نمودار سرعت متوسط در حوالی موقعیت $x/d=6$ ، بدرستی بدست نمی‌آید. همانطور که در نتایج پروفیل سرعت متوسط برای موقعیتهای مختلف در یک عدد رینولدز ثابت (شکل (۶-۲)) بررسی شد، مشاهده کردیم که با افزایش موقعیت، ابتدا سرعت در داخل دنباله شروع به افزایش و سپس شروع به کاهش می‌کند. بخاطر اینکه در حوالی موقعیت $x/d=6$ این تغییرات انجام می‌گیرد در نتیجه در این موقعیت نظام مشخصی از پروفیل‌های سرعت متوسط نمی‌توان بدست آورد.

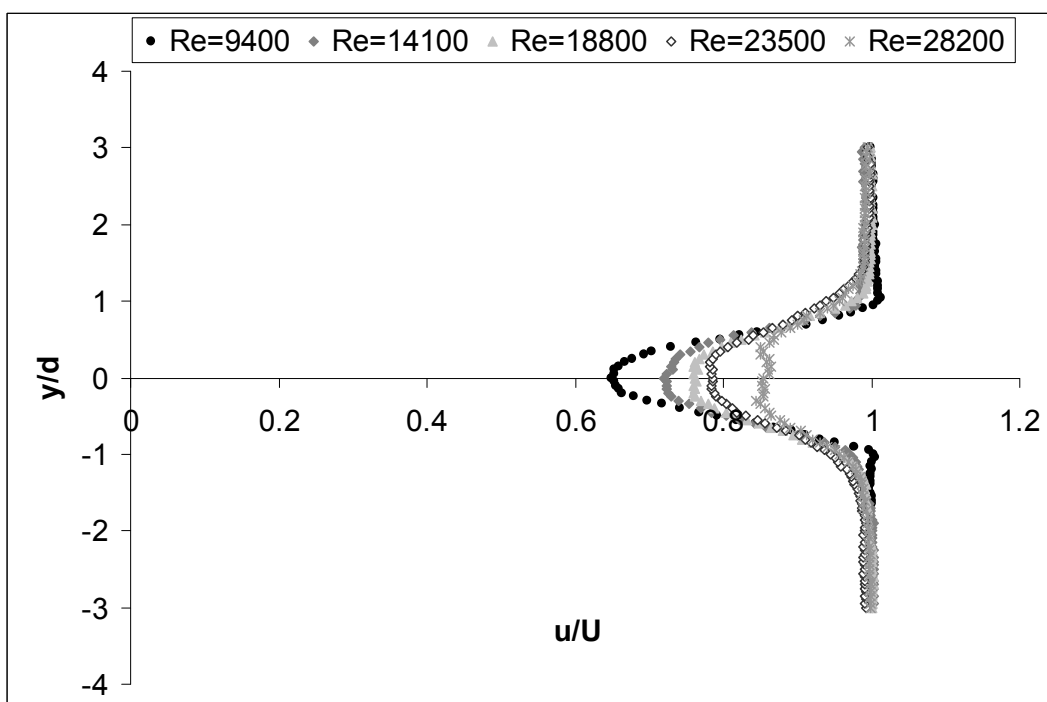
نتایج بدست آمده برای پروفیل‌های شدت اغتشاشات (اشکال (۶-۹) و (۶-۱۰) و (۶-۱۱)) نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز در موقعیت ۶ و $x/d=1/5$ شدت اغتشاشات در داخل و خارج دنباله افزایش می‌یابد. در موقعیت $x/d=3$ ، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز شدت اغتشاشات در خارج دنباله

افزایش ولی در داخل دنباله کاهش می‌یابد. علت کاهش شدت اغتشاشات در داخل دنباله در این موقعیت

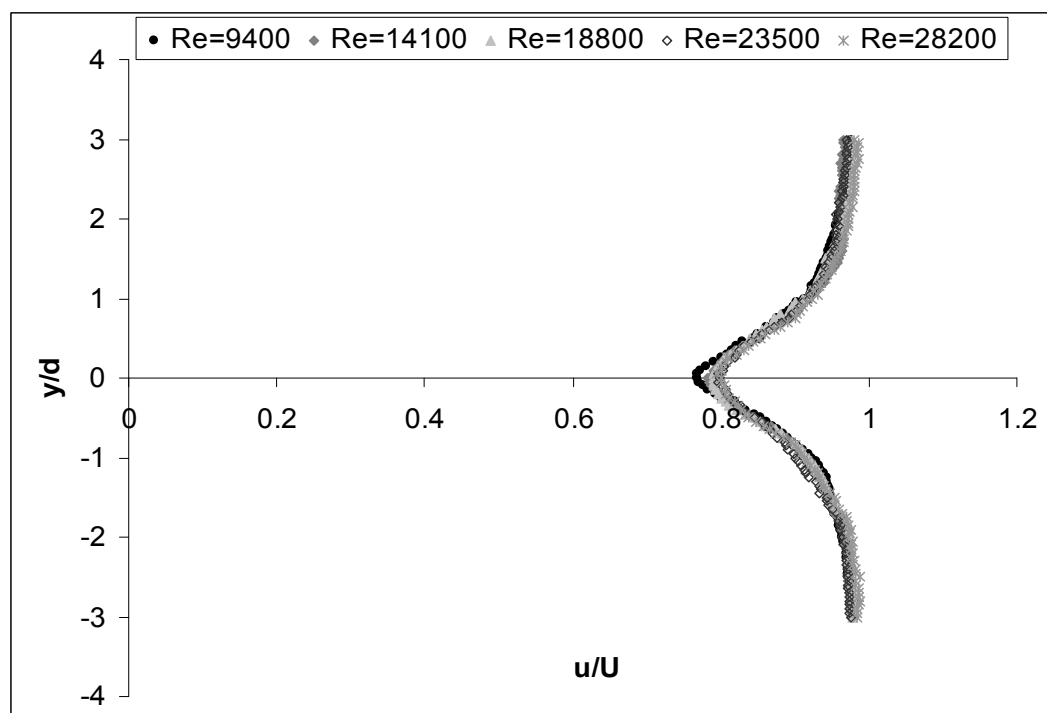
را می‌توان به موقعیت و وضعیت گردابه‌ها در پشت سیلندر نسبت داد.



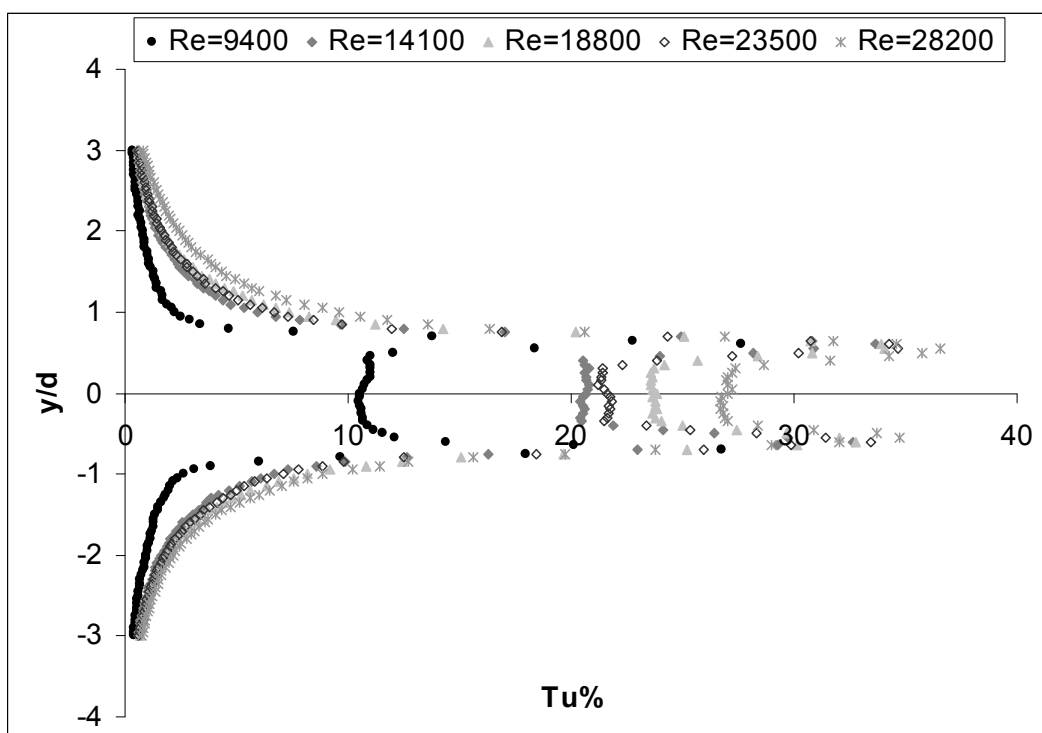
شکل (۶-۶): پروفیل سرعت متوسط بر حسب عدد رینولدز در موقعیت $x/d=1/5$



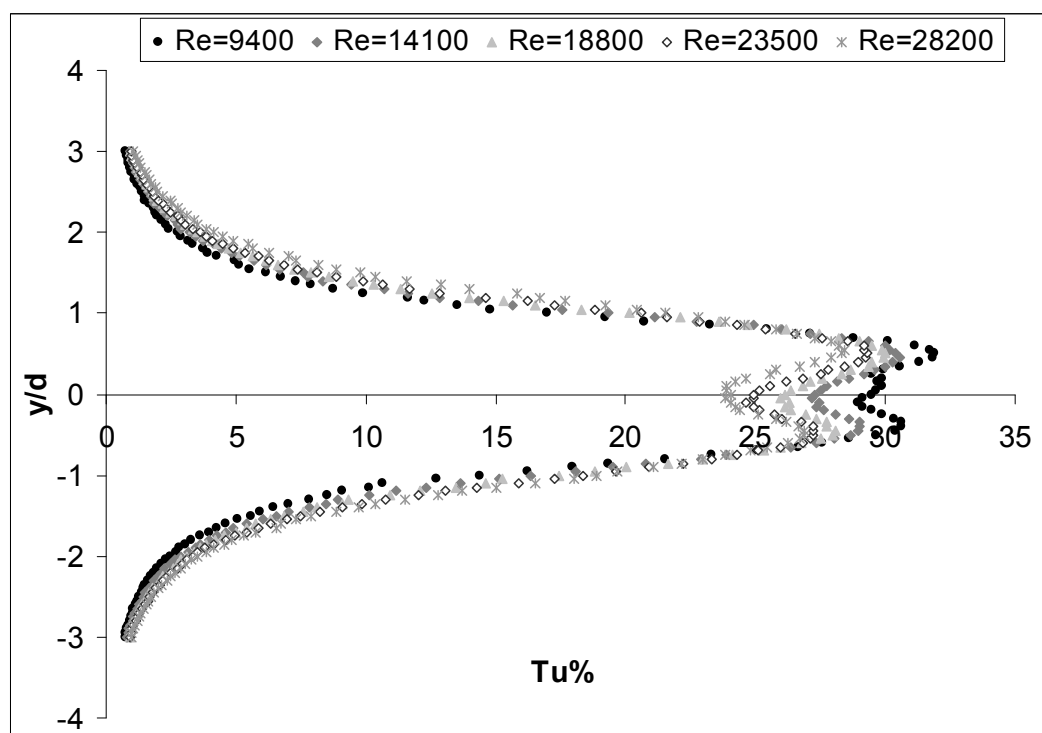
شکل (۶-۷): پروفیل سرعت متوسط بر حسب عدد رینولدز در موقعیت $x/d=3$



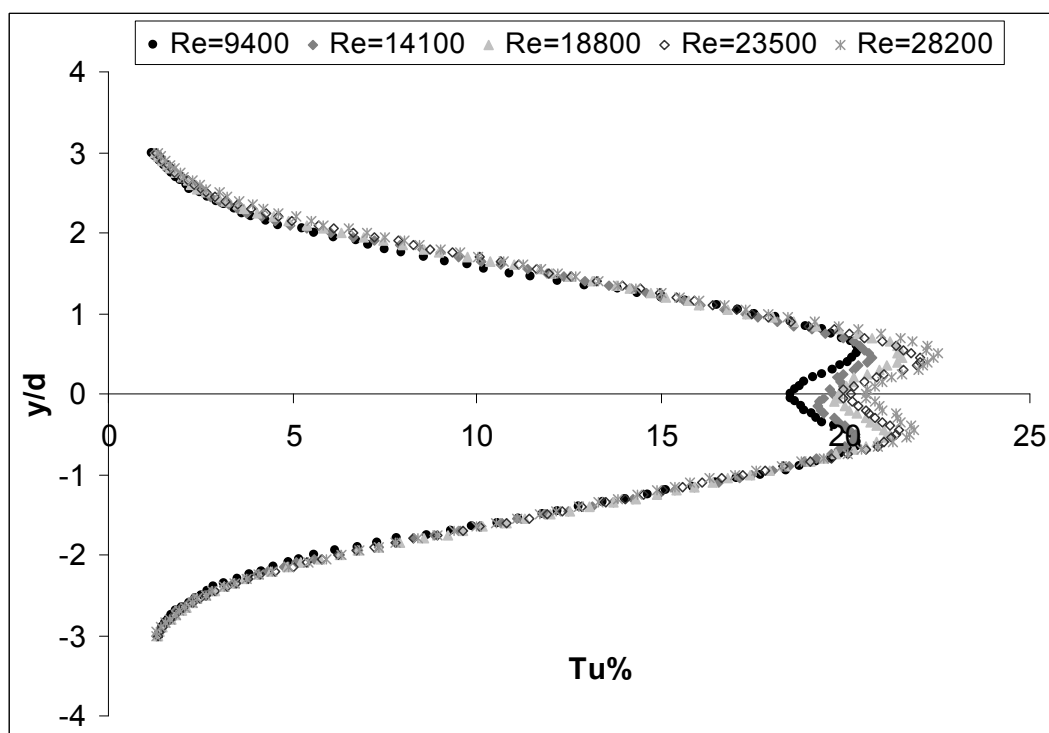
شکل (۶-۸): پروفیل سرعت متوسط بر حسب عدد رینولدز در موقعیت $x/d=6$



شکل (۹-۶): نمودار شدت اغتشاشات بر حسب عدد رینولدز در $x/d=1/5$



شکل (۱۰-۶): نمودار شدت اغتشاشات بر حسب عدد رینولدز در $x/d=3$



شکل (۱۱-۶): نمودار شدت اغتشاشات بر حسب عدد رینولدز در $x/d=6$

شکل (۱۲-۶) نمودار پارامتر $velocity\ defect$ در موقعیتهای مختلف برای اعداد رینولدز متفاوت را

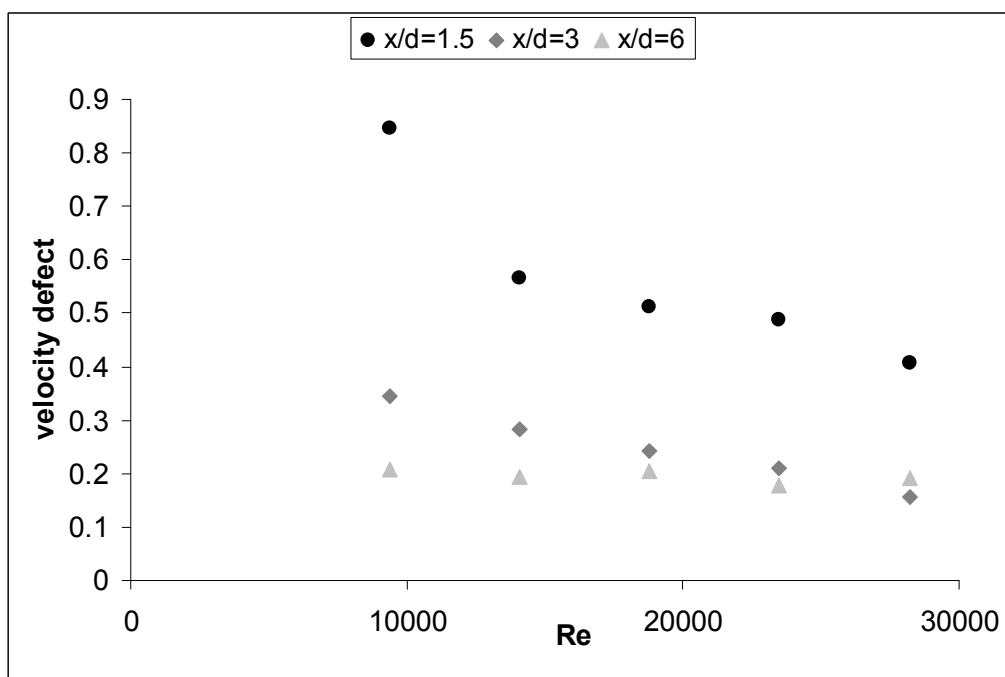
نشان می‌دهد. همانطور که در نمودارهای پروفیل سرعت متوسط (اشکال (۶-۶) تا (۶-۸)) مشاهده کردیم،

تغییر عدد رینولدز و موقعیت داده‌برداری باعث بوجود آوردن تغییراتی در مقدار پارامتر $velocity\ defect$

می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز در موقعیتهای مختلف پارامتر

$velocity\ defect$ کاهش می‌یابد. البته در موقعیت $x/d=6$ همانطور که قبلاً توضیح داده شد، نتایج

مشخصی نداریم.



شکل (۱۲-۶): نمودار $velocity\ defect$ برای اعداد رینولدز مختلف

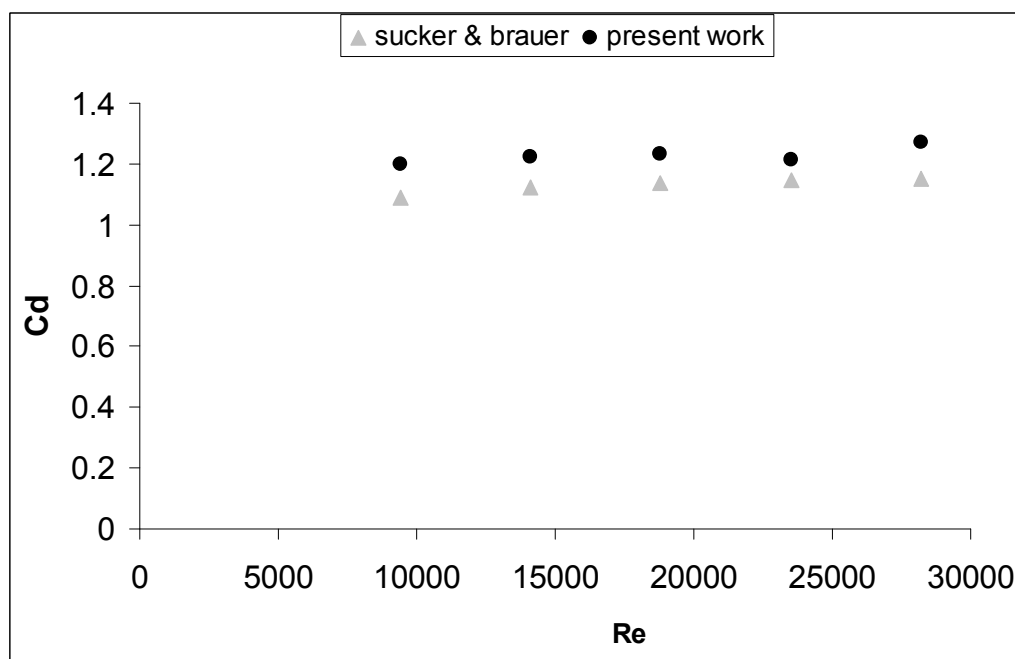
در شکل (۱۳-۶) نمودار ضریب پسا برای عدد رینولدز مختلف رسم شده و با مقادیر بدست آمده از رابطه

(۳۳-۵) مقایسه شده است. همانطور که در توضیحات فصل (۵) گفته شد در این بازه از اعداد رینولدز

ضریب پسا افزایش می‌یابد. با توجه به شرایط آزمایش، کالیبراسیون دستگاه و شرایط محیطی در مقادیر

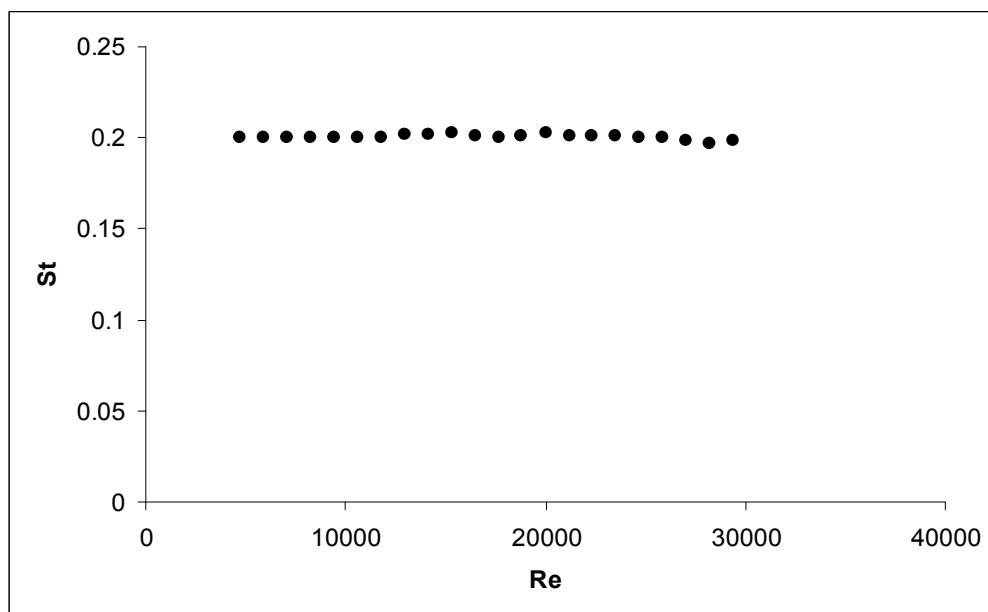
بدست آمده و مقادیر محاسبه شده اختلاف وجود دارد. مقدار ضریب پسا با توجه به عدد رینولدز بین ۵/۶

تا ۱۰ درصد با مقادیر بدست آمده از رابطه ساکر و بروئر [۷۵] اختلاف دارد.



شکل (۱۳-۶): مقادیر ضریب پسا برای اعداد رینولدز مختلف

همانطور که در مشخصات دستگاه جریان سنج سیم داغ گفته شد، این دستگاه قادر به اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های متناوب خارج شونده از سیلندر می‌باشد که با استفاده از آن و سرعت سیال و قطر سیلندر می‌توان عدد استروهمال را بدست آورد. برای اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های خارج شونده از پشت سیلندر باید پراب را در محل مناسبی قرار داده و توسط نمودار *FFT*، فرکانس را بدست آورد. در شکل (۱۴-۶) نمودار عدد استروهمال بر حسب عدد رینولدز نشان داده شده است. نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که در این بازه از اعداد رینولدز عدد استروهمال تقریباً ثابت و برابر 0.2 می‌باشد. نتایج بدست آمده قبلی توسط اشخاص دیگر نشان می‌دهد که عدد استروهمال در این محدوده از اعداد رینولدز تقریباً ثابت و برابر 0.21 می‌باشد که مقدار بدست آمده در این تحقیق با مقادیر بدست آمده دیگران تطابق خوبی دارد.



شکل (۶-۱۴): نمودار عدد استروهل بر حسب عدد رینولدز

۶-۲ بررسی اثرات اغتشاشهای جریان ورودی بر روی دنباله سیلندر ثابت با نصب شبکه

توربولانس‌ساز

برای مغشوش کردن جریان ورودی به سیلندر از شبکه‌ای از میله‌های پلاستیکی عمود برهم استفاده شده

است. شدت اغتشاشات جریان ورودی در تونل باد استفاده شده ۰/۰۸ می‌باشد که با استفاده از شبکه‌ها،

می‌توان شدت اغتشاشات جریان ورودی را به ۳/۵ و ۵ درصد برسانیم. داده‌برداری در این آزمایشها برای

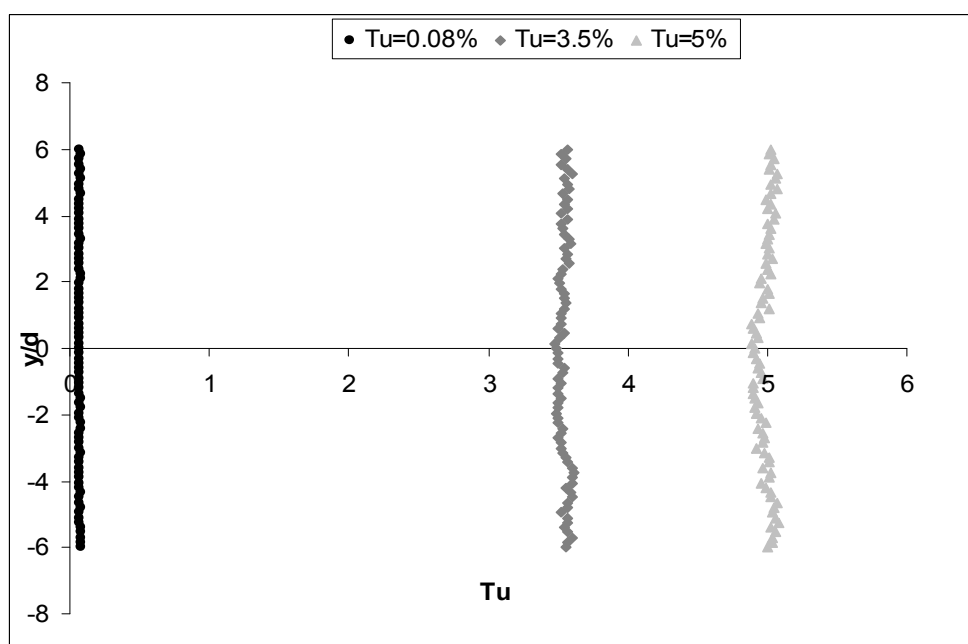
سه موقعیت ۳، ۶، ۱۵ و دو عدد رینولدز ۹۴۰۰ و ۱۴۱۰۰ انجام شده است.

در شکل (۶-۱۵) نمودار شدت اغتشاشات به ازای اغتشاشات ورودی مختلف در محل استقرار سیلندر برای

عدد رینولدز ۹۴۰۰ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنیم، در حالت عادی شدت

اغتشاشات جریان ورودی کمتر از ۰/۰۸ درصد و در حالت استقرار شبکه‌های توربولانس‌ساز شدت

اغتشاشات جریان ورودی به اتاقک آزمایش ۳/۵ و ۵ درصد می‌باشد.



شکل (۱۵-۶): نمودار شدت اغتشاشات مختلف در محفظه آزمایش در حالت‌های مختلف

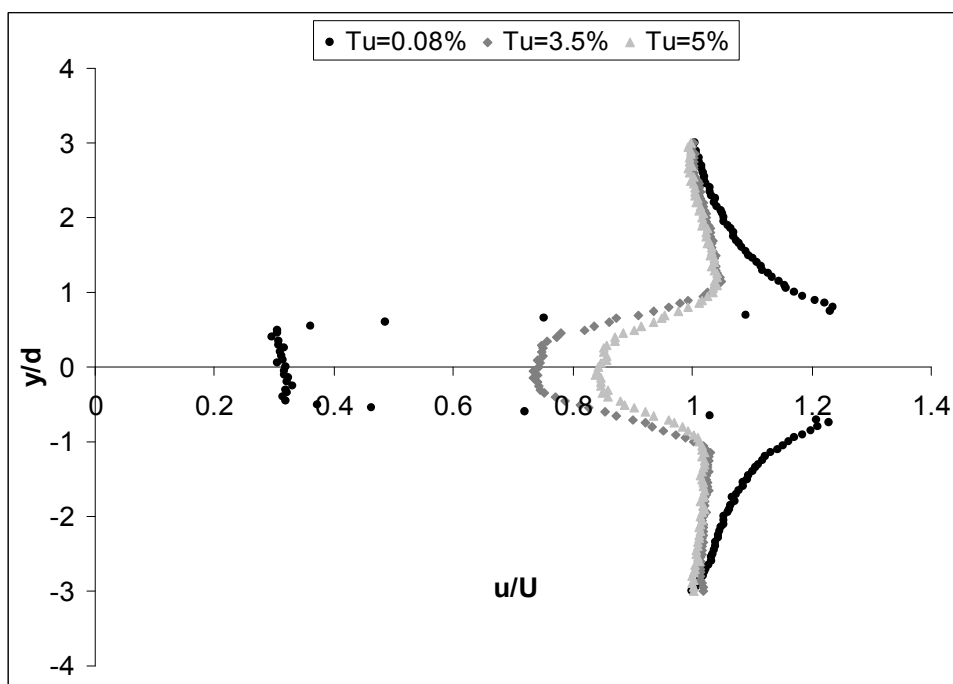
در شکل (۱۶-۶) نمودار پروفیل‌های سرعت متوسط در شدت اغتشاشات مختلف برای موقعیت $x/d=1/5$

برای عدد رینولدز ۹۴۰۰ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنیم، افزایش شدت اغتشاشات

ورودی باعث ایجاد تغییرات اساسی در سرعت حداکثر و حداقل و شکل پروفیل سرعت متوسط سیلندر

می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش شدت اغتشاشات، سرعت بی‌بعد شده در داخل دنباله کاهش

می‌یابد.



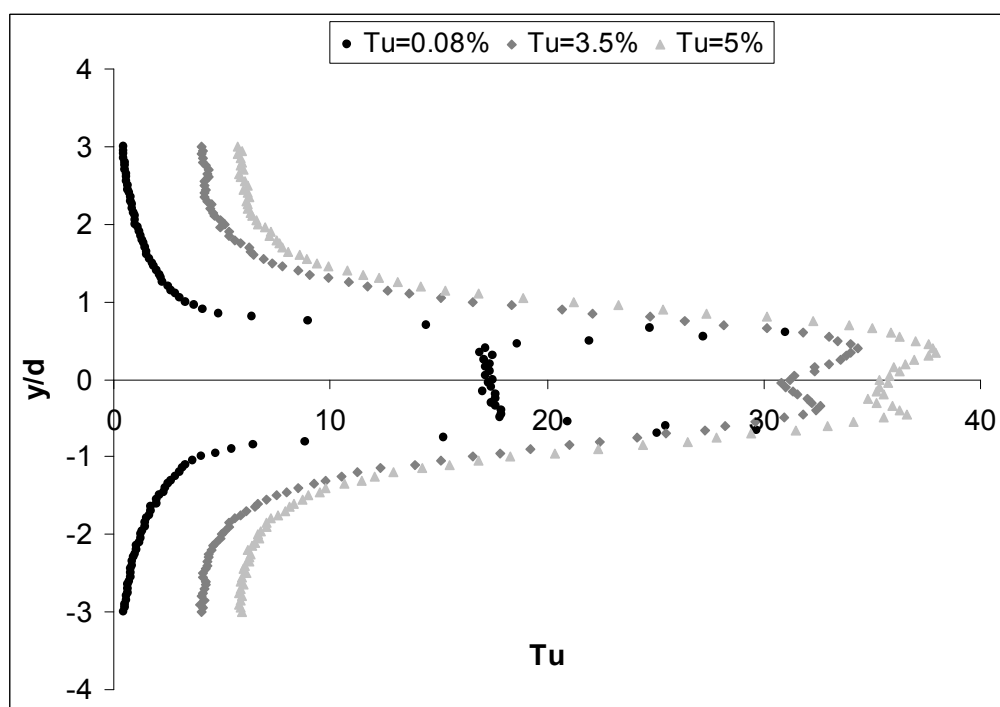
شکل (۱۶-۶): پروفیل سرعت متوسط برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=9400$ و $x/d=1/5$

نمودار شدت اغتشاشات دنباله سیلندر برای اغتشاشات ورودی مختلف در موقعیت مشابه برای عدد رینولدز 9400 در شکل (۱۷-۶) نشان داده شده است.

اولین نکته حائز اهمیت مشاهده دو پیک در نمودار شدت اغتشاشات برای هر سه اغتشاش ورودی است که این پیکها در ناحیه مرز دنباله روی می دهد. نتایج بدست آمده نشان می دهد که پیکهای تشکیل شده در پروفیل شدت اغتشاشات متقارن نیست که این امر بعلت وجود پراب، صفحات بالائی محفظه آزمایش و کوتاه بودن مدت داده برداری می باشد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش شدت اغتشاشات ورودی به سیلندر شدت اغتشاشات در داخل دنباله نیز افزایش می یابد. همچنین نمودار شدت اغتشاشات برای

اغتشاشات ورودی ۳/۵ و ۵ درصد نسبت به حالت بدون اغتشاش از لحاظ اختلاف اغتشاشات در نواحی

پیک و داخل دنباله یکنواخت‌تر شده است.



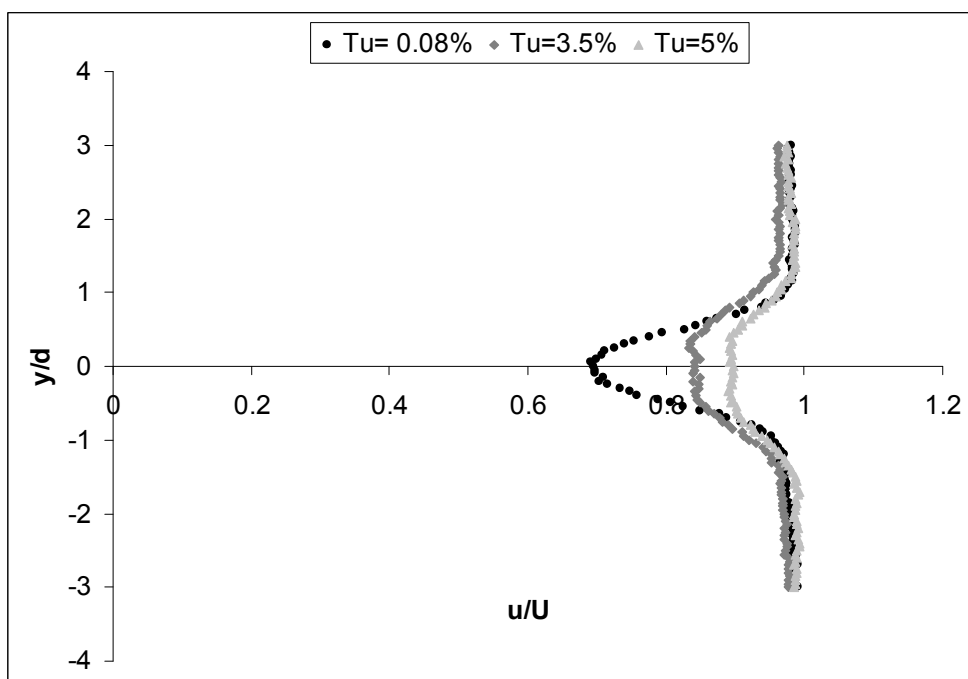
شکل (۱۷-۶): نمودار شدت اغتشاشات برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=9400$ و $x/d=1/5$

در شکل (۱۸-۶) نمودار پروفیل‌های سرعت متوسط در شدت اغتشاشات مختلف برای موقعیت $x/d=3$ در

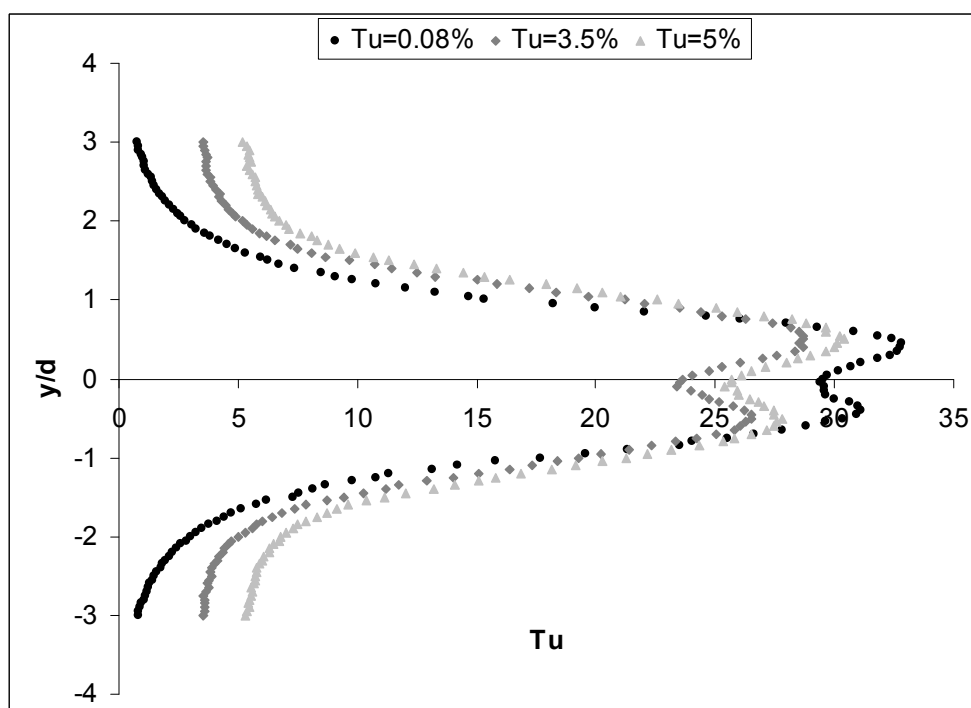
عدد رینولدز ۹۴۰۰ نشان داده شده است. در این موقعیت نیز مانند موقعیت قبلی مشاهده می‌شود که با

افزایش شدت اغتشاشات ورودی، سرعت متوسط در داخل دنباله افزایش یافته و نمودار یکنواخت‌تر

می‌شود.



شکل (۶-۱۸): پروفیل سرعت متوسط برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=9400$ و $x/d=3$



شکل (۶-۱۹): نمودار شدت اغتشاشات برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=9400$ و $x/d=3$

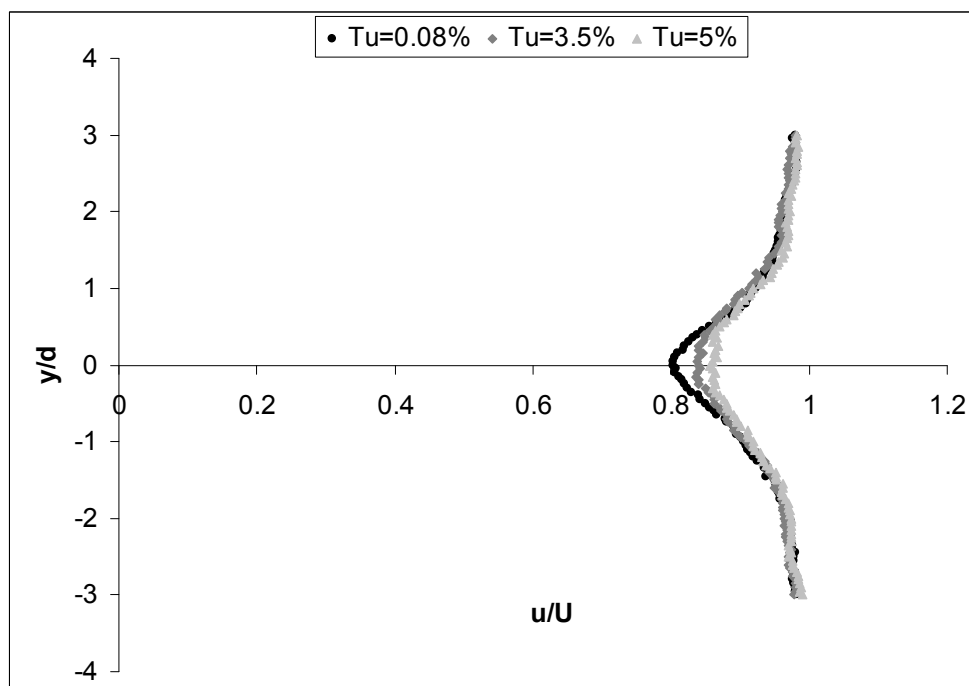
شکل (۶-۱۹) نمودار شدت اغتشاشات را در موقعیت $x/d=3$ نشان می‌دهد. در این موقعیت، شدت اغتشاشات برای حالت اغتشاشات $3/5$ و 5 درصد نسبت به موقعیت قبل کاهش می‌یابد. این حالت چندین بار آزمایش شد و برای همه آزمایشها جوابهای مشابهی بدست آمد. با توجه به شدت اغتشاشات در فواصل دیگر پشت سیلندر نتیجه می‌گیریم شدت اغتشاشات در موقعیت $x/d=3$ دارای حداکثر شدت اغتشاشی برای موقعیتهای اندازه‌گیری شده می‌باشد و با تغییرات در شرایط جریان شدت اغتشاشات نتیجتاً کاهش می‌یابد.

در شکل (۶-۲۰) نمودار پروفیل سرعت متوسط در موقعیت $x/d=6$ در عدد رینولدز 9400 نشان داده شده است. در این موقعیت نیز مشاهده می‌شود که با افزایش شدت اغتشاشات ورودی سرعت متوسط در داخل دنباله افزایش می‌یابد و نمودار یکنواخت‌تر می‌شود. با توجه به نمودار پروفیل سرعت متوسط برای سه موقعیت 6 ، 3 ، $x/d=1/5$ نتیجه می‌گیریم با دور شدن از سیلندر اثر شدت اغتشاشات ورودی بر روی پروفیل سرعت متوسط کاهش می‌یابد. همچنین در هر سه موقعیت با افزایش شدت اغتشاشات ورودی سرعت متوسط در داخل دنباله افزایش می‌یابد.

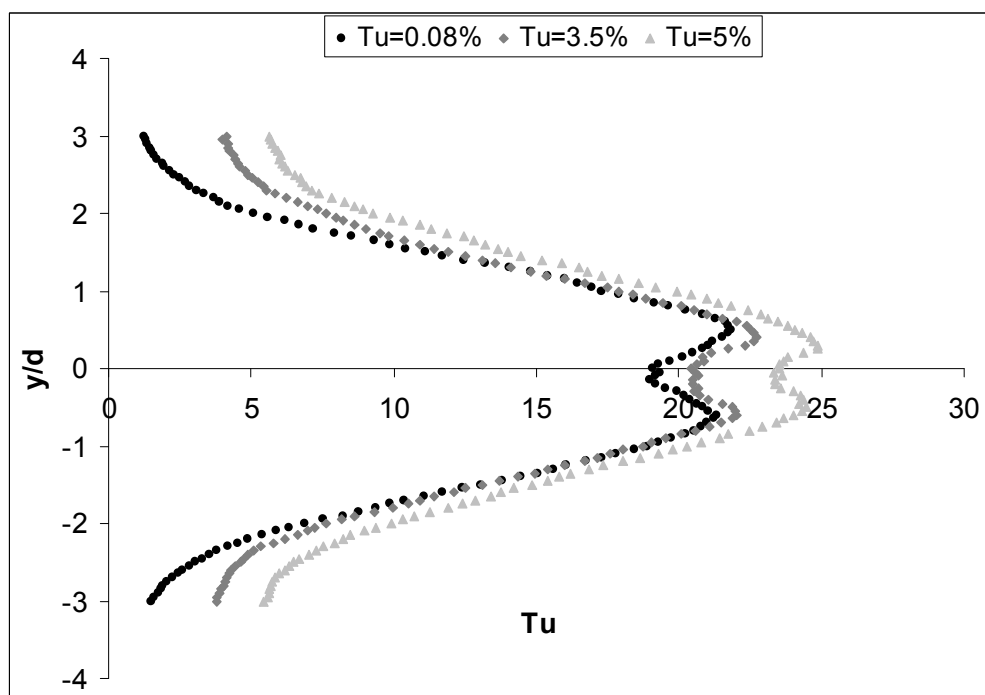
شکل (۶-۲۱) نمودار شدت اغتشاشات در موقعیت $x/d=6$ را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش شدت اغتشاشهای ورودی، اغتشاشات نیز در داخل و خارج دنباله افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده در سه موقعیت قبلی مشاهده می‌کنیم نمودار شدت اغتشاشات در موقعیتهای نزدیک سیلندر، مانند

نمودار سرعت متوسط دارای روند مشخصی نمی‌باشد ولی در فواصل دورتر از سیلندر می‌توان به نتایج

مشخصی رسید.



شکل (۶-۲۰): پروفیل سرعت متوسط برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=9400$ و $x/d=6$

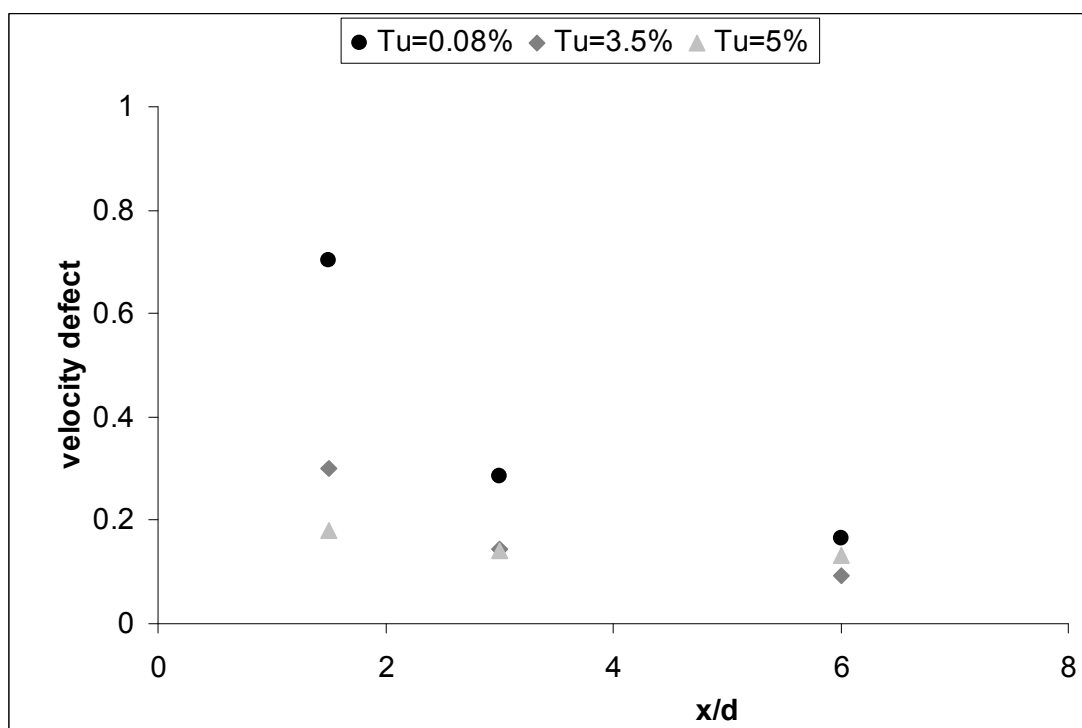


شکل (۶-۲۱): نمودار شدت اغتشاشات برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=9400$ و $x/d=6$

در شکل (۶-۲۲) نمودار *velocity defect* در موقعیتهای مختلف و برای شدت اغتشاشات ورودی

متفاوت رسم شده است. همانطور که در نمودارهای پروفیل سرعت متوسط نیز مشاهده شد، با افزایش

شدت اغتشاشات ورودی مقدار *velocity defect* کاهش می یابد.



شکل (۶-۲۲): نمودار $velocity\ defect$ برای شدت اغتشاشات ورودی مختلف

در شکل (۶-۲۳) نمودار ضریب پسا برای اغتشاشات ورودی مختلف برای عدد رینولدز ۹۴۰۰ رسم شده

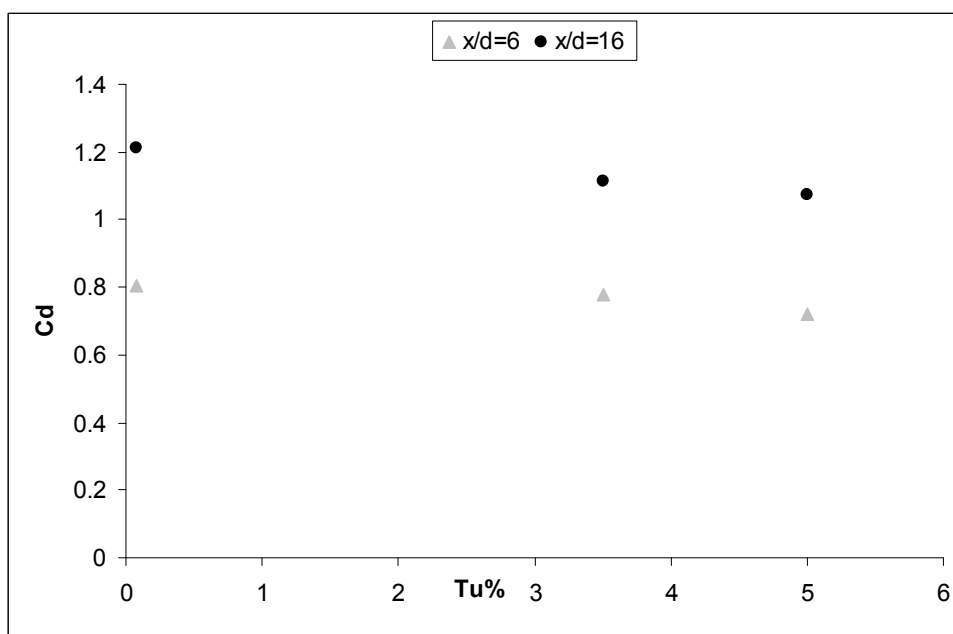
است. ضرایب پسا در موقعیت $x/d=6$ و $x/d=16$ محاسبه و برای بدست آوردن ضریب پسا از رابطه (۶-۳۲)-

(۵) استفاده شده است. اولین نکته قابل اهمیت وابستگی ضریب پسا به فاصله از پشت سیلندر است که

برای بدست آوردن نتایج بهتر باید ضریب پسا را در فواصل دور از سیلندر محاسبه کنیم. نکته بعدی

کاهش ضریب پسا با افزایش شدت اغتشاشات ورودی است که در اینجا برای شدت اغتشاشات ورودی ۳/۵

و ۵ درصد به ترتیب ضریب پسا حدود ۸ و ۱۱ درصد کاهش پیدا می کند که نتایج قابل قبولی می باشد.



شکل (۶-۲۳): نمودار ضریب پسا برای شدت اغتشاشات مختلف در $Re=9400$

شکل (۶-۲۴) و (۶-۲۵) نمودار پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاشات را برای عدد رینولدز 14100

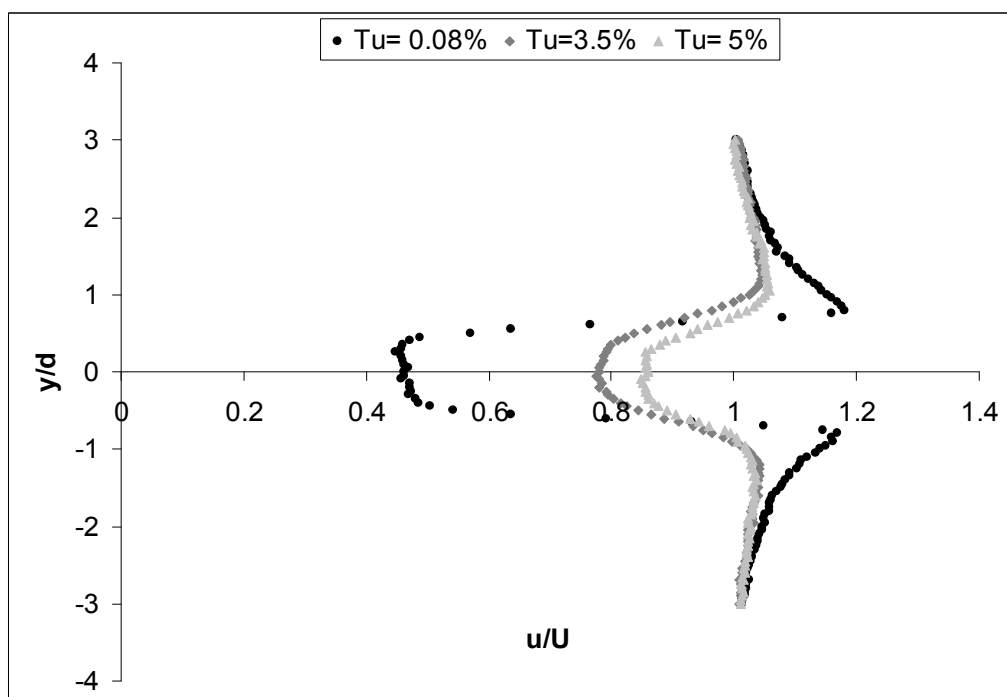
در موقعیت $x/d=1/5$ نشان می‌دهد. برای پروفیل سرعت نتایج حاصل برای عدد رینولدز 9400 ، برای این

عدد رینولدز نیز صادق است. ولی در نمودار شدت اغتشاشات مشاهده می‌کنیم که شدت اغتشاشات برای

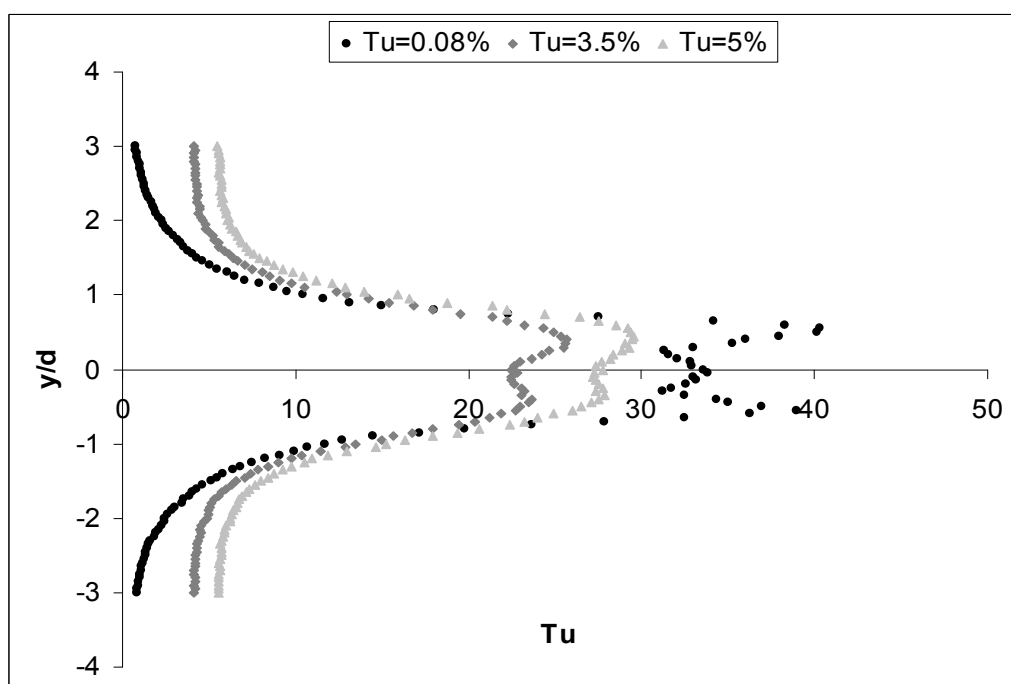
حالت شدت اغتشاش ورودی 0.08 درصد نسبت به اغتشاشات ورودی $3/5$ و 5 درصد افزایش یافته است

که این علت، به خاطر تغییرات در مشخصه‌های گردابه‌های پشت سیلندر و تغییر این مشخصه‌ها با افزایش

میزان اغتشاشها می‌باشد.



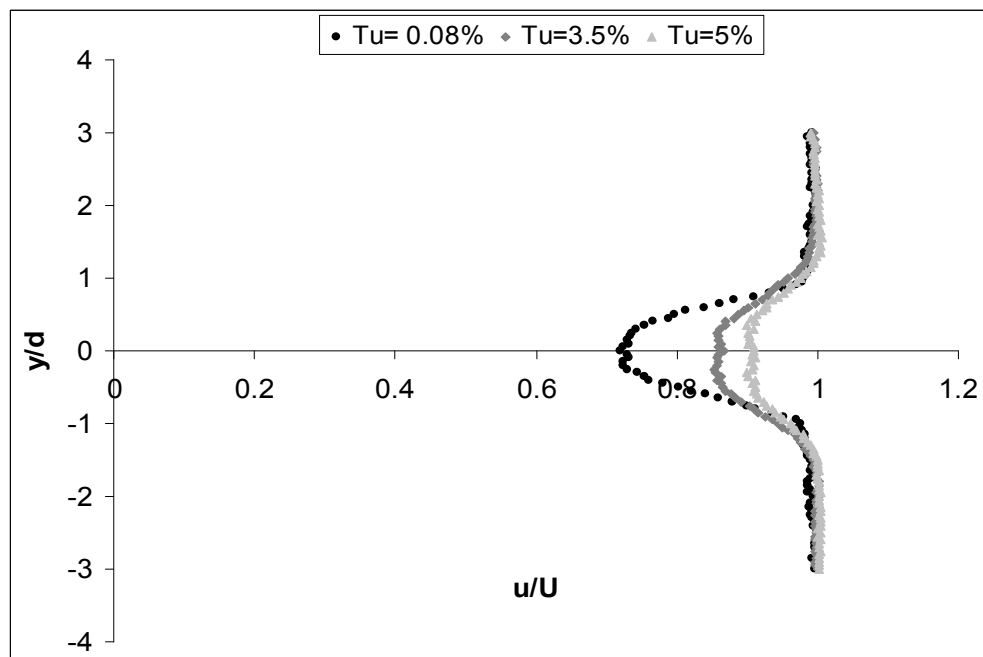
شکل (۶-۲۴): پروفیل سرعت متوسط برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=14100$ و $x/d=1/5$



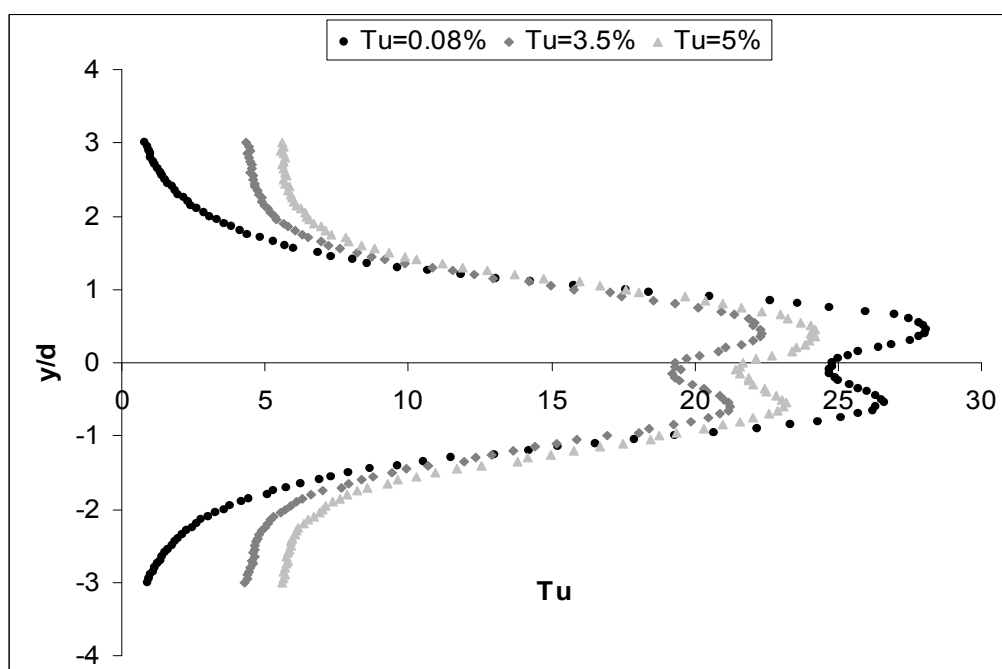
شکل (۶-۲۵): نمودار شدت اغتشاشات برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=14100$ و $x/d=1/5$

در شکل‌های (۶-۲۶) و (۶-۲۷) نمودار پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاشات برای اغتشاش‌های ورودی

مختلف و برای عدد رینولدز ۱۴۱۰۰ در موقعیت $x/d=3$ نشان داده شده است.

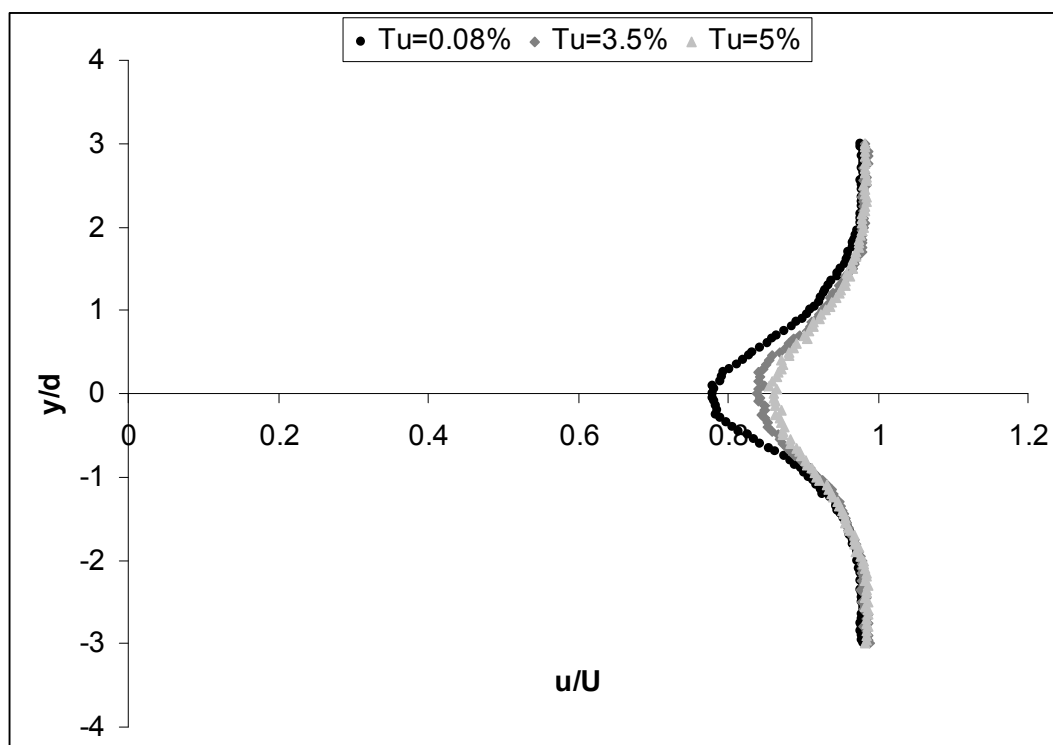


شکل (۶-۲۶): پروفیل سرعت متوسط برای اغتشاش‌های ورودی مختلف در $Re=14100$ و $x/d=3$



شکل (۶-۲۷): نمودار شدت اغتشاشات برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=14100$ و $x/d=3$

نتایج حاصل در این موقعیت نیز مانند موقعیت $x/d=1/5$ می باشد. در این موقعیت نیز با افزایش شدت اغتشاشات ورودی از اختلاف سرعت متوسط در داخل و خارج دنباله کاسته و نمودار یکنواخت تر می شود. در شکل (۶-۲۸) نمودار پروفیل سرعت متوسط برای اغتشاشهای مختلف در موقعیت $x/d=6$ در عدد رینولدز 14100 نشان داده شده است. در این موقعیت نیز مانند موقعیتهای قبلی با افزایش اغتشاشهای ورودی به سیلندر سرعت در داخل دنباله افزایش می یابد و در نتیجه از اختلاف سرعت در داخل و خارج دنباله کاسته می شود.

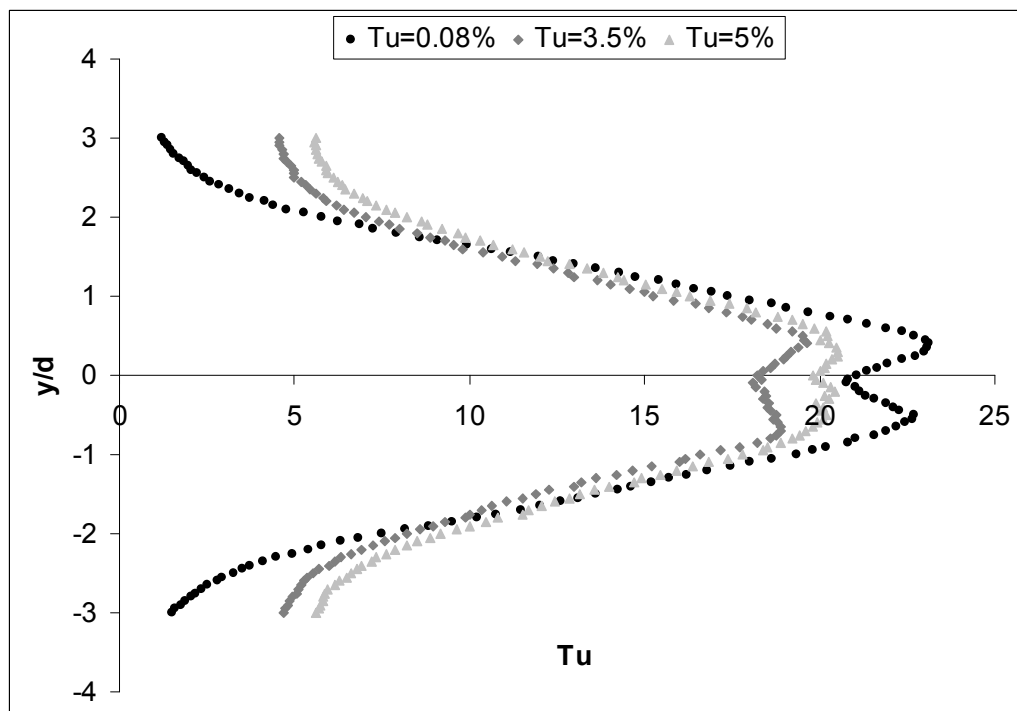


شکل (۶-۲۸): پروفیل سرعت متوسط برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=14100$ و $x/d=6$

در شکل (۶-۲۹) نمودار شدت اغتشاشات برای اغتشاشهای ورودی مختلف برای موقعیت و عدد رینولدز

مشابه نشان داده شده است. که نتایج حاصله در این موقعیت نتایج بدست آمده در موقعیتهای قبلی را

تأیید می‌کند.

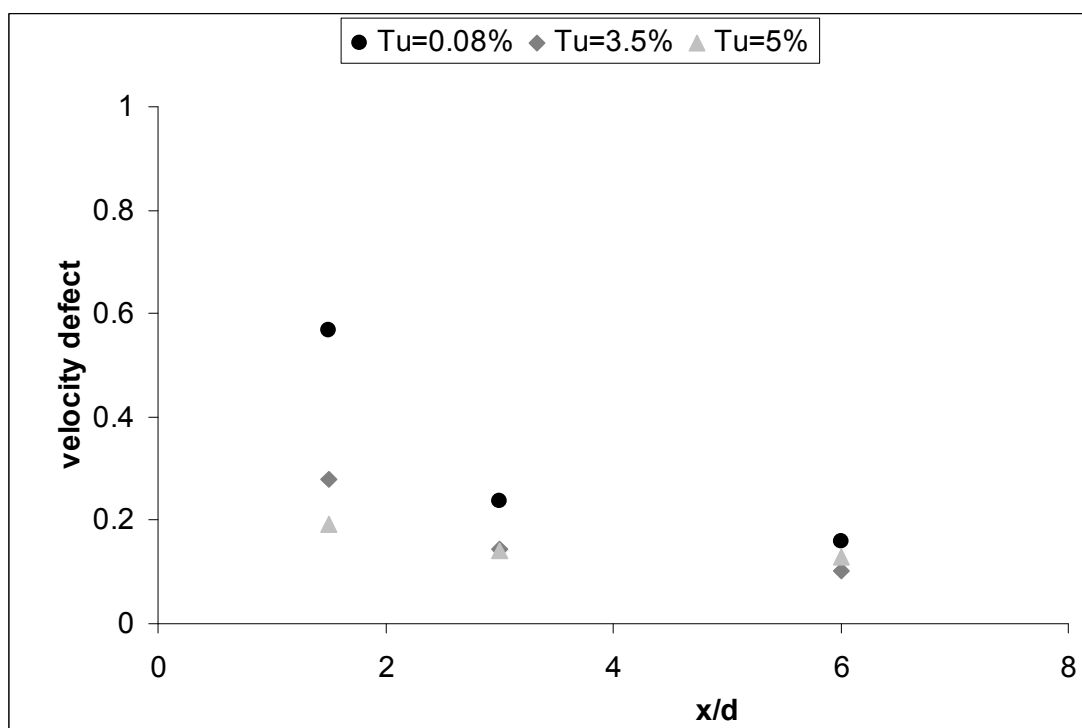


شکل (۶-۲۹): نمودار شدت اغتشاشات برای اغتشاشهای ورودی مختلف در $Re=14100$ و $x/d=6$

در شکل (۶-۳۰) نمودار *velocity defect* در موقعیتهای مختلف و برای شدت اغتشاشات ورودی

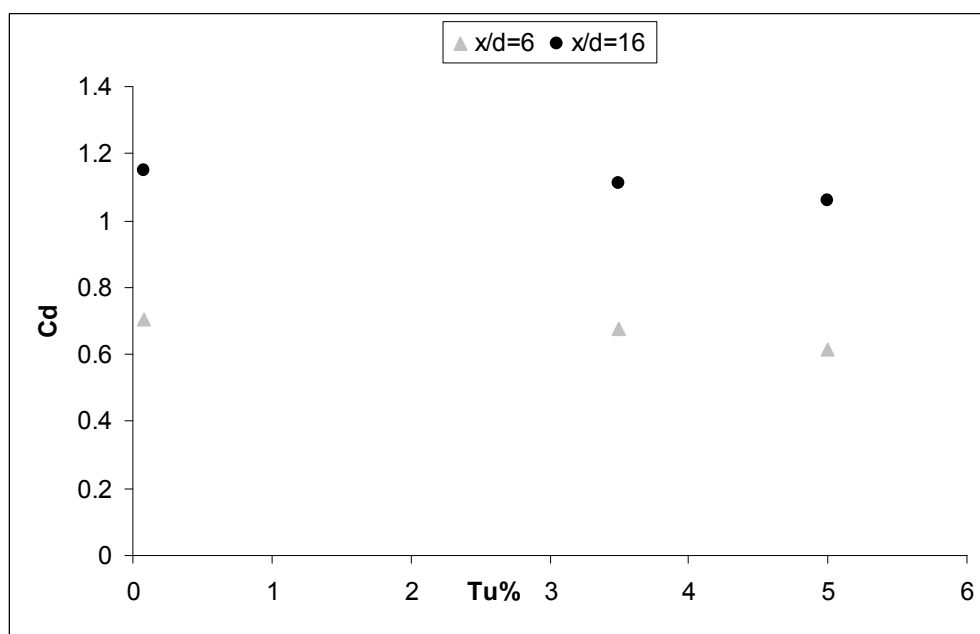
متفاوت رسم شده است. همانطور که در نمودارهای پروفیل سرعت متوسط نیز مشاهده شد، با افزایش

شدت اغتشاشات ورودی مقدار *velocity defect* کاهش می‌یابد.



شکل (۳۰-۶): نمودار $velocity\ defect$ برای شدت اغتشاشات ورودی مختلف

در شکل (۳۱-۶) نمودار ضریب پسا برای اغتشاشهای ورودی متفاوت در عدد رینولدز ۱۴۱۰۰ رسم شده است. برای بدست آوردن ضریب پسا از رابطه (۳۲-۵) استفاده شده است. برای مشخص شدن اثرات موقعیت داده‌برداری بر روی ضریب پسا، ضریب پسا برای دو موقعیت $x/d=6$ و $x/d=16$ در پشت سیلندر محاسبه شده است. همانطور که از نتایج مشاهده می‌کنیم در فواصل نزدیک سیلندر مقدار بدست آمده ضریب پسا دارای خطای زیادی خواهد بود. همانطور که برای عدد رینولدز ۹۴۰۰ نیز مشاهده کردیم، در اینجا نیز با افزایش شدت اغتشاشات ورودی، مقدار ضریب پسا سیلندر کاهش می‌یابد.



شکل (۳۱-۶): نمودار ضریب پسا برای شدت اغتشاشات مختلف در $Re=14100$

۳-۶) بررسی اثر نسبت انسداد بر روی مشخصه‌های دنباله سیلندر

در این بخش اثر نسبت انسدادهای مختلف بر روی پارامترهای دنباله سیلندر دایره‌ای شکل در عدد

رینولدز ۱۱۷۰۰ بررسی شده است. داده‌برداری برای نسبت انسداد $0.05 - 0.08 - 0.11 - 0.14 - 0.17$

و در ۳ مقطع ۶، ۳، $x/d = 1/5$ از پشت سیلندر انجام گردید که در اینجا d قطر سیلندر و x فاصله محل

داده‌برداری تا مرکز سیلندر می‌باشد.

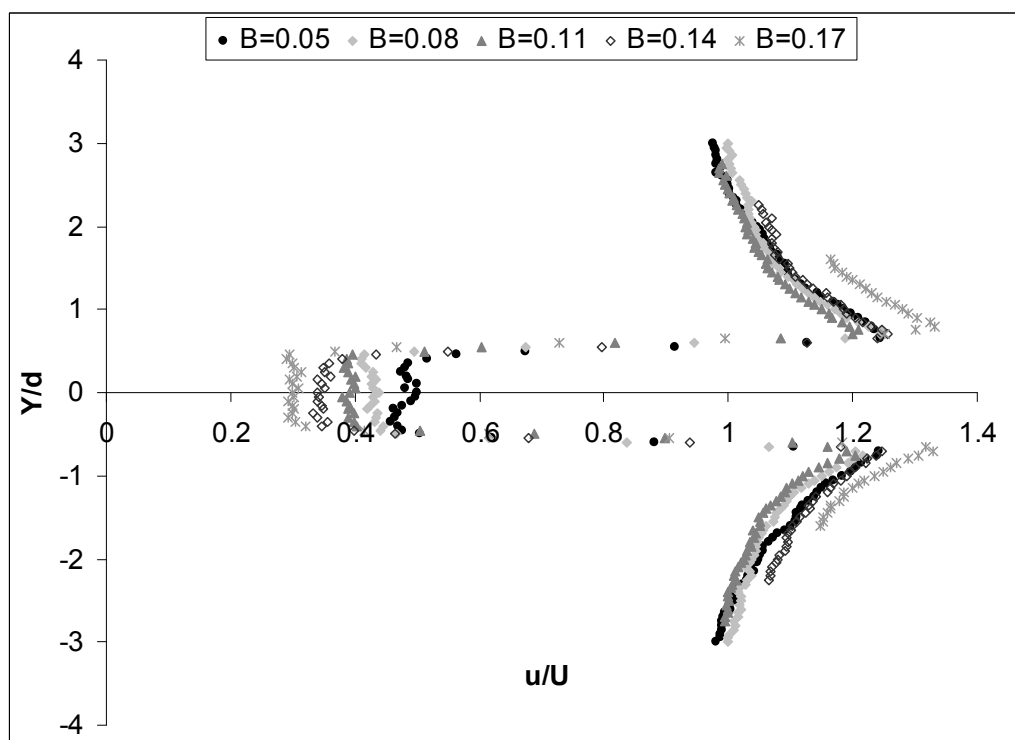
از آنجا که برای افزایش نسبت انسداد باید صفحات را به یکدیگر نزدیک کنیم، در داده‌برداری برای

انسدادهای بالا دچار محدودیت می‌شویم و نمی‌توانیم داده‌برداری را در دامنه زیادی، انجام دهیم. البته در

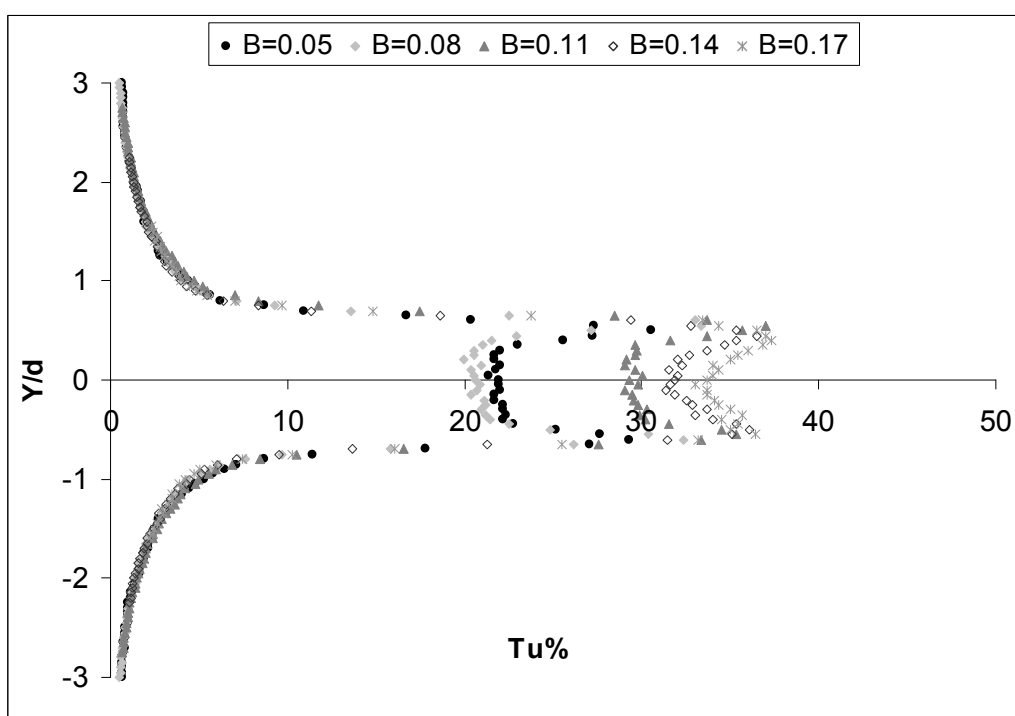
تمام آزمایشهای انجام گرفته پراب به صورت افقی قرار داده شده است تا بتوانیم حداکثر داده‌برداری را

انجام دهیم ولی همانطور که در نتایج نیز مشاهده می‌کنیم در انسدادهای بالا دامنه داده‌برداری نسبت به انسدادهای پائین کوچکتر شده است.

نمودار بی‌بعد شده پروفیل سرعت متوسط نسبت به بازه داده‌برداری در نسبت انسدادهای متفاوت و برای موقعیت $x/d = 1/5$ در شکل (۶-۳۲) نشان داده شده است. از پروفیل‌های سرعت متوسط بدست آمده در شکل (۶-۳۲) مشاهده می‌شود با افزایش اثر انسداد، سرعت جریان در خارج دنباله افزایش و در داخل دنباله کاهش می‌یابد که این موضوع به علت اثرات انسداد است که باعث افزایش سرعت جریان بین دو صفحه می‌شود. البته سرعت متوسط در داخل دنباله با افزایش نسبت انسداد کاهش می‌یابد. در شکل (۶-۳۳) نمودار شدت اغتشاشات در نسبت انسدادهای مختلف و برای موقعیت $x/d = 1/5$ نشان داده شده است. از نتایج آزمایش‌های انجام گرفته درمی‌یابیم که با افزایش نسبت انسداد، شدت اغتشاشات در داخل دنباله افزایش می‌یابد ولی در خارج از ناحیه دنباله، انسداد در میزان اغتشاشات تأثیر چندانی ندارد. نکته قابل توجه دیگر این است که حداکثر اغتشاشات برای تمام انسدادها در روی مرز دنباله رخ می‌دهد. لازم به ذکر است در نتایج آزمایش‌های انجام گرفته ممکن است روند نتایج حاصله برای یک نسبت انسداد با نتایج بدست آمده برای انسدادهای دیگر متفاوت باشد که این امر ناشی از موازی نبودن دقیق صفحات قرار داده شده می‌باشد.

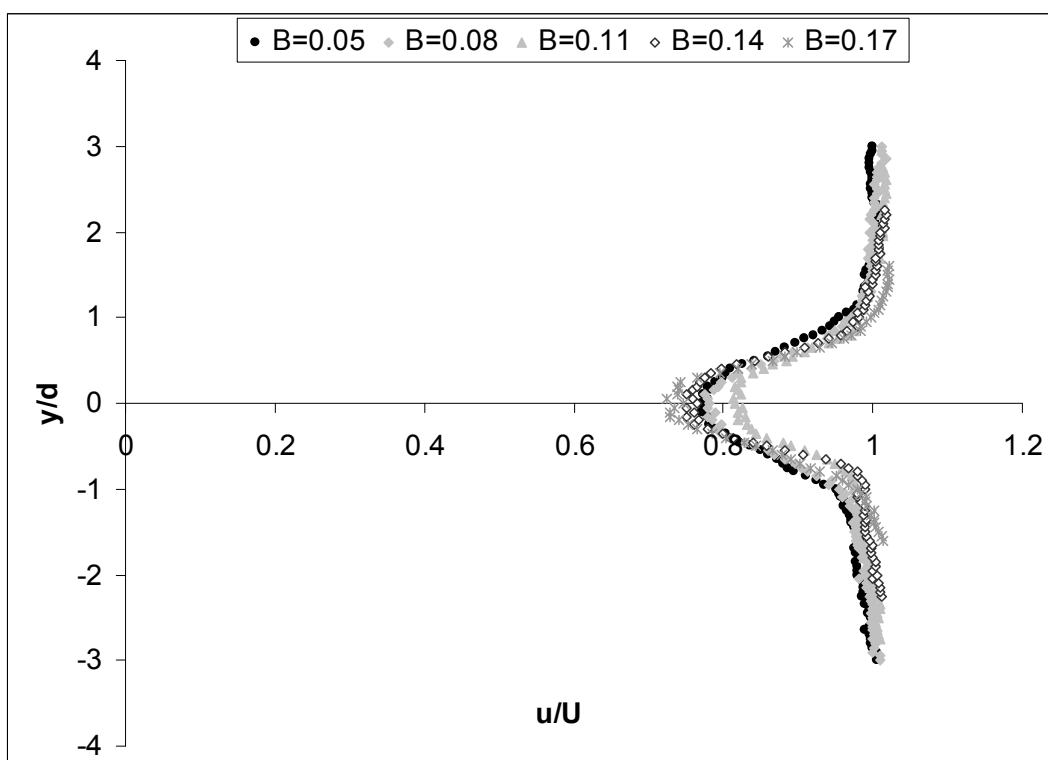


شکل (۶-۳۲): نمودار سرعت متوسط برای انسدادهای مختلف در $x/d=1/5$

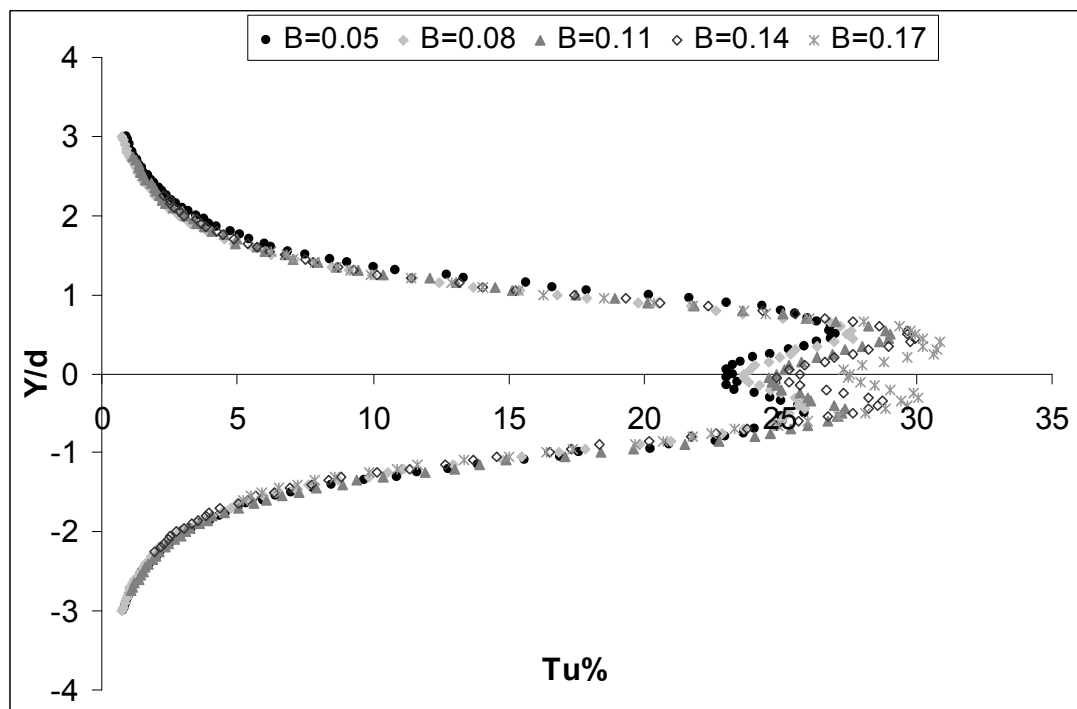


شکل (۶-۳۳): نمودار شدت اغتشاشات برای انسدادهای مختلف در $x/d=1/5$

در شکل (۶-۳۴) پروفیل سرعت متوسط در موقعیت $x/d=3$ نشان داده شده است. در این موقعیت نیز مشاهده می‌کنیم که با افزایش نسبت انسداد سرعت در داخل دنباله کاهش و در خارج دنباله افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌کنیم، پروفیل سرعت متوسط برای نسبت انسداد 0.11 از این الگو پیروی نمی‌کند که ناشی از خطا در قرار دادن صفحات می‌باشد. پروفیل شدت اغتشاشات در همین موقعیت در شکل (۶-۳۵) نشان داده شده است. در این موقعیت نیز مشابه موقعیت قبلی با افزایش نسبت انسداد، شدت اغتشاشات در داخل دنباله افزایش می‌یابد. همچنین در این موقعیت نسبت به موقعیت قبلی شدت اغتشاشات در داخل دنباله یکنواخت‌تر می‌شود.



شکل (۶-۳۴): نمودار سرعت متوسط برای انسدادهای مختلف در $x/d=3$

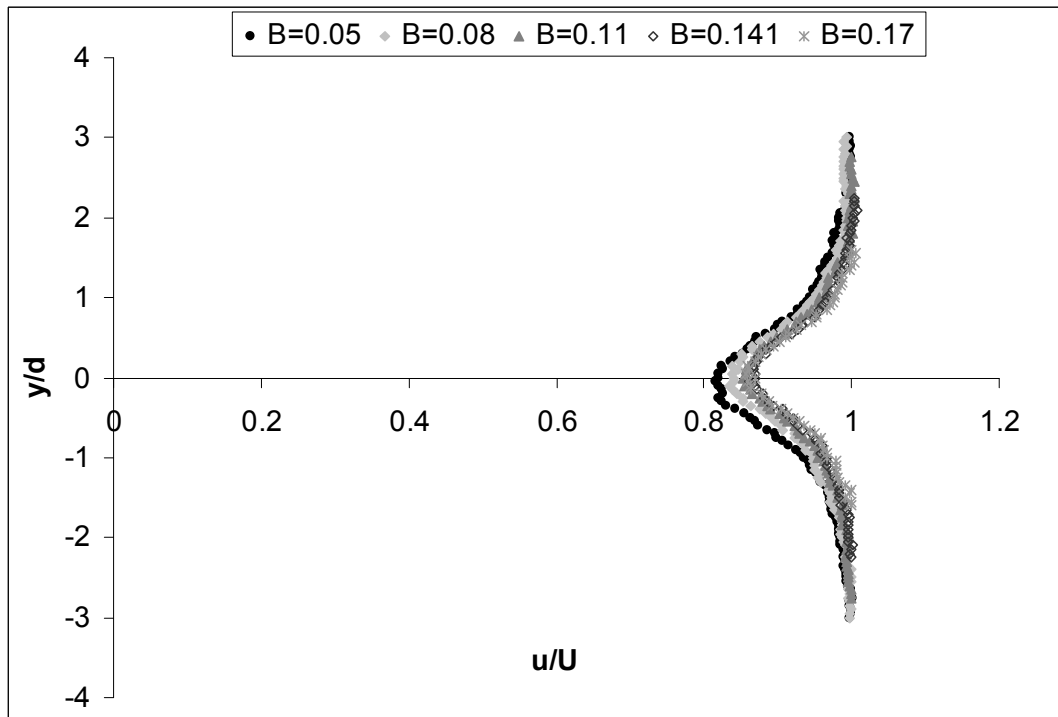


شکل (۶-۳۵): نمودار شدت اغتشاشات برای انسدادهای مختلف در $x/d=3$

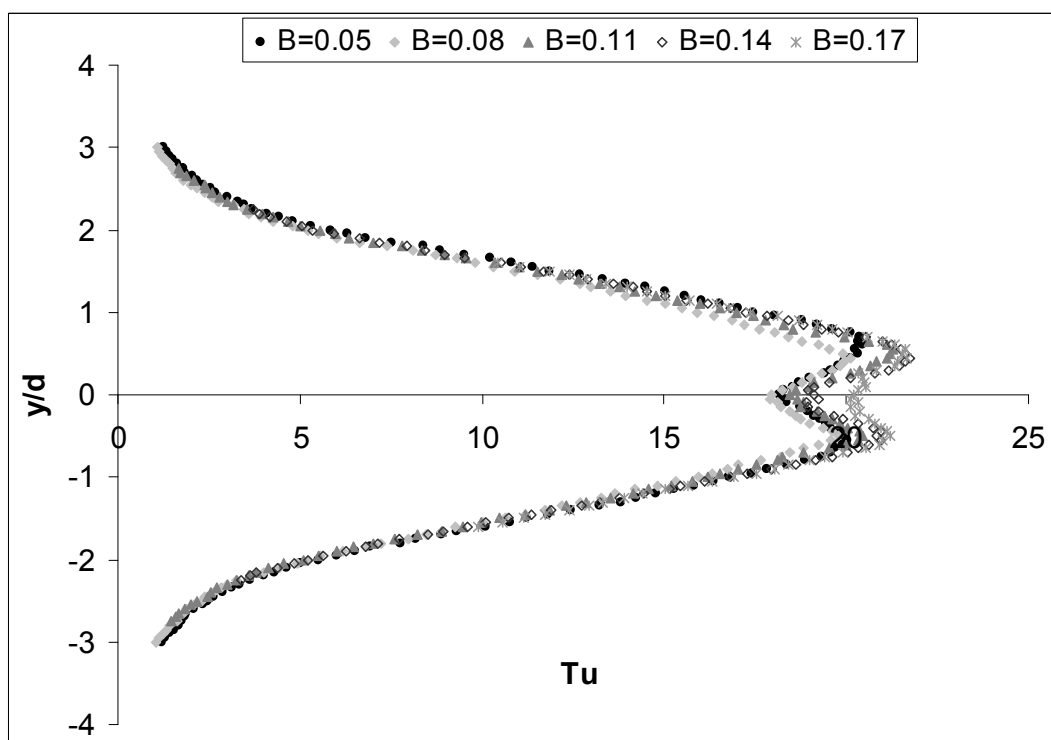
در شکل (۶-۳۶) پروفیل سرعت متوسط در موقعیت $x/d=6$ برای نسبت انسدادهای مختلف نشان داده شده است. در این موقعیت، با افزایش نسبت انسداد سرعت متوسط در داخل افزایش می‌یابد که برعکس موقعیتهای قبلی می‌باشد. که این امر ناشی از نزدیک شدن محل داده‌برداری به انتهای صفحات می‌باشد که اثر منفی بر روی نتایج آزمایشها می‌گذارد. در شکل (۶-۳۷) پروفیل شدت اغتشاشات در موقعیت $x/d=6$ برای نسبت انسدادهای مختلف نشان داده شده است. در این موقعیت نیز مشابه موقعیتهای قبل با افزایش نسبت انسداد، شاهد افزایش شدت اغتشاشات در داخل دنباله هستیم. همچنین با مقایسه شدت

اغتشاشات در سه موقعیت مورد آزمایش مشاهده می‌کنیم که با افزایش فاصله از سیلندر شدت اغتشاشات

در داخل دنباله کاهش می‌یابد.



شکل (۳۶-۶): نمودار سرعت متوسط برای انسدادهای مختلف در $x/d=6$



شکل (۳۷-۶): نمودار شدت اغتشاشات برای انسدادهای مختلف در $x/d=6$

در این آزمایشها بعلت محدودیتهای داده‌برداری نمی‌توان نمودار *velocity defect* و ضریب پسا را به

درستی مشخص نمود. البته هدف این تحقیق، بررسی اثر نسبت انسداد در پروفیل‌های سرعت متوسط و

شدت اغتشاشات دنباله سیلندر دایره‌ای می‌باشد.

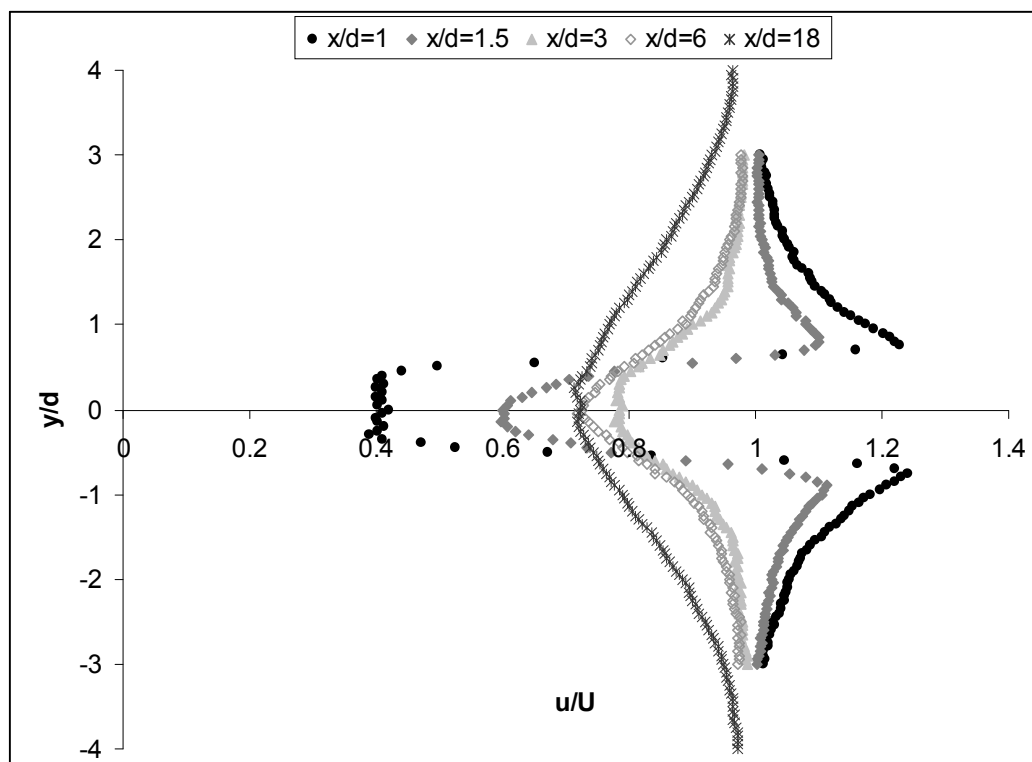
۴-۶) بررسی دنباله سیلندر چرخان

برای بررسی دنباله سیلندر چرخان، پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاشات برای سه موقعیت در پشت سیلندر اندازه‌گیری و در نهایت ضریب پسا محاسبه شده است. نتایج برای چهار حالت دوران سیلندر و چهار عدد رینولدز نشان داده شده است. اعداد رینولدز انتخابی با توجه به مشخصات تونل باد در بازه ۵۹۰۰ تا ۱۷۶۵۰ و دوره‌های سیلندر در بازه ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شده‌اند. با توجه به قطر و سرعت دورانی سیلندر، سرعت خطی سیلندر چرخان در آزمایش‌های انجام گرفته ۱/۰۴۷۱ تا ۳/۱۴۱ متر

بر ثانیه می‌باشد. داده‌برداری برای سه موقعیت طولی ۶، ۳، ۱/۵ x/d و برای ارتفاع (۳، -۳) y/d انجام شده است. از آنجا که با تغییر سرعت جریان هوا (عدد رینولدز) نسبت سرعت هوا و سرعت خطی سیلندر در دوره‌های مختلف تغییر می‌کند و با توجه به تفاوت قابل ملاحظه در پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاشات به ازای اعداد رینولدز مختلف، نتایج آزمایشها در اعداد رینولدز جداگانه نمایش داده شده است. شکل (۶-۳۸) جهت‌های محورهای X و Y و جهت چرخش سیلندر را نشان می‌دهد.

شکل (۶-۳۸): جهت چرخش سیلندر در اتاقک آزمایش

در شکل (۶-۳۹) نمودار سرعت متوسط در موقعیتهای مختلف در پشت سیلندر چرخان در عدد رینولدز ۱۱۷۰۰ و نسبت سرعت (λ) ۲/۶۱۸ نشان داده شده است. همانطور که در نمودار سرعت متوسط برای سیلندر ثابت نیز مشاهده شد، مقدار سرعت در داخل دنباله با افزایش موقعیت از پشت سیلندر ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش موقعیت داده‌برداری، دنباله پهن‌تر و یکنواخت‌تر می‌شود. در مقایسه نسبت به حالت سیلندر ثابت در همان عدد رینولدز مشاهده می‌کنیم که سرعت در داخل دنباله بخصوص در موقعیتهای ابتدائی افزایش یافته است.



شکل (۶-۳۹): پروفیل سرعت متوسط در $Re = 11700$ و $\lambda = 2/618$ برای موقعیتهای مختلف

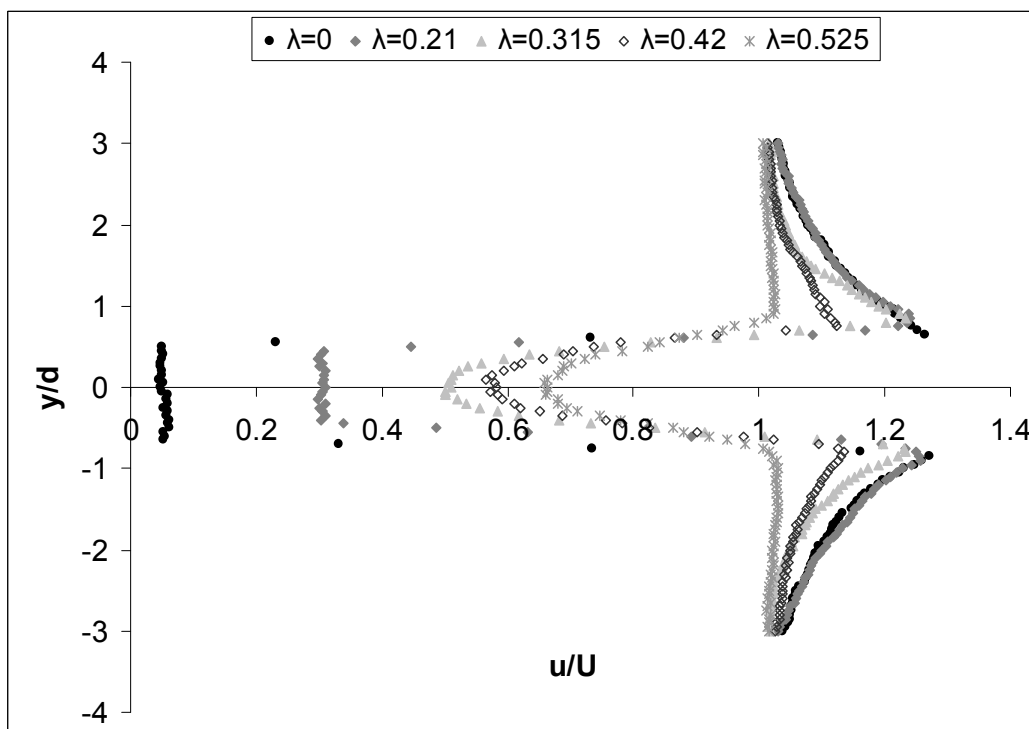
Re=۵۹۰۰ (۶-۴-۱)

با توجه مشخصات تونل باد حداقل سرعت جریان هوای قابل قبول، ۵ متر بر ثانیه انتخاب شده است که با

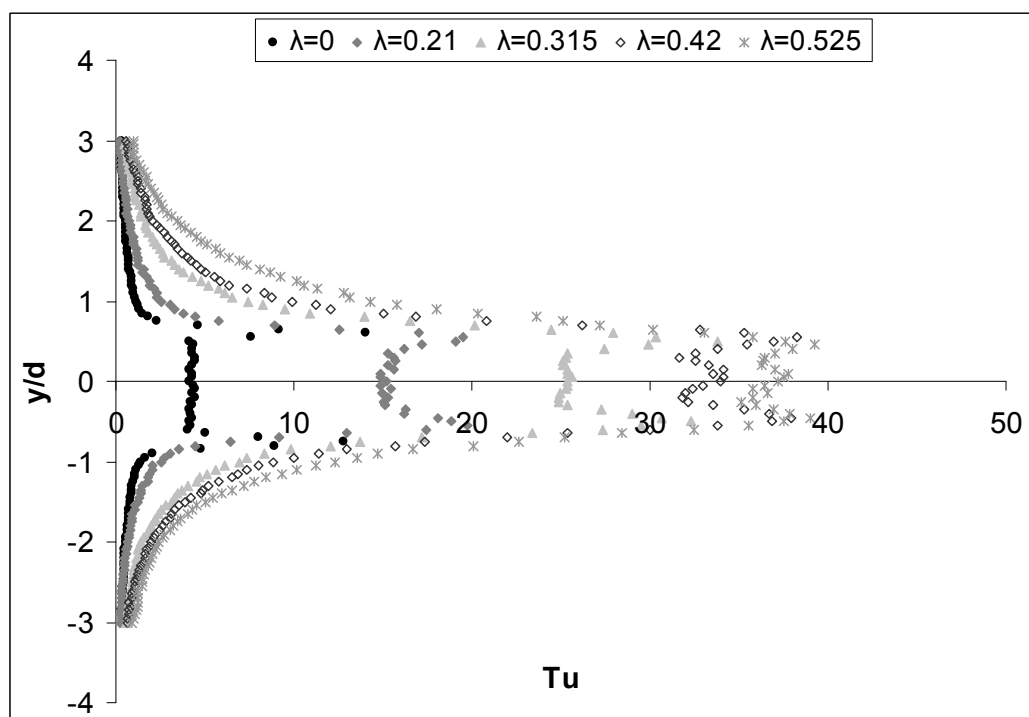
مشخصات سیلندر حداقل عدد رینولدزی که می‌توان در آزمایشها به آن دست پیدا کرد، ۵۹۰۰ می‌باشد. با

توجه به سرعت هوا و سرعت خطی سیلندر، نسبت سرعت (λ) در این آزمایشها، ۰، ۰/۲۱، ۰/۳۱۵، ۰/۴۲،

۰/۵۲۵ تعیین می‌شود. نتایج این آزمایشها در اشکال (۶-۴۰) تا (۶-۴۵) نمایش داده شده است.



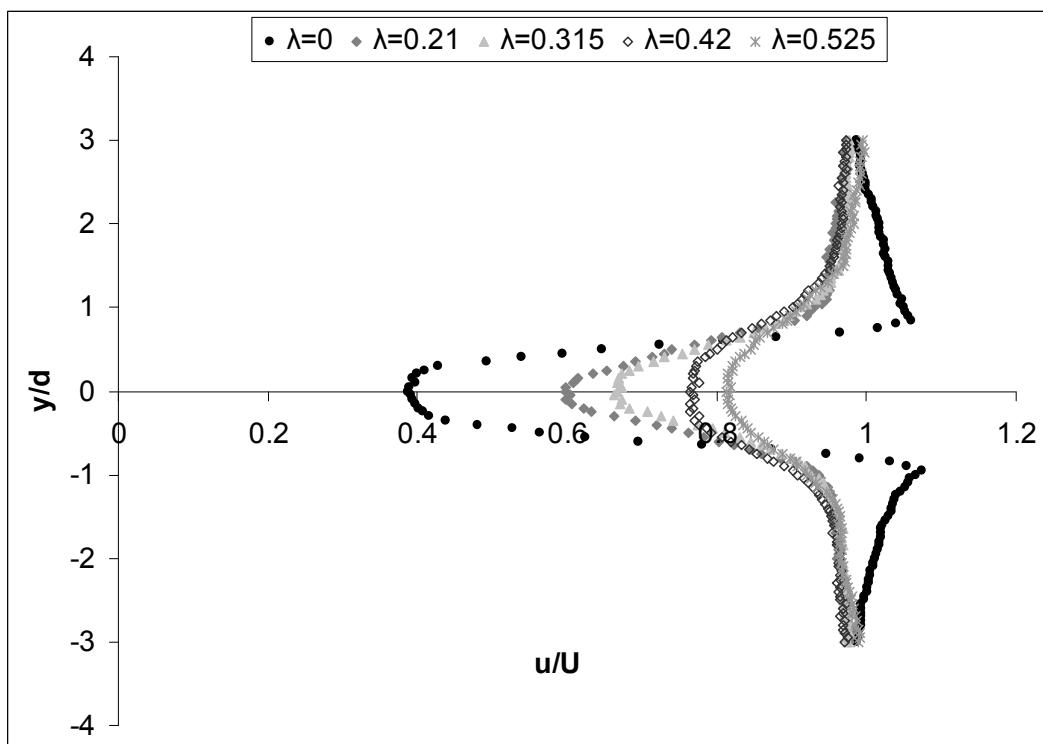
شکل (۴۰-۶): پروفیل سرعت متوسط در سرعت‌های متفاوت برای $Re = 5900$ و $x/d = 1/5$



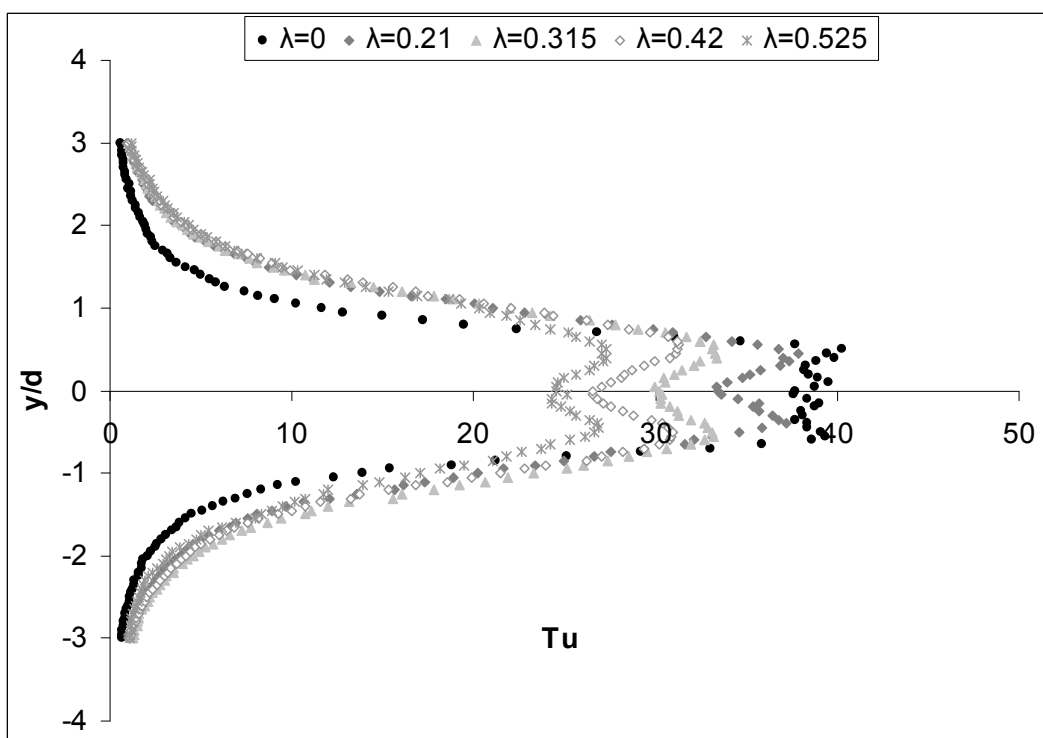
شکل (۴۱-۶): نمودار شدت اغتشاشات در سرعت‌های متفاوت برای $Re = 5900$ و $x/d = 1/5$

در شکل (۴۰-۶) پروفیل سرعت متوسط به ازای λ های متفاوت و در موقعیت $x/d=1/5$ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که دوران سیلندر باعث تغییرات اساسی و مهمی در پروفیل سرعت متوسط می‌شود. دوران سیلندر باعث افزایش سرعت در داخل گردابه و کاهش سرعت در خارج دنباله می‌شود که با افزایش سرعت دورانی سیلندر این تغییرات بیشتر و مشهودتر می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که دوران سیلندر باعث انتقال پروفیل سرعت متوسط در جهت محور y می‌شود که پدیده به علت هم‌جهت بودن سرعت سطح پائینی سیلندر و غیر هم‌جهت بودن سطح بالائی سیلندر با نسبت به جهت جریان هوا می‌باشد که باعث انتقال پروفیل سرعت متوسط به سمت مثبت محور y شده است.

در شکل (۴۱-۶) نمودار شدت اغتشاشات به ازای λ های متفاوت در $x/d=1/5$ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دوران سیلندر، شدت اغتشاشات دنباله افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار شدت اغتشاشات، افزایش سرعت دوران سیلندر باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در اغتشاشات داخل دنباله می‌شود. همچنین در حالتیکه سیلندر ثابت بوده و در سرعت‌های دورانی سیلندر نمودار شدت اغتشاشات دارای دو مقدار ماکسیمم در نزدیکی مرز دنباله می‌باشد ولی در نسبت‌های سرعت بالاتر ($0/42$ و $0/525$) در پروفیل شدت اغتشاشات علاوه بر دو مقدار بیشینه قبلی، یک مقدار بیشینه دیگر در مرکز دنباله روی می‌دهد که ناشی از تغییر در مشخصه و وضعیت گردابه‌های تشکیل شده در پشت سیلندر می‌باشد.



شکل (۶-۴۲): پروفیل سرعت متوسط در سرعت‌های متفاوت برای $Re = 5900$ و $x/d = 3$



شکل (۶-۴۳): نمودار شدت اغتشاشات در سرعت‌های متفاوت برای $Re = 5900$ و $x/d = 3$

پروفیل‌های سرعت متوسط در موقعیت $x/d=3$ برای نسبتهای سرعتی مختلف (شکل (۶-۴۲))، نتایج

بدست آمده برای موقعیت $x/d=1/5$ را تأیید می‌کند. در این موقعیت نیز با افزایش نسبت سرعتی (λ)،

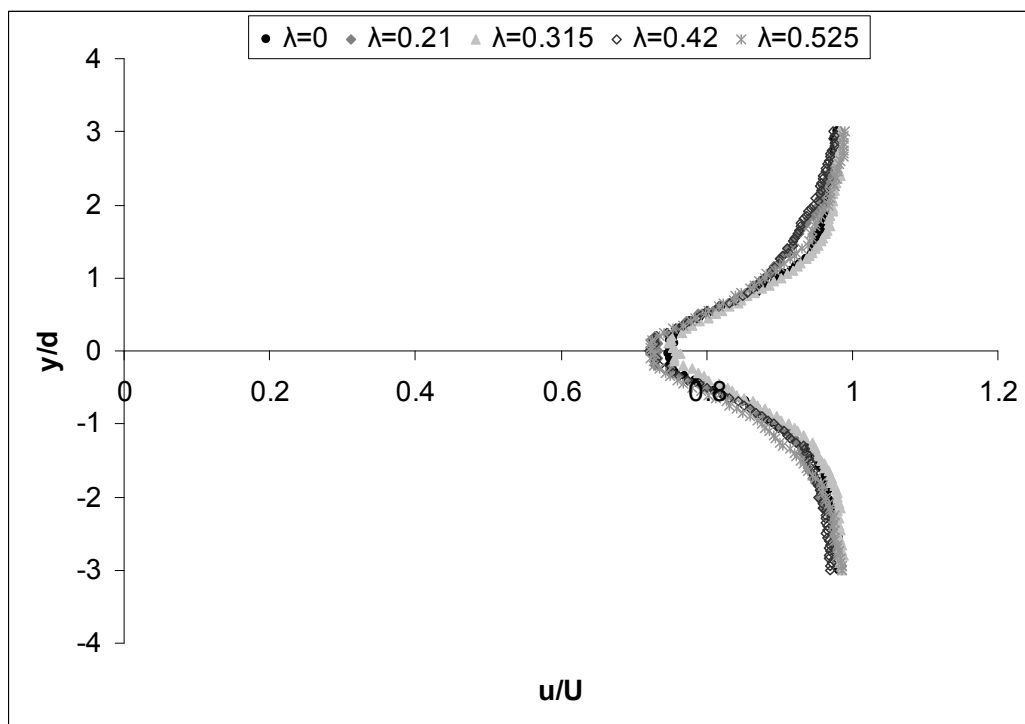
سرعت در داخل دنباله افزایش می‌یابد و نمودار یکنواخت‌تر می‌شود.

نمودار شدت اغتشاشات در موقعیت $x/d=3$ (شکل (۶-۴۳)) نشان می‌دهد در این موقعیت با توجه به

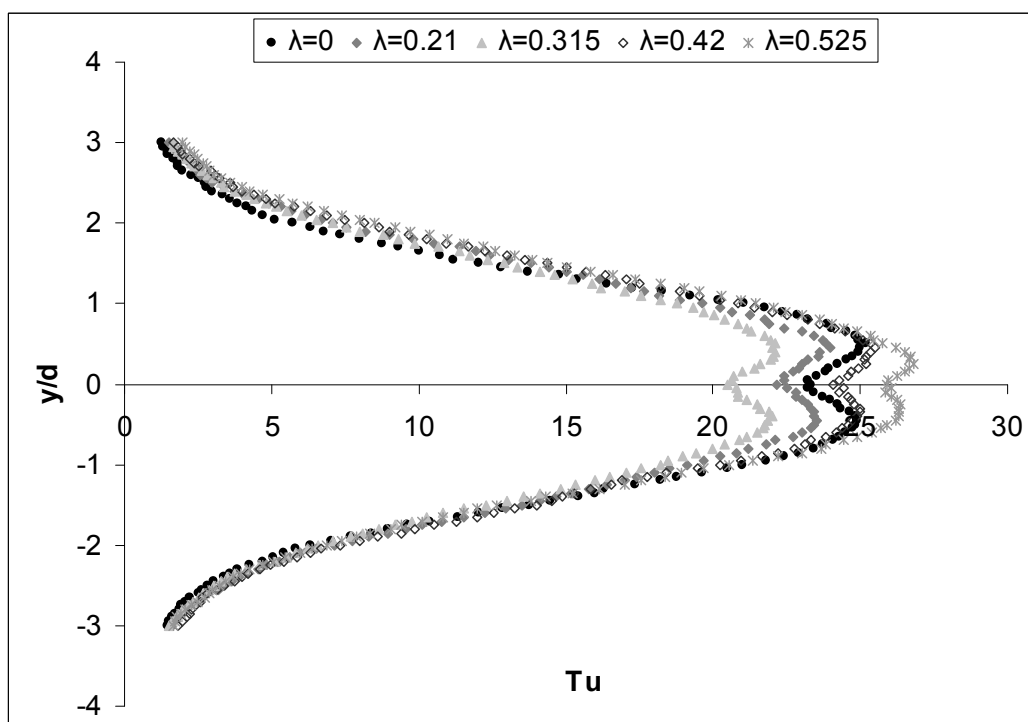
وضعیت گردابه‌ها در پشت سیلندر با افزایش سرعت دورانی سیلندر کاهش می‌یابد که این بر خلاف

نمودارهای شدت اغتشاشات در موقعیت قبلی می‌باشد. همانطور که قبلاً توضیح داده شد علت این امر

وجود نقطه عطف در نمودار شدت اغتشاشات می‌باشد.



شکل (۴۴-۶): پروفیل سرعت متوسط در سرعت‌های متفاوت برای $Re=5900$ و $x/d=6$



شکل (۴۵-۶): نمودار شدت اغتشاشات در سرعت‌های متفاوت برای $Re=5900$ و $x/d=6$

در شکل (۴۴-۶) پروفیل سرعت متوسط در نسبتهای سرعت مختلف برای موقعیت $x/d=6$ نشان داده شده است. در این موقعیت، پروفیلهای سرعت مشابه می باشند و تفاوت های موجود در دو موقعیت قبل در اینجا مشاهده نمی شود. در این موقعیت به نظام مشخصی برای پروفیلهای سرعت متوسط در دوره های مختلف برخورد نمی کنیم. همانطور که در بخش اول نیز توضیح داده شد، این موضوع به علت وضعیت خاص موقعیت $x/d=6$ می باشد که در آن موقعیت، پروفیلهای سرعت متوسط تغییر روند می دهند.

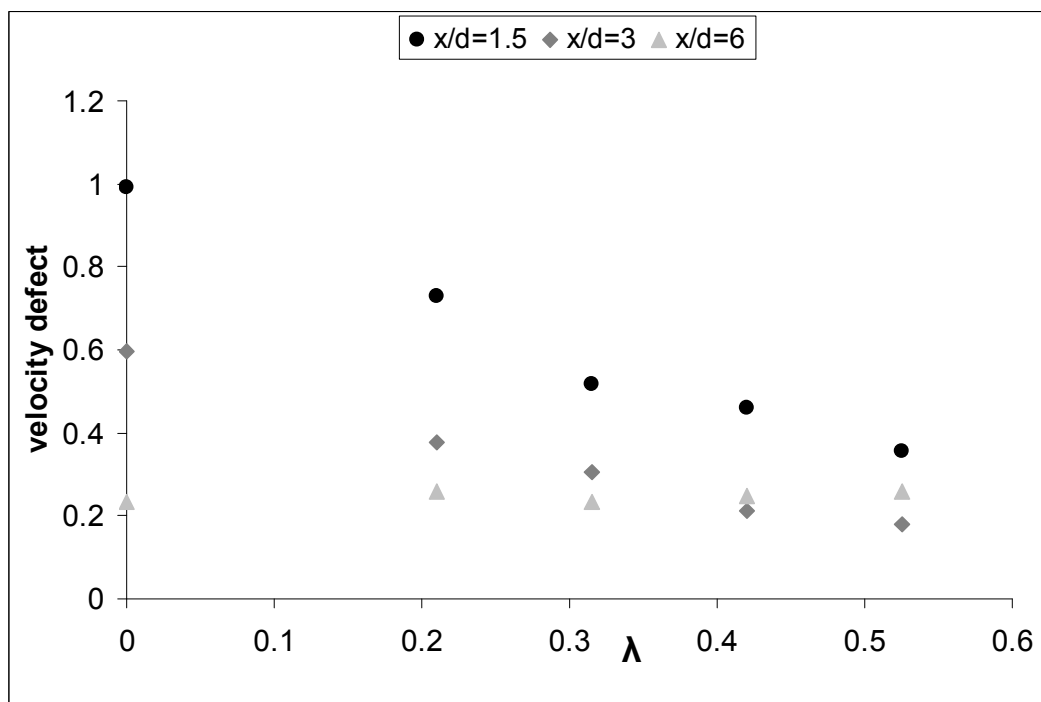
نمودار شدت اغتشاشات در موقعیت $x/d=6$ (شکل (۴۵-۶)) نشان می دهد که در این موقعیت، در 0.21 و $\lambda = 0.315$ نسبت به حالت سیلندر ثابت اغتشاشات کاهش و در 0.42 و $\lambda = 0.525$ افزایش می یابد. با توجه به نمودار شدت اغتشاشات در موقعیتهای قبلی نتیجه می گیریم که افزایش سرعت دورانی سیلندر در این موقعیت، باعث افزایش شدت اغتشاشات شده است. در این موقعیت به نظام مشخصتری از نمودار شدت اغتشاشات برخورد می کنیم و نمودار شدت اغتشاشات برای سرعت دورانه های مختلف مشابه هم می باشند.

در شکل (۴۶-۶) نمودار *velocity defect* بر حسب λ در موقعیتهای مختلف نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که در موقعیتهای ۳ و $x/d=1/5$ ، با افزایش λ پارامتر *velocity defect* کاهش می یابد که البته با دور شدن از سیلندر کاهش این پارامتر نیز کمتر می شود. در موقعیت $x/d=6$ با افزایش سرعت دورانی سیلندر *velocity defect* بسته به مقدار λ افزایش و یا کاهش می یابد.

همانطور که در نمودار پروفیل سرعت متوسط برای این موقعیت نیز توضیح داده شد بعلاوه تغییر در

پروفیل‌های سرعت متوسط، در این موقعیت نظام مشخصی برای مقدار پارامتر *velocity defect* مشاهده

نمی‌شود.



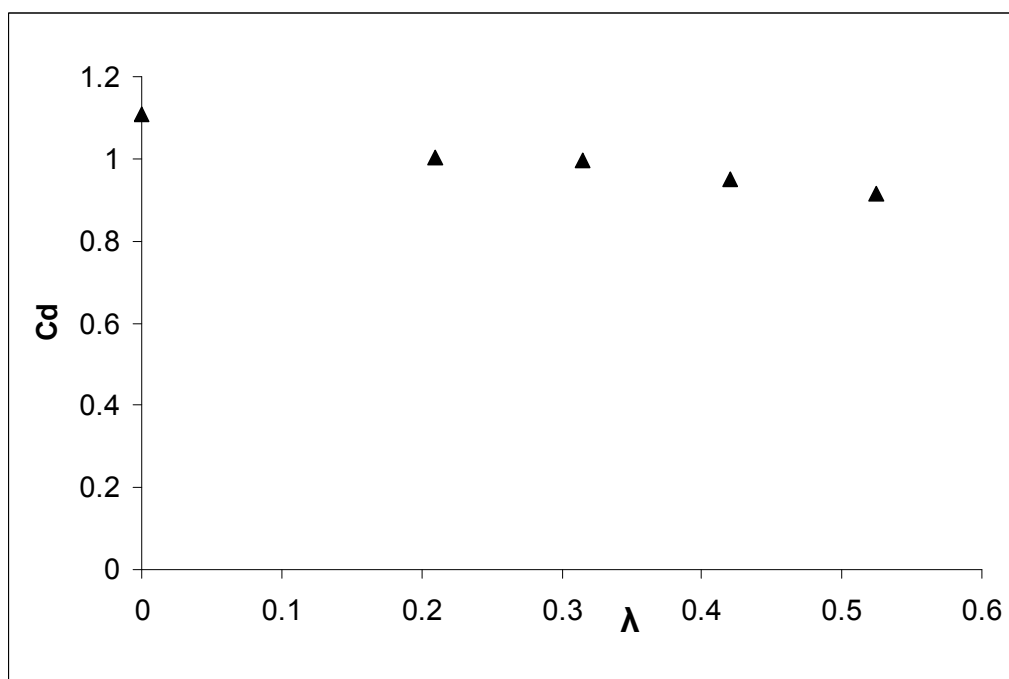
شکل (۴۶-۶): نمودار *velocity defect* در نسبتهای سرعت مختلف برای $Re=5900$

نمودار ضریب پسا بر حسب مقدار λ در شکل (۴۷-۶) نشان داده شده است. ضریب پسا با استفاده از

رابطه (۳۲-۵) و در موقعیت $x/d=18$ محاسبه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد دوران سیلندر

باعث کاهش ضریب پسای سیلندر ثابت می‌شود. همچنین با افزایش سرعت دورانی سیلندر، ضریب پسا

کاهش می‌یابد.



شکل (۴۷-۶): نمودار ضریب پسا بر حسب λ در $Re=5900$

Re=9400 (۶-۴-۲)

در این بخش سرعت جریان ۸ متر بر ثانیه انتخاب شده است که با مشخصات سیلندر، عدد رینولدز ۹۴۰۰

می‌باشد. با توجه به سرعت جریان هوا و سرعت خطی سیلندر، λ در این آزمایشها، ۰، ۰/۱۳۱، ۰/۱۹۶،

۰/۲۶۱، ۰/۳۲۷ تعیین می‌شود. نتایج این آزمایشها در اشکال (۶-۴۸) تا (۶-۵۵) نمایش داده شده است.

نتیجه بدست آمده در این آزمایشها مانند نتایج بدست آمده در بخش الف (برای عدد رینولدز ۵۹۰۰)

می‌باشد که به علت افزایش جریان سیال و وجود نسبتهای سرعتی کوچکتر از بخش قبل، تغییراتی در این

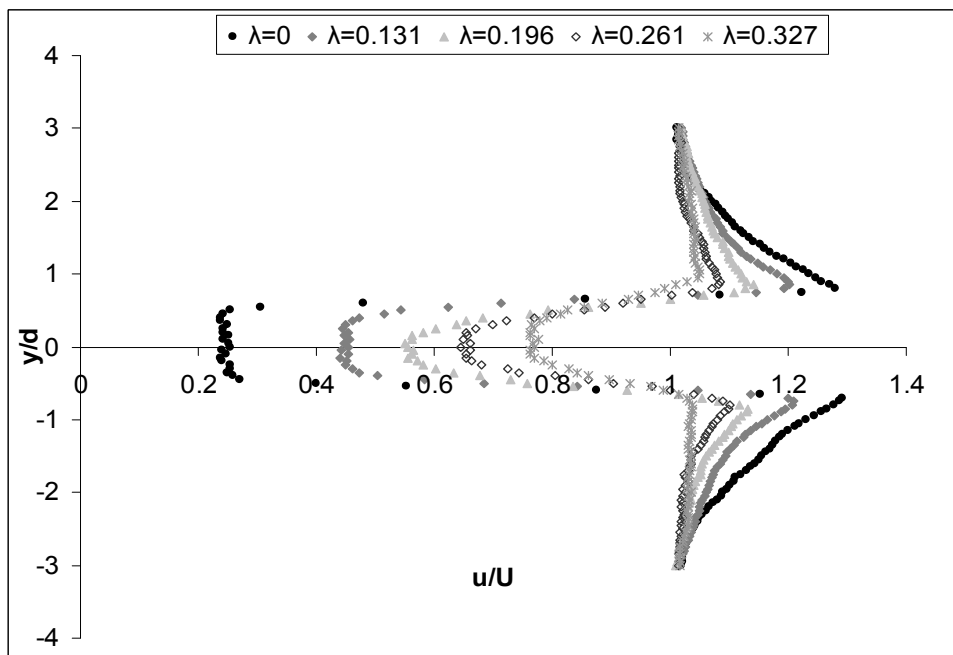
نتایج حاصل شده است.

در شکل (۴۸-۶) پروفیل سرعت متوسط به ازای λ های متفاوت و در موقعیت $x/d=1/5$ در عدد رینولدز ۹۴۰۰ نشان داده شده است. در این عدد رینولدز (همانند عدد رینولدز ۵۹۰۰) نتایج نشان می‌دهد که دوران سیلندر باعث افزایش سرعت در داخل گردابه و کاهش سرعت در خارج دنباله می‌شود که با افزایش سرعت دورانی سیلندر این تغییرات بیشتر می‌شود. در نتایج بدست آمده به علت هم‌جهت بودن سرعت سطح پائینی سیلندر با سرعت سیال و غیرهم‌جهت بودن سطح بالائی سیلندر نسبت به جهت جریان هوا در دوره‌های مختلف سیلندر شاهد انتقال پروفیل سرعت متوسط در جهت مثبت محور y هستیم.

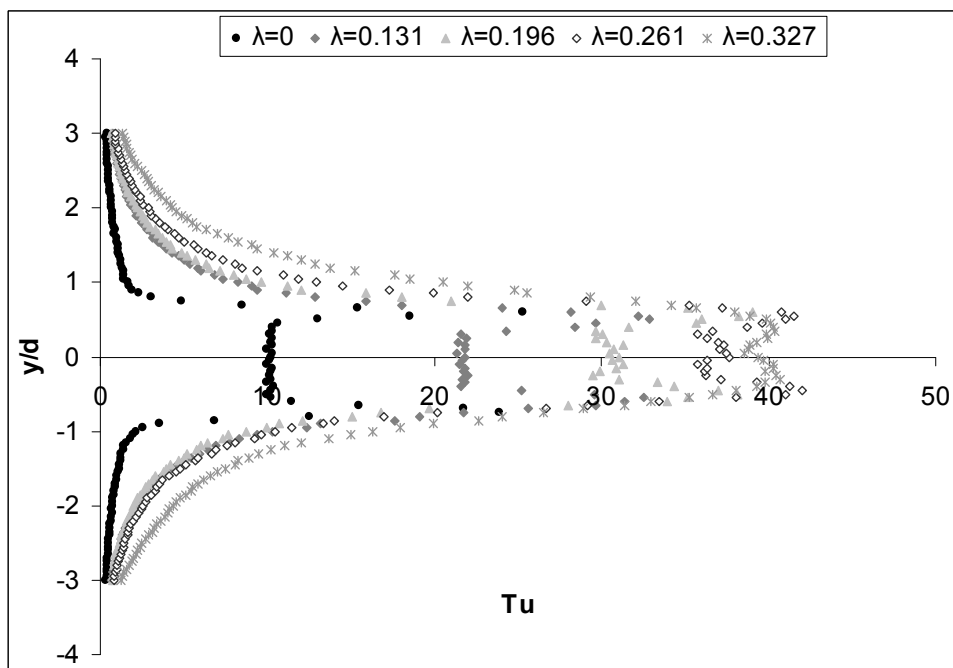
در شکل (۴۹-۶) نمودار شدت اغتشاشات به ازای λ های متفاوت در $x/d=1/5$ برای عدد رینولدز ۹۴۰۰ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دوران سیلندر، شدت اغتشاشات افزایش می‌یابد. این افزایش شدت اغتشاشات هم در داخل و هم در روی مرز دنباله روی می‌دهد. همچنین با افزایش سرعت دورانی سیلندر نسبت به سیلندر ثابت تغییرات اساسی و مهمی در شکل نمودار شدت اغتشاشات شاهد هستیم. در حالتیکه سیلندر ثابت بوده و در سرعت‌های دورانی پائین سیلندر ($\lambda=0/131$)، نمودار شدت اغتشاشات دارای دو مقدار ماکزیمم در نزدیکی مرز دنباله می‌باشد ولی در نسبت‌های سرعت بالاتر ($\lambda=0/196$ ، $0/261$ ، $0/327$) در پروفیل شدت اغتشاشات علاوه بر دو مقدار بیشینه قبلی، یک مقدار بیشینه دیگر در مرکز دنباله روی می‌دهد که ناشی از تغییر در مشخصه و وضعیت گردابه‌های تشکیل شده در پشت سیلندر می‌باشد. همانطور که برای پروفیل سرعت در موقعیت

$x/d=1/5$ توضیح داده شد، در نمودار شدت اغتشاشات نیز به علت دوران سیلندر نمودار شدت اغتشاشات

به سمت مثبت محور y متمایل می‌شود.

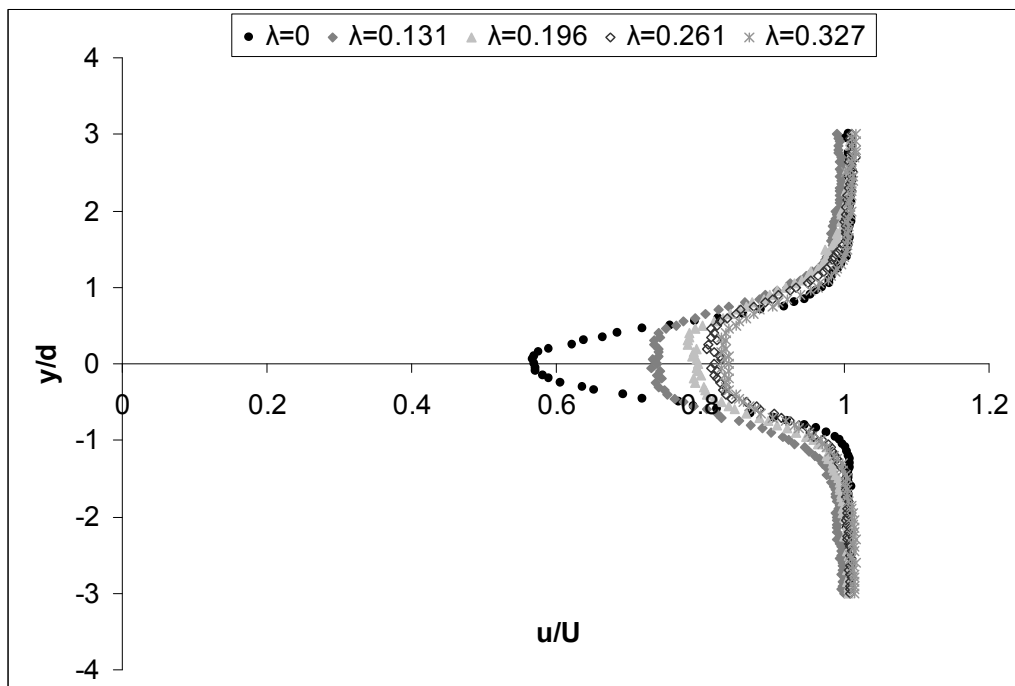


شکل (۴۸-۶): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 9400$ و $x/d=1/5$



شکل (۴۹-۶): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 9400$ و $x/d = 1/5$

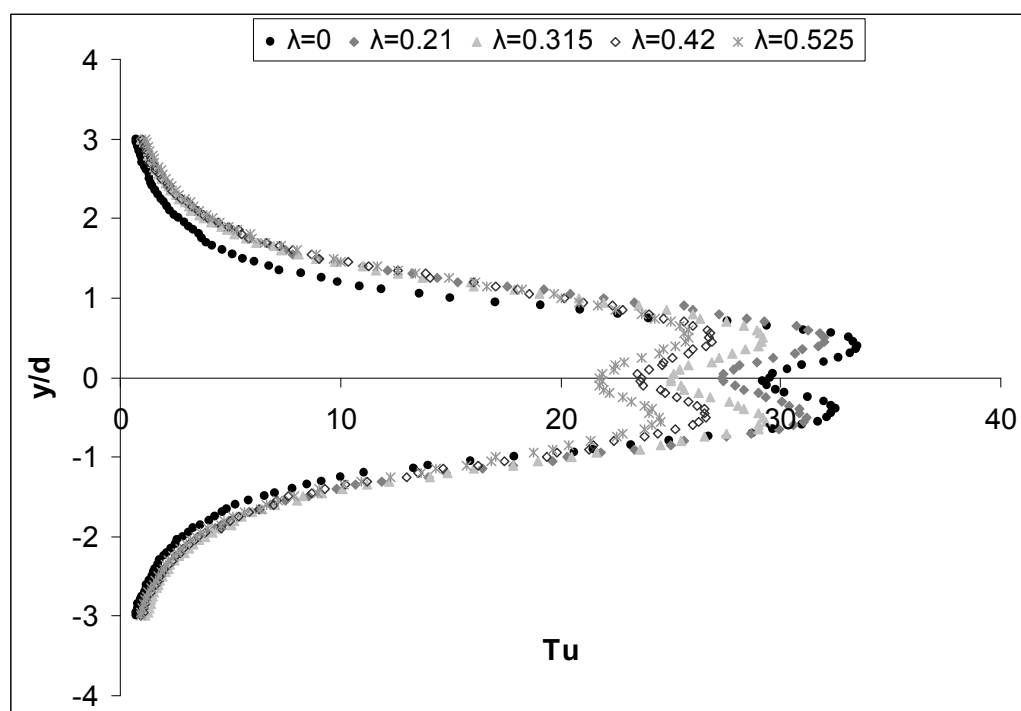
پروفیل‌های سرعت متوسط در موقعیت $x/d = 3$ برای نسبت‌های سرعتی مختلف (شکل (۵۰-۶))، نتایج بدست آمده برای موقعیت $x/d = 1/5$ را تأیید می‌کند. در این موقعیت نیز با افزایش نسبت سرعتی (λ)، سرعت در داخل دنباله افزایش می‌یابد و نمودار یکنواخت‌تر می‌شود.



شکل (۵۰-۶): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 9400$ و $x/d = 3$

در شکل (۵۱-۶) نمودار شدت اغتشاشات به ازای نسبت‌های سرعت متفاوت در $x/d = 1/5$ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد دوران سیلندر باعث تغییراتی در نمودار شدت اغتشاشات دنباله سیلندر می‌شود. در این موقعیت با توجه به وضعیت گردابه‌های خارج شده از پشت سیلندر، با افزایش سرعت دورانی شدت اغتشاشات در داخل دنباله کاهش می‌یابد که برخلاف موقعیت $x/d = 1/5$ می‌باشد. با

این وجود شدت اغتشاشات در روی مرز دنباله مانند موقعیت قبل می‌باشد و دوران سیلندر باعث افزایش اغتشاشات در روی مرز دنباله می‌شود. علت این پدیده را می‌توان به وابستگی زیاد شدت اغتشاشات روی مرز دنباله به دوران سطح سیلندر نسبت داد. در دوران روی سطح سیلندر شدت اغتشاشات وابستگی کمی به موقعیت و وضعیت سیلندر دارد. در این موقعیت نیز دوران سیلندر باعث جابجایی نمودار شدت اغتشاشات به سمت مثبت محور y می‌شود.

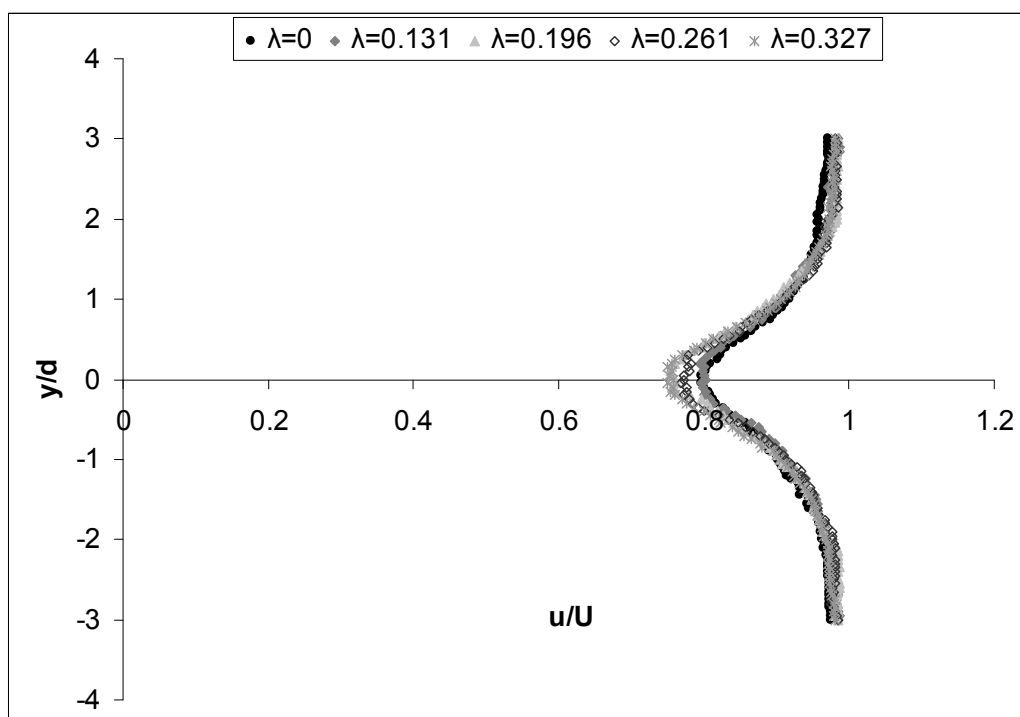


شکل (۵۱-۶): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 9400$ و $x/d = 3$

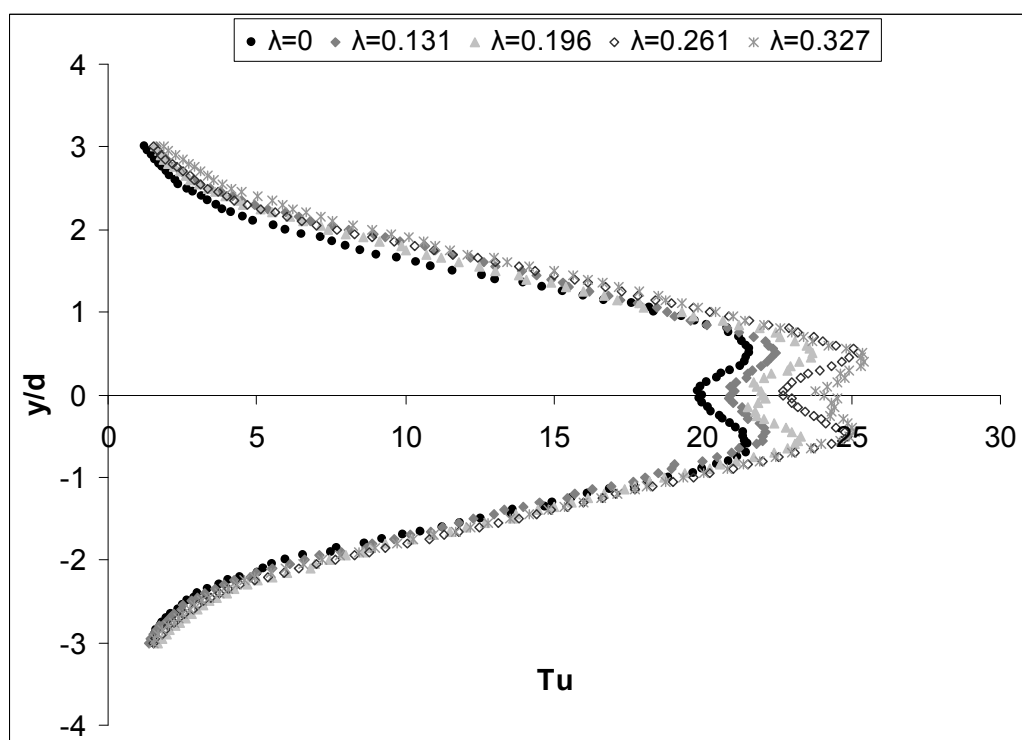
در شکل (۵۲-۶) پروفیل سرعت متوسط در نسبت‌های سرعت مختلف برای موقعیت $x/d = 6$ نشان داده شده است. در این موقعیت، شکل پروفیل‌های سرعت مشابه همدیگر می‌باشد و تفاوت‌های موجود در دو موقعیت

قبل در اینجا مشاهده نمی‌شود. در این موقعیت برعکس دو موقعیت قبلی شاهد کاهش سرعت در داخل دنباله با افزایش سرعت دورانی سیلندر هستیم. اگر پروفیل سرعت متوسط در موقعیتهای دور از سیلندر را اندازه‌گیری کنیم، مشاهده می‌کنیم که با افزایش سرعت دورانی سرعت در داخل دنباله افزایش یافته و اختلاف سرعت در داخل و خارج کم می‌شود که باعث کاهش در مقدار ضریب پسا و پارامتر *velocity defect* می‌شود.

نمودار شدت اغتشاشات در موقعیت $x/d=6$ (شکل (۵۳-۶)) نشان می‌دهد که در این موقعیت، با افزایش سرعت دورانی شدت اغتشاشات افزایش می‌یابد که این افزایش هم در داخل و هم در خارج سیلندر روی می‌دهد. همچنین در این موقعیت به نظام مشخصتری مواجه هستیم و نمودار شدت اغتشاشات در سرعت دورانی مختلف مشابه هم هستند.



شکل (۶-۵۲): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 9400$ و $x/d = 6$



شکل (۶-۵۳): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 9400$ و $x/d = 6$

در شکل (۵۴-۶) نمودار *velocity defect* بر حسب λ در موقعیتهای مختلف نشان داده شده است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در موقعیتهای ۳ و $x/d=1/5$ ، با افزایش λ پارامتر *velocity*

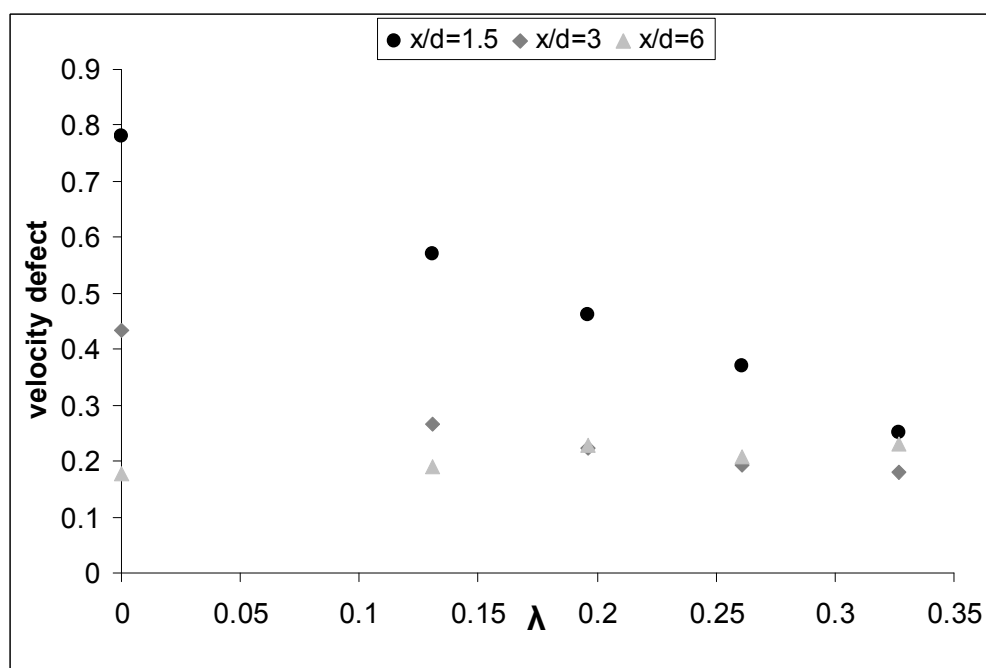
defect کاهش می‌یابد که البته با دور شدن از سیلندر کاهش این پارامتر نیز کمتر می‌شود. در موقعیت

$x/d=6$ با افزایش سرعت دورانی سیلندر *velocity defect* بسته به مقدار λ افزایش و یا کاهش می‌یابد.

همانطور که در نمودار پروفیل سرعت متوسط برای این موقعیت نیز توضیح داده شد بعلت تغییر در

پروفیل‌های سرعت متوسط، در این موقعیت نظام مشخصی برای مقدار پارامتر *velocity defect* مشاهده

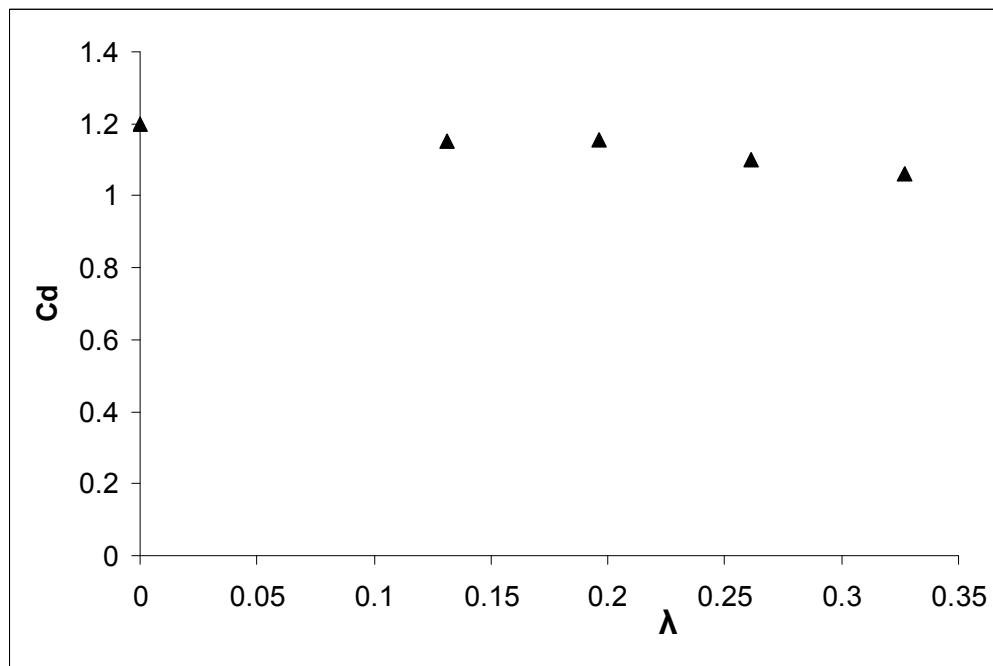
نمی‌شود.



شکل (۵۴-۶): نمودار *velocity defect* در نسبتهای سرعت مختلف برای $Re = 9400$

در شکل (۶-۵۵) نمودار ضریب پسا برای نسبتهای سرعت متفاوت در عدد رینولدز ۹۴۰۰ رسم شده است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با افزایش سرعت دورانی سیلندر ضریب پسا کاهش می‌یابد.



شکل (۶-۵۵): نمودار ضریب پسا بر حسب λ در $Re=9400$

۳-۴-۶ $Re=11800$

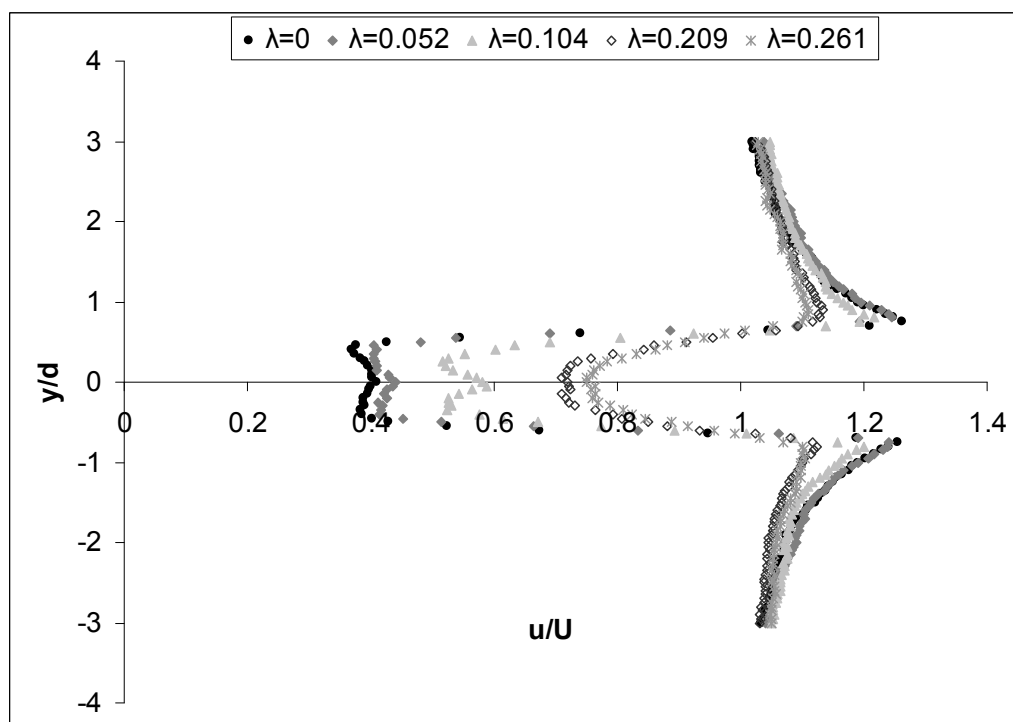
برای دستیابی به عدد رینولدز ۱۱۸۰۰ با توجه به مشخصه‌های سیال و قطر سیلندر، سرعت جریان هوا

۱۰ متر بر ثانیه انتخاب می‌شود. با توجه به سرعت جریان هوا و سرعت خطی سیلندر، λ در این آزمایشها،

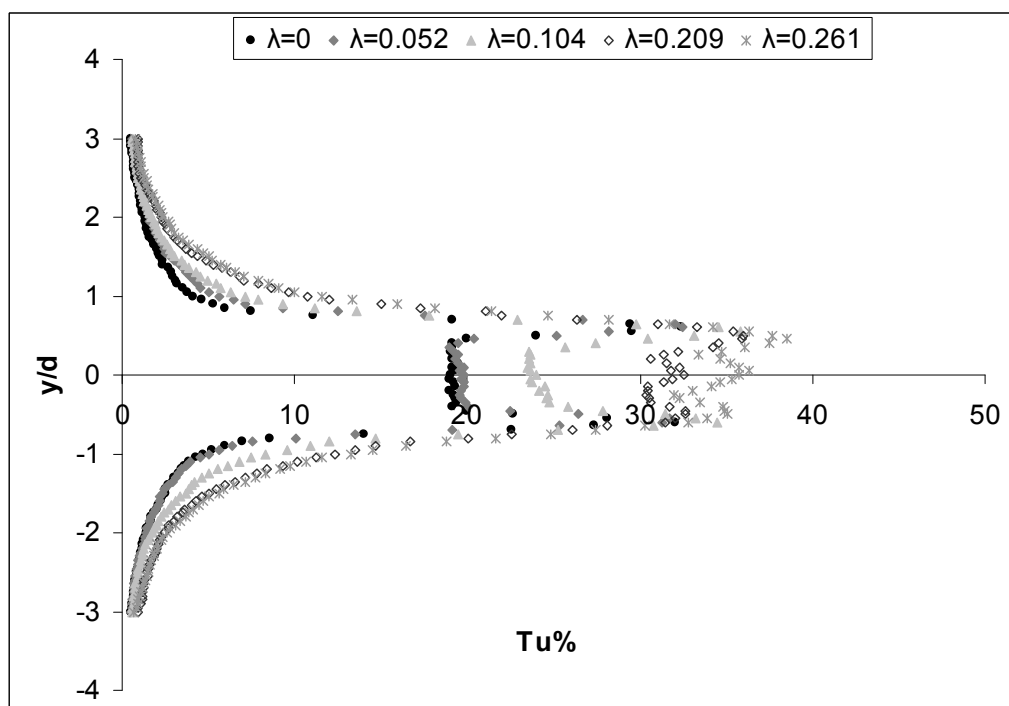
۰، ۰/۰۵۲، ۰/۱۰۴، ۰/۲۰۹، ۰/۲۶۱ تعیین می‌شود. نتایج این آزمایشها در اشکال (۶-۵۶) تا (۶-۶۳)

نمایش داده شده است.

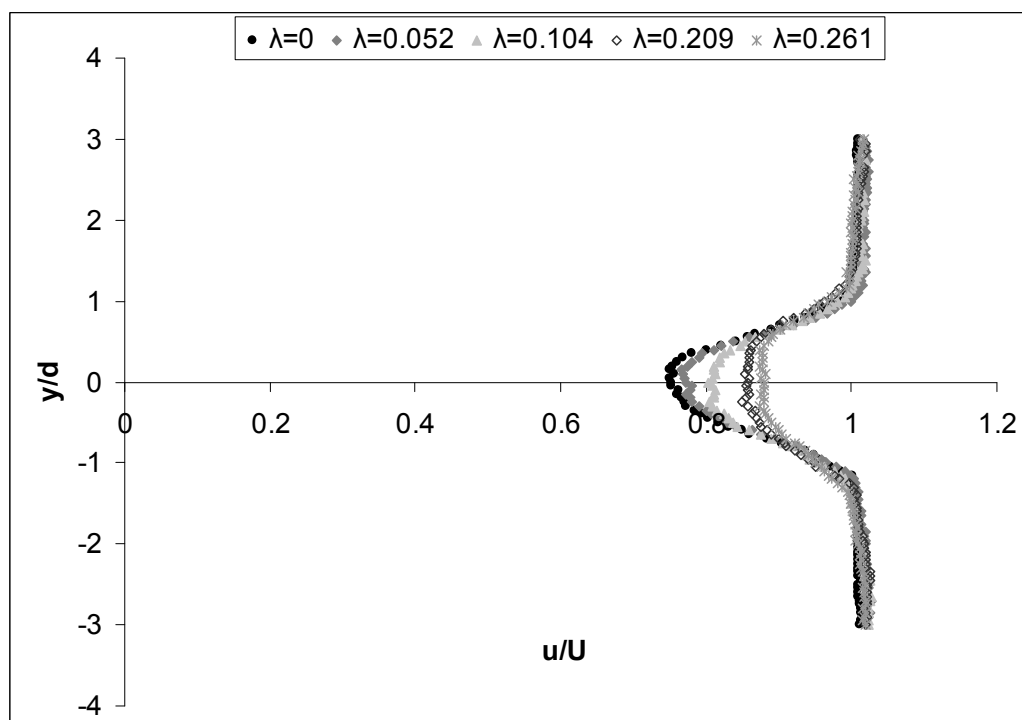
با توجه به مشابه بودن نتایج این عدد رینولدز نسبت به اعداد رینولدز قبلی، از ارائه توضیحات برای اشکال صرفنظر شده است.



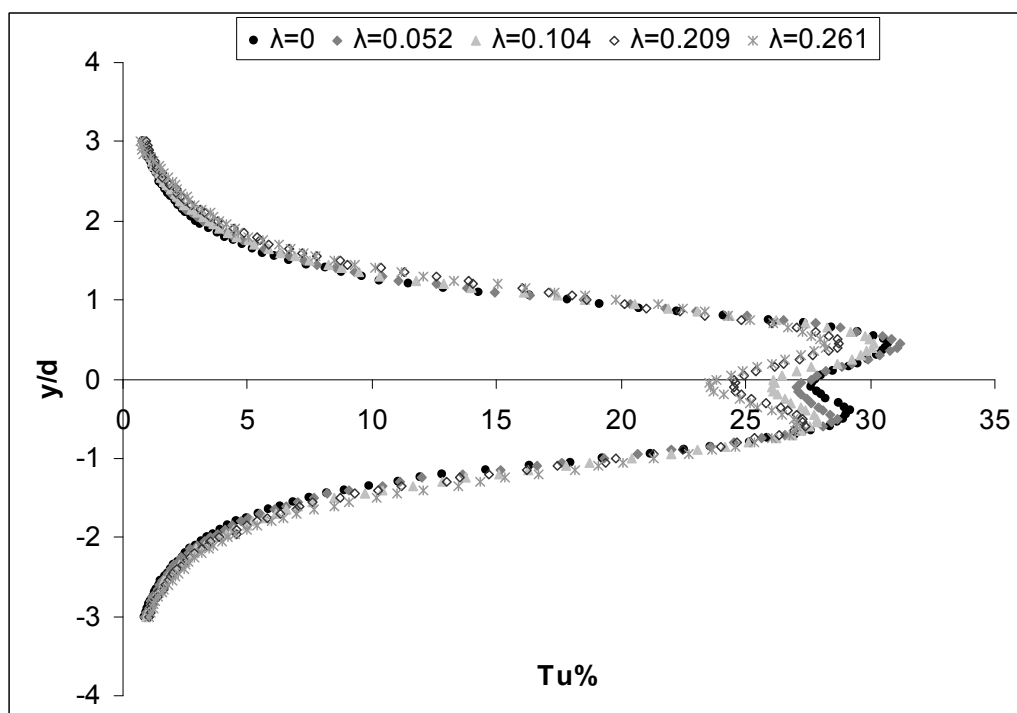
شکل (۵۶-۶): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 11800$ و $x/d = 1/5$



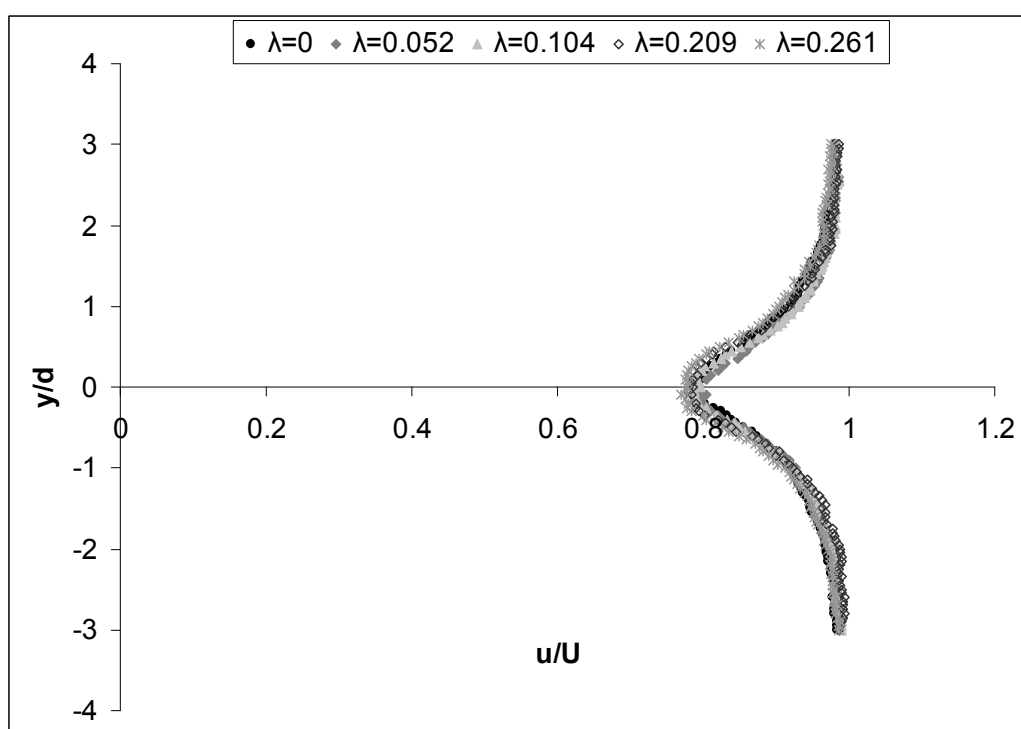
شکل (۵۷-۶): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 11800$ و $x/d = 1/5$



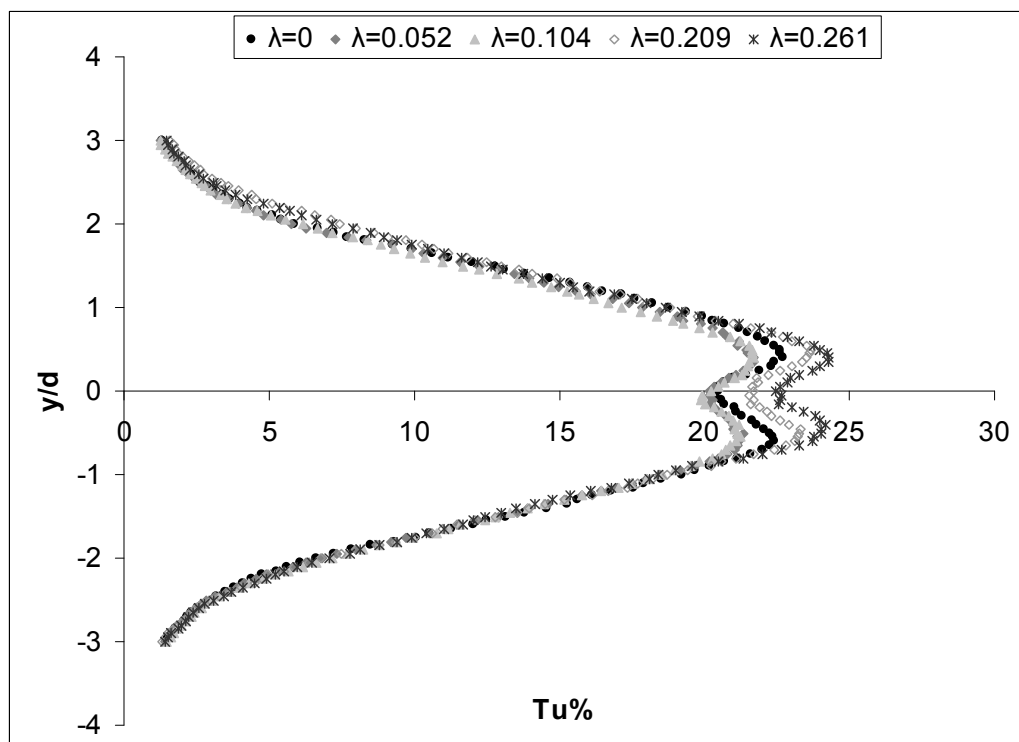
شکل (۵۸-۶): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 11800$ و $x/d = 3$



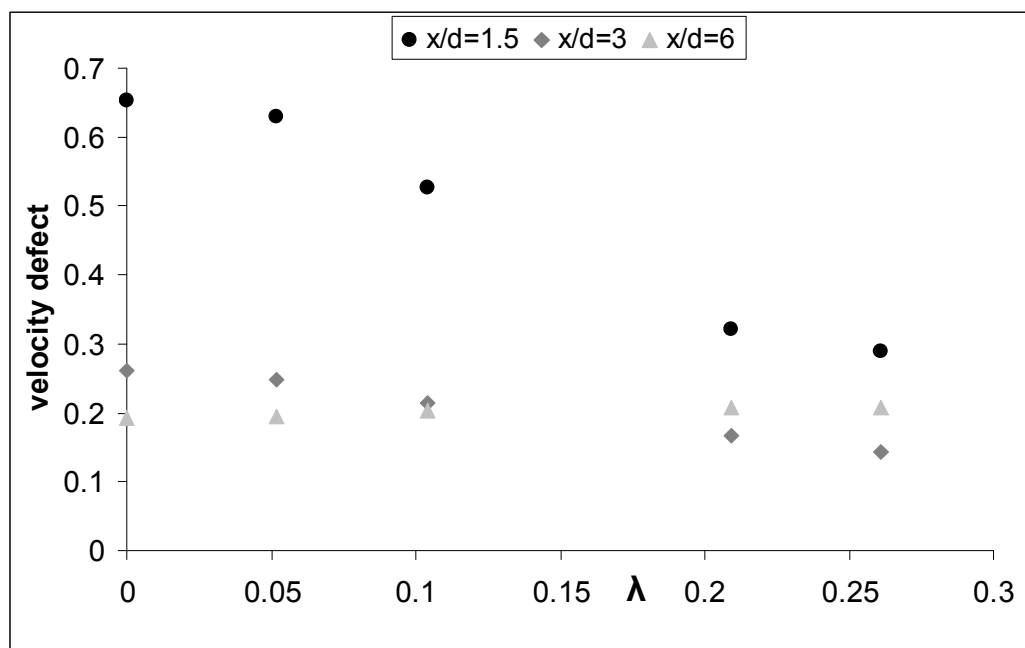
شکل (۵۹-۶): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 11800$ و $x/d = 3$



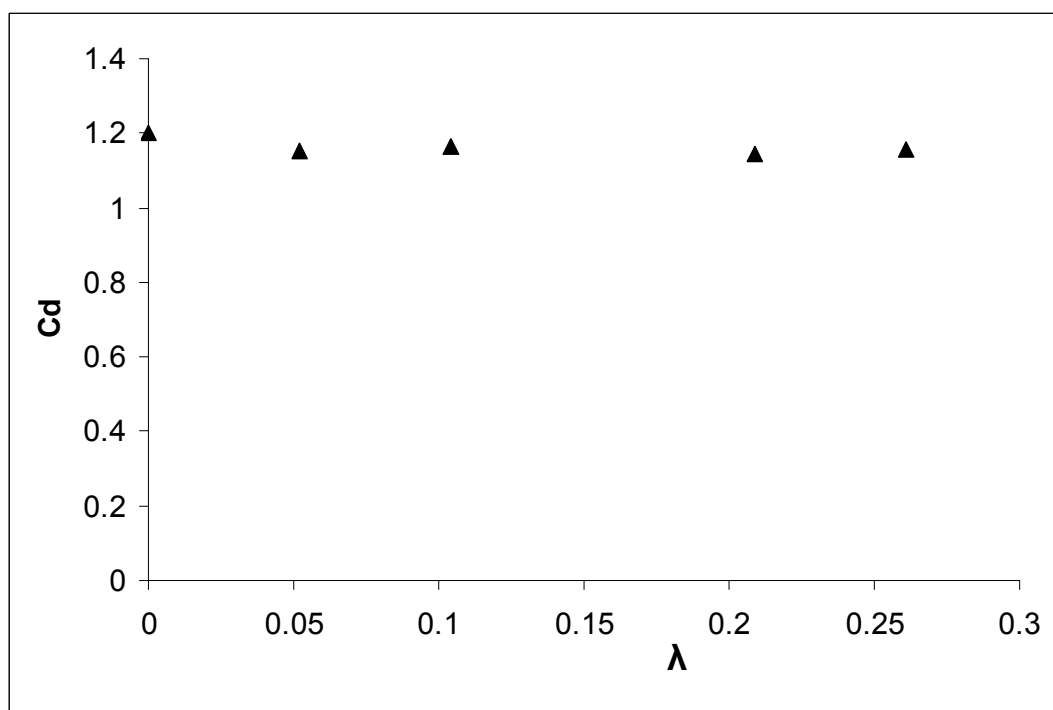
شکل (۶۰-۶): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 11800$ و $x/d = 6$



شکل (۶-۶۱): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 11800$ و $x/d=6$



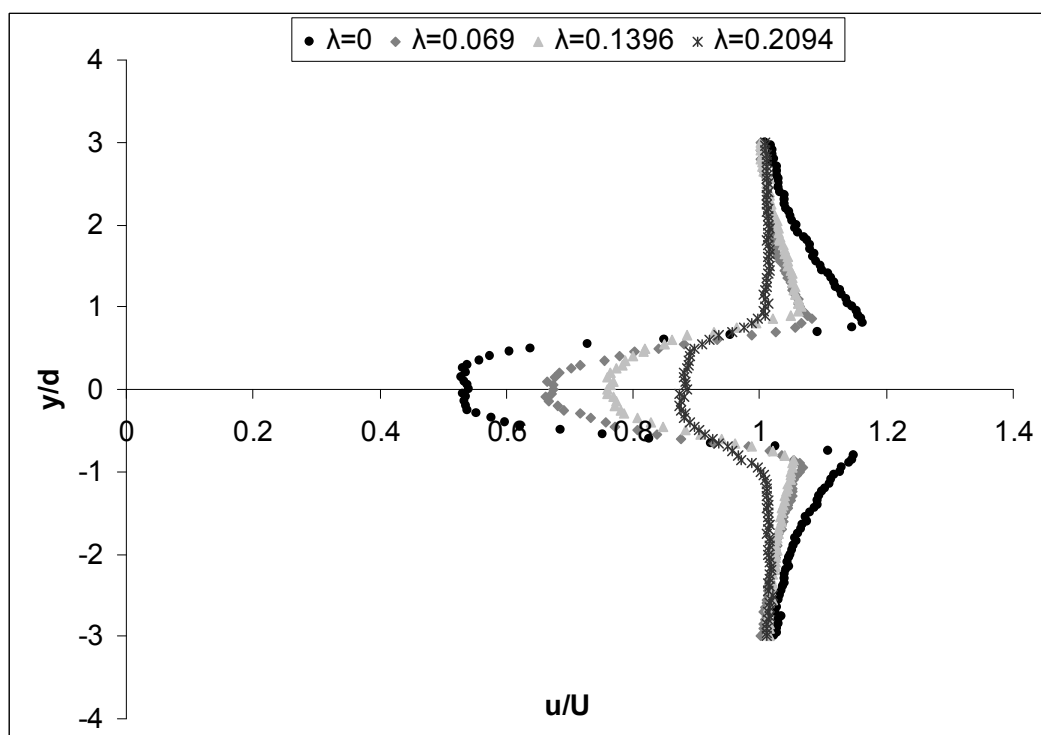
شکل (۶-۶۲): نمودار $velocity\ defect$ در نسبت‌های سرعت مختلف برای $Re = 11800$



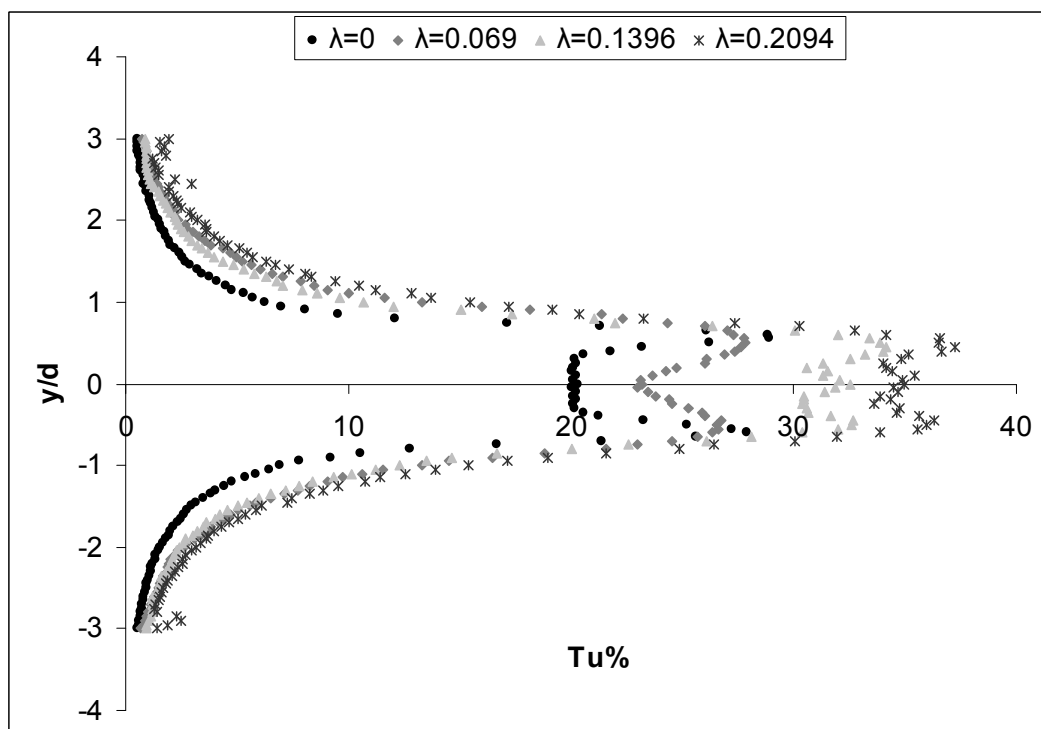
شکل (۶-۶۳): نمودار ضریب پسا در نسبتهای سرعت مختلف برای $Re = 11800$

Re=17650 (۶-۴-۴)

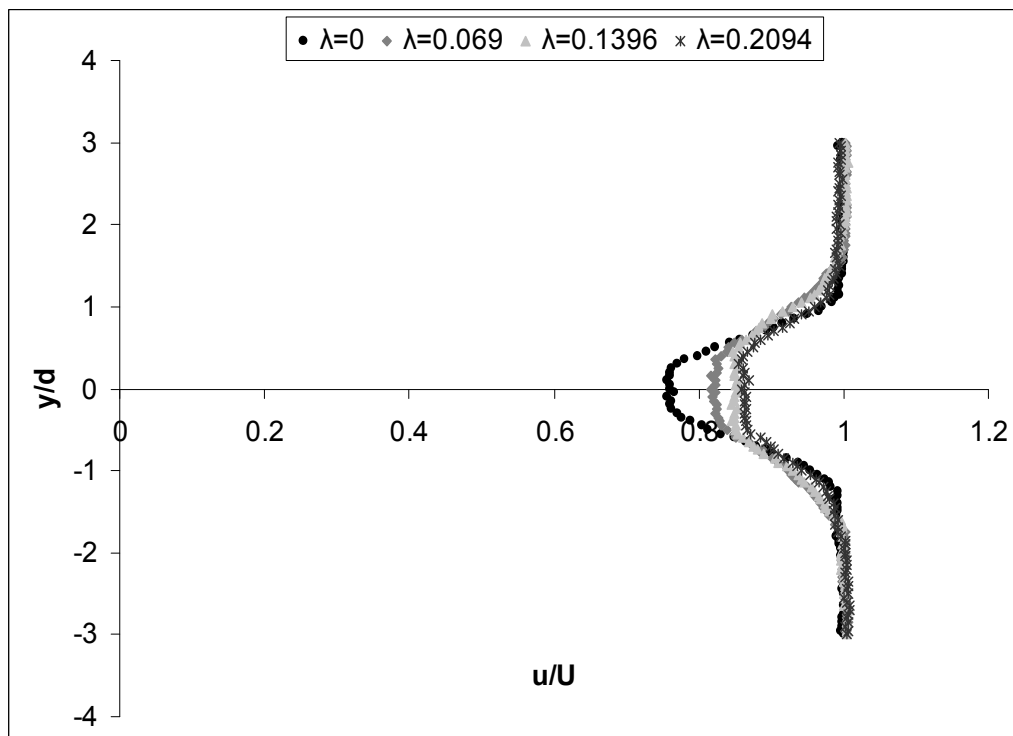
در این قسمت از آزمایشها سرعت جریان ۱۵ متر بر ثانیه انتخاب شده است که با مشخصات سیلندر و سیال عدد رینولدز، ۱۷۶۵۰ می باشد. با توجه به سرعت جریان هوا و سرعت خطی سیلندر، λ در این آزمایشها، ۰، ۰/۰۶۹، ۰/۱۳۹۶، ۰/۲۰۹۴ تعیین می شود. نتایج این آزمایشها در اشکال (۶-۶۴) تا (۶-۷۱) نمایش داده شده است. نتیجه بدست آمده در این آزمایشها مانند نتایج بدست آمده در بخش الف (برای عدد رینولدز ۵۹۰۰) می باشد که به علت افزایش جریان سیال و وجود نسبتهای سرعتی کوچکتر از بخش قبل، تغییراتی در این نتایج حاصل شده است.



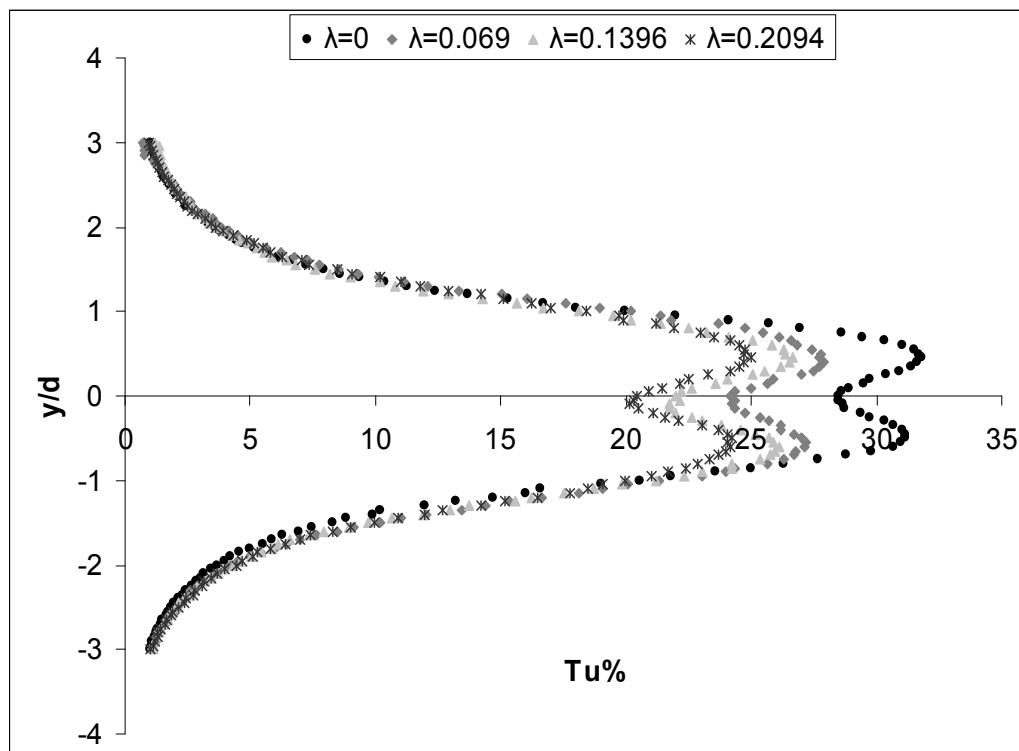
شکل (۶-۶۴): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 17650$ و $x/d = 1/5$



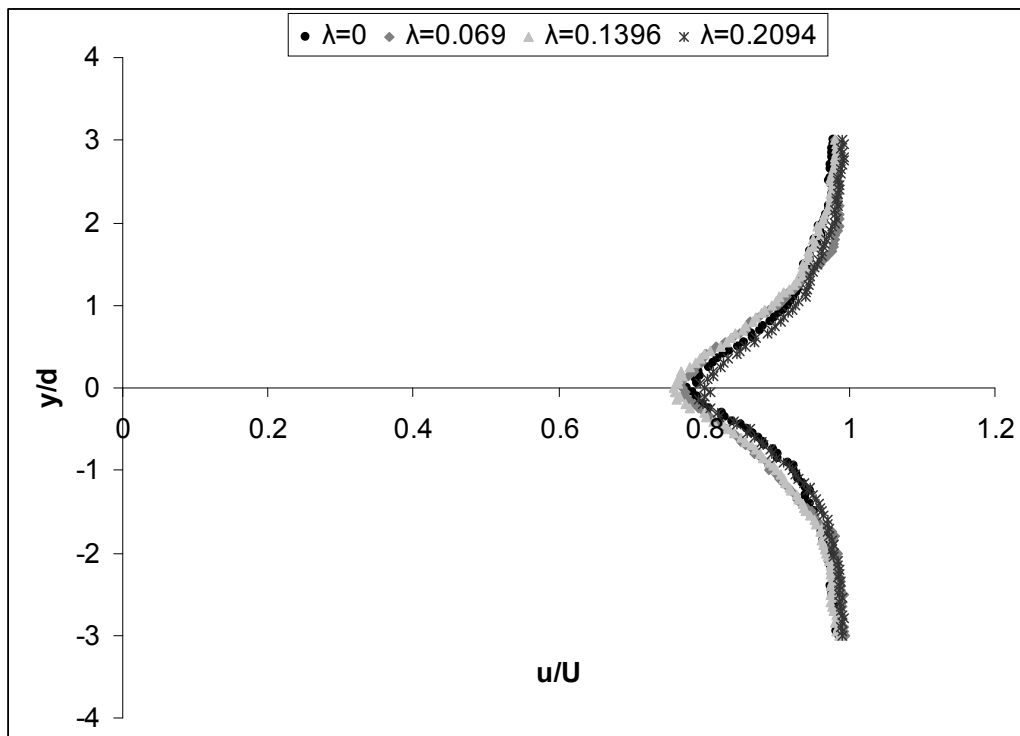
شکل (۶-۶۵): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 17650$ و $x/d = 1/5$



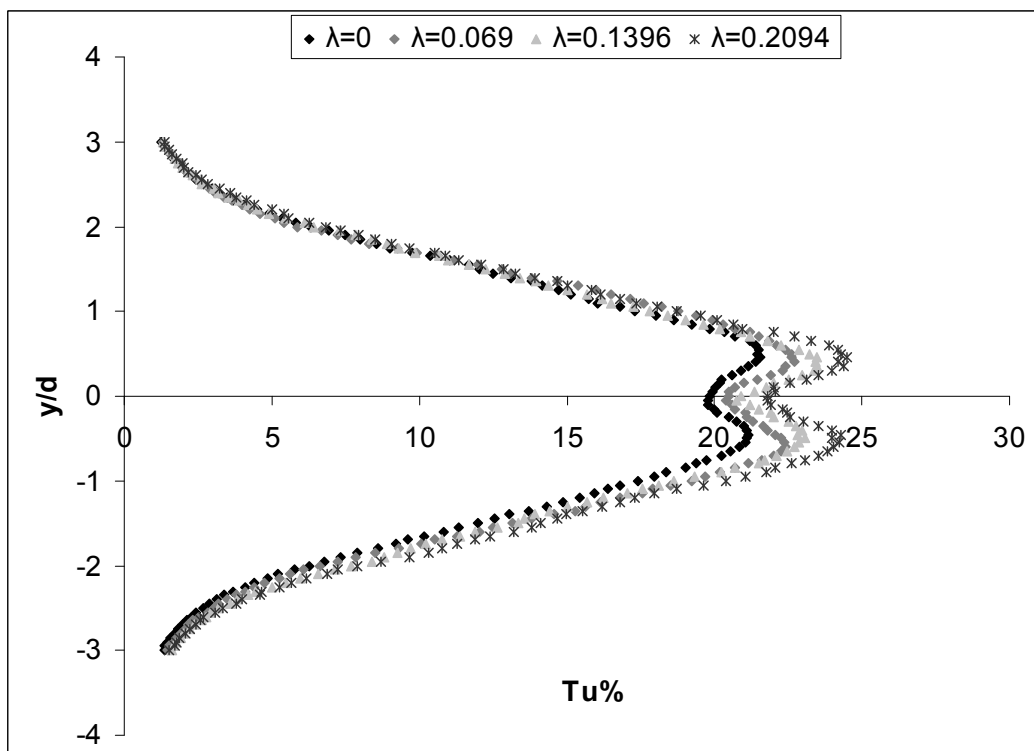
شکل (۶-۶۶): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 17650$ و $x/d=3$



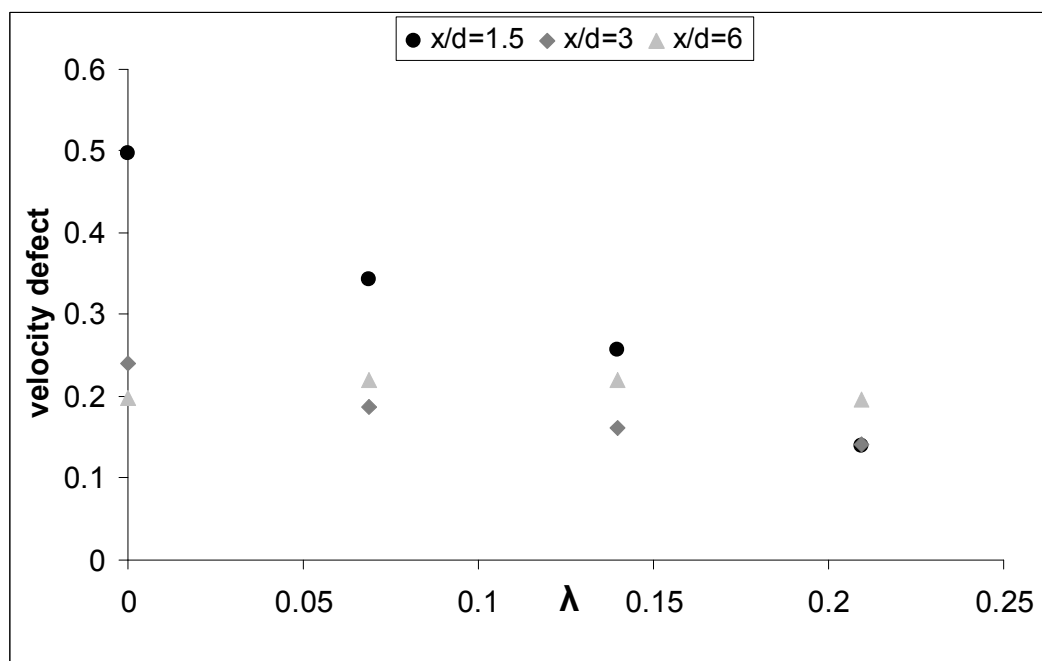
شکل (۶-۶۷): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 17650$ و $x/d=3$



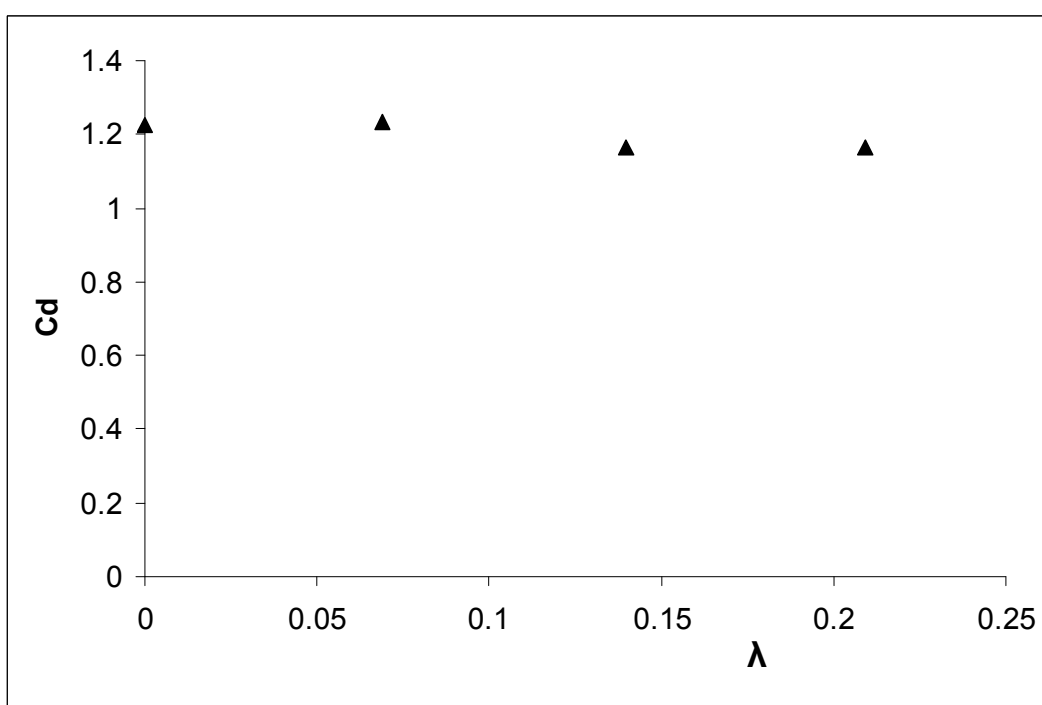
شکل (۶-۶۸): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 17650$ و $x/d = 6$



شکل (۶-۶۹): نمودار شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re = 17650$ و $x/d = 6$



شکل (۶-۷۰): نمودار $velocity\ defect$ در نسبتهای سرعت مختلف $Re = 17650$



شکل (۶-۷۱): نمودار ضریب پسا در نسبتهای سرعت مختلف برای $Re = 17650$

۵-۶) بررسی عوامل خطا

در این بخش به معرفی عوامل خطا در نتایج بدست آمده می‌پردازیم. خطاهای موجود را می‌توان به دو

بخش خطای تجهیزات آزمایشگاهی و خطای اپراتور دسته‌بندی نمود:

الف) خطای تجهیزات آزمایشگاهی:

این خطاها ناشی از دقیق نبودن وسایل و تجهیزات استفاده شده می‌باشد. در ادامه خطاهای موجود در این

بخش نام برده شده است:

- ← ناهمگون بودن مدل آزمایشگاهی (یکسان نبودن قطر مدل).
- ← تأثیرات عوامل نسبت انسداد، نسبت دید و زبری سطح مدل در نظر گرفته شده، بر روی نتایج.
- ← چرخش غیریکنواخت و خارج از مرکز مدل به علت هم‌مرکز نبودن سوراخهای مدل و سوراخهای پولی و مستقیم نبودن شفت.
- ← خطای ناشی از همراهی نبودن لوله پیتوت و جریان سیال.
- ← همراهی نبودن صفحات قرار داده شده در محفظه آزمایش با جریان سیال برای بررسی اثرات انسداد بر روی دنباله سیلندر.

← خطای کالیبراسیون جریان سنج سیم داغ که ناشی از لوله پیتوت، محل و شرایط پراب و ترموکوپل می باشد.

← خطای ناشی از بهم خوردن موقعیت پراب نسبت به جریان سیال و کشیف شدن آن.

← خطای خروج سیال و ایجاد گرادیان فشار، ناشی از قرار دادن صفحات بالائی محفظه آزمایش.

← خطای ناشی از تغییرات مشخصه های سیال مانند رطوبت نسبی و دما در طول آزمایشها.

ب) خطای اپراتور

این نوع خطاها به علت بی دقتی و یا بی اطلاعی اپراتور ممکن است رخ بدهد که در ادامه به معرفی برخی از این خطاها می پردازیم:

← خطای ناشی از کالیبره کردن دستگاه در تمامی مراحل آن.

← جوش ندادن صحیح سیم به پایه های پراب.

← بوجود آمدن خطا به علت قرار ندادن صحیح پراب در دستگاه تراورس.

← خطای ناشی از قرار دادن پراب در موقعیتهای مختلف مشخص شده

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

۷-۱) نتیجه گیری

در این تحقیق دنباله^۱ سیلندر ثابت و اثرات عدد رینولدز، نسبت انسداد و آشفتگی جریان ورودی به سیلندر بر روی آن بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در انتها نیز، به تحقیق اثر دوران بر روی سیلندر پرداخته شد. به منظور ایجاد جریان هوا از تونل باد دمنده مدار باز استفاده گردید. تونل باد مورد استفاده قادر به تولید جریان هوا با سرعت ۳۰ متر بر ثانیه و دارای اتاقک آزمایشی با سطح مقطع ۴۰×۴۰ سانتیمتر می باشد. برای اندازه گیری پارامترهای دنباله سیلندر از جریان سنج سیم داغ دما ثابت استفاده گردید. هر دو دستگاه تونل باد و جریان سنج سیم داغ ساخت شرکت فراسنجش صبا می باشند. داده برداری برای ۳ مقطع طولی پشت سیلندر انجام گرفت. برای بررسی پدیده های ذکر شده پروفیل های سرعت متوسط و شدت اغتشاشات بدست آمده و توسط آن پارامترهای ضریب پسا و *velocity defect* محاسبه گردید. نتایج بدست آمده نشان می دهد که پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاشات به مقدار عدد رینولدز، نسبت انسداد، میزان آشفتگی جریان ورودی به سیلندر و سرعت چرخش سیلندر وابسته است. در ادامه به ارائه نتایج بدست آمده دیگر از این تحقیق می پردازیم:

- نتایج بدست آمده نشان می دهد که پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاشات به محل داده برداری بستگی دارد و با افزایش فاصله از سیلندر پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاشات یکنواخت و

عریضتر می‌شود. همچنین مقادیر پارامتر *velocity defect* و ضریب پسا با توجه به موقعیت داده‌برداری

تغییر می‌کند. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد بمنظور دستیابی به مقدار صحیح ضریب پسا باید

موقعیت داده‌برداری را تا حد ممکن دور از سیلندر انتخاب کنیم.

- داده‌های بدست آمده از این تحقیق حاکی از این است که با افزایش عدد رینولدز (افزایش سرعت

جریان هوا) سرعت متوسط و شدت اغتشاشات در داخل دنباله افزایش می‌یابد. همچنین مقدار پارامتر

velocity defect با افزایش عدد رینولدز کاهش و ضریب پسا در این محدوده از اعداد رینولدز افزایش

می‌یابند.

- بررسی‌های انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش شدت اغتشاشات جریان ورودی به

سیلندر باعث تغییرات در سرعت حداکثر و حداقل پروفیل‌های سرعت متوسط سیلندر شده و سرعت در

داخل دنباله با افزایش شدت اغتشاشات جریان آزاد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش شدت اغتشاشات

جریان ورودی شدت اغتشاشات در داخل دنباله افزایش می‌یابد. مقادیر بدست آمده برای مقادیر ضریب

پسا و *velocity defect* نشان می‌دهد با افزایش شدت اغتشاشات ورودی به سیلندر مقدار ضریب پسا و

velocity defect کاهش می‌یابد.

- نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش اثر انسداد، سرعت جریان در خارج دنباله افزایش و در داخل دنباله کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش انسداد شدت اغتشاشات در داخل دنباله افزایش می‌یابد ولی در خارج از ناحیه دنباله، انسداد در میزان اغتشاشات تأثیر چندانی ندارد.
- آزمایشهای انجام گرفته بر روی دنباله سیلندر چرخان نشان می‌دهد که دوران سیلندر باعث تغییرات اساسی و مهمی در پروفیل سرعت متوسط می‌شود. دوران سیلندر باعث افزایش سرعت در داخل گردابه و کاهش سرعت در خارج دنباله می‌شود که با افزایش سرعت دورانی سیلندر این تغییرات بیشتر و مشهودتر می‌شود. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دوران سیلندر، شدت اغتشاشات دنباله افزایش می‌یابد. نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دورانی سیلندر پارامترهای ضریب پسا و *velocity defect* کاهش می‌یابند.

۲-۷) ارائه پیشنهادات

با توجه به موضوعات مطرح شده در این تحقیق، زمینه‌های تحقیقاتی زیر برای ادامه کار پیشنهاد می‌گردد:

- بررسی عددی موضوعات مطرح شده در این تحقیق شامل بررسی دنباله سیلندر ثابت و تأثیر نسبت انسداد، شدت اغتشاشات جریان ورودی و چرخش بر روی آن.

- بررسی دنباله سیلندر ثابت و چرخان در اعداد رینولدز پائین تر و بالاتر از اعداد رینولدز انتخاب شده در این تحقیق.
- بدست آوردن پروفیل‌های سرعت متوسط و شدت اغتشاشات سیلندر ثابت و چرخان در موقعیتهای متفاوت دیگر برای بدست آوردن رفتار مشخصی از دنباله‌ها.
- بدست آوردن پارامترهایی مانند ضریب برآ، عدد استروهل و ... برای سیلندر ثابت و چرخان.
- بررسی پارامترهای دیگر مؤثر بر دنباله سیلندر ثابت مانند زبری سطح سیلندر، نسبت دید و ... بر روی پارامترهای دنباله سیلندر.
- بررسی دنباله سیلندر ثابت در شدت اغتشاشات ورودی و اعداد رینولدز متفاوت دیگر.
- بررسی دنباله سیلندر ثابت در نسبت انسدادهای دیگر و با روش بزرگتر کردن قطر سیلندر.
- ارائه تحقیقاتی به منظور بررسی همزمان چند پارامتر تأثیرگذار بر روی دنباله سیلندر.
- بررسی دنباله سیلندر چرخان در نسبت‌های سرعت بالاتر.

مراجع:

- [١] Blasius H. (1908) "grenzschichten in flussigkeiten mit kleiner reibung" **Z. math. U. phys.**, 561. Naca tech. memo. No 1256.
- [٢] Wieselberger C. (1921) "Neuere Feststellungen uber die Gesetze des Flussigkeits-und Luftwiderstands" **Physics. Z.**, Vol 22, Page 321.
- [٣] Tutar M. and Celik I. and Yavuz I. (2006) "Modelling of effect of inflow turbulence on large eddy simulation of bluff body flows" **Math. and Comput Appli.**, Vol. 11, No. 3, pp.225-234.
- [٤] Maskell, E.C. (1963) "A theory of the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel" **Report and Memoranda.**, No. 3400,. Aeronautical Research Council.
- [٥] Graham, J.M.R. (1969) "The effect of end-plates on the two-imensionality of a vortex wake" **The Aeronautical Quarterly** **20**,. pp 237–247.
- [٦] Achenbach E. and Heincke E. (1981) "On vortex shedding from smooth rough cylinders in high Reynolds numbers" **J. Fluid Mech.**, Vol 109, pp 239-251.
- [٧] Stansby P.K. (1974) "The effects of end plates on the base pressure coefficient of a circular cylinder" **Aeronautical Journal** **78**,. pp 36–37.
- [٨] Schlichting H. "boundary Layer Theory" McGraw-Hill New York. 1906.
- [٩] Hiemenz K., (1911), PhD Thesis, "die grenzschicht an einem in den gleichformigen flussigkeitsstrom eingetauchten geraden kreiszyylinder" gottingen, dingl. Polytechn.
- [١٠] howarth. (1935) "on the calculation of steady flow in the boundary layer near the surface of a cylinder in a stream" **ARC Rep. & memo.**, pp 1632.
- [١١] Froessling N. (1940) "verdunstung, warmeubergang und geschwindigkeitsverteilung bei zweidimensionaler und rotationssymmetrischer laminarer grenzschichtstromung" **Lunds. Univ. arsskr. N. f. avd. 2.**, no 4. pp 35.
- [١٢] Ulrich A. (1949) "die ebene laminare reibungsschicht an einem zylinder" **Arch. D. math.**, 2. pp 33.

- [13] pohlhausen k. (1921) "zur näherungsweise integration der differentialgleichung der laminaren reibungsschichten" **Zamm.**, 1. pp 252.
- [14] Strouhal V. (1878) "Über eine besondere Art der Tonerregung". **Ann. Phys. Chem.**, (Liepzig), Neue Folge Bd. 5:216. Heft 10.
- [15] Rayleigh L. (1915) "Aelolian tones" **Philos. Mag.**, 29. pp 433.
- [16] Gerrard JH. (1978) "The wake of cylindrical bluff bodies at low Reynolds number" **Philos. Trans. R. Soc.**, London Ser. A 288:351.
- [17] Roshko A. (1954) "On the development of turbulent wakes from vortex streets" **NACA Rep.**, pp 1191.
- [18] Rosenhead L. (1953) "Vortex systems in wakes" **Adv. Appl. Mech.**, 3:185.
- [19] Wille R. (1960) "Karman vortex streets" **Adv. Appl. Mech.**, 6:273.
- [20] Morkovin MV. (1964) "Flow around a circular-kaleidoscope of challenging fluid phenomena" **Proc. ASME Symp.**, Fully Separated Flows. pp 102.
- [21] Berger E. and Wille R. (1972) "Periodic flow phenomena" **Annu. Rev. Fluid Mech.**, 4. pp 313.
- [22] Ortel H. (1990) "Wakes behind blunt bodies" **Annu. Rev. Fluid Mech.**, 22. pp 539.
- [23] Coutanceau M, Defaye j. (1991) "Circular cylinder wake configuration: a flow visualisation survey" **Appl. Mech. Rev.**, 44. pp 255.
- [24] Hiejima S., Nomura T., Kimura K., Fujino Y., (2001) "Numerical study on the vortex-induced vibration of a circular cylinder by acoustic excitation" **J. of Wind Eng. Industrial Aerodyn.**, Volume 67-68. pp 325-335.
- [25] Kovasznay L.S.G. "Hot-ware investigation of the wake behind cylinders at low Reynolds numbers" pp. 174-190, Department of Aeronautics The John Hopkins University, Baltimore, USA.
- [26] Taneda S. (1956) "Experimental investigation of the wakes behind cylinders and plates at low Reynolds numbers" **J. Phys. Soc., Japan.**
- [27] Olesen J.F. and Rajagopalan S. (2000) "Vortex shedding behind modified circular cylinder" **J. of Wind Eng. Industrial Aerodyn.**, Vol 86. pp 55-63.

- [٢٨] Massons J. Ruiz X. and Diaz F. (1989) “Image processing of the near wake of stationary and rotating cylinder” **J. of Fluid Mech.**, Vol 204. pp 167-184.
- [٢٩] Mittal S. (2001) “Computation of three-dimensional flow past circular cylinder of flow aspect ratio” **J. Phys of Fluid.**, Vol 13, Num 1, pp 177-191.
- [٣٠] Tritton D. J. (1959) “Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers” **J. Fluid Mech.**, Vol 6. pp 547-564.
- [٣١] Relf EF. (1913) “Tech. Rep. and Memo” Adv. Comm. Aero, London, no 102.
- [٣٢] Williamson C.H.K. (1988) “Defining a universal and continuous Strouhal – Reynolds number relationship for the laminar vortex shedding of a circular cylinder” **Phys. Fluids** **31.**, pp 2742–2744.
- [٣٣] Ahlborn B. Seto L. Noack B. (2002) “On drag Strouhal number and vortex-street structure” **Fluid Dynamic Research** **30.**, pp 379-399.
- [٣٤] Barnes F.H. (2000) “Vortex shedding in the wake of a rotating circular cylinder at low Reynolds numbers” **J.Appl. Phys.**, pp 33.
- [٣٥] Kang S. Choi H. and Lee S. (1999) “Laminar flow past a rotating circular cylinder” **Phys. Fluids** **11.**, pp 3312.
- [٣٦] Hu G. H. Sun D. J. Yin X. Y. and Tong B. G. (1996) Hopf bifurcation in wakes behind a rotating and translating circular cylinder **Phys. Fluids** **8.**, pp 1972.
- [٣٧] Mittal S. (2002) “Instabilities in uniform flow past a rotating cylinder” IUTAM Symposium on Unsteady Separated Flow April 8-12, Toulouse, France.
- [٣٨] Sham S. Kopp G. Martinuzzi J. (2008) “The suppression of periodic vortex shedding from a rotating circular cylinder” **J. of Wind Eng.** **96.**, pp 1164-1184.
- [٣٩] Dierich M. Gersten K. Schlottmann F. (1998) “Turbulent flow around a rotating cylinder in a quiescent fluid” **Exp. in Fluid** **25.**, pp 455-460.
- [٤٠] Shkadova V. P. (1980) “rotating cylinder in a flowing viscous incompressible fluid ” **J. of Fluid Mech.**, pp 12-16.

- [۴۱] Anagnostopoulos P. Minear R. (2004) "Blockage effect of oscillatory flow past a fixed cylinder" **Applied Ocean Research** 26., pp 147-153.
- [۴۲] Norberg C., (1987) phd. Thesis, "Effect of Reynolds number and a low-intensity afareestream turbulence on the flow around a circular cylinder" applied thermo. and fluid mech. Department. chalmers university.
- [۴۳] Tutar M. Celik I. and Yavuz I., (2006) "Modelling of effect of inflow turbulence on large eddy simulation of bluff body flows" **Math. and Comput. Appl.**, Vol 11. No 3. pp 225-234.
- [۴۴] Sumner D. Richard M.D. Akosile O. (2007) "Strouhal number data for two staggered circular cylinders" **J. of Wind Eng.** 96, 859-871.
- [۴۵] Padrino j. and Joseph D. (2006) "Numerical study of the steady-state uniform flow past a rotating cylinder" **J. Fluid Mech.** Vol. 557. pp. 191-223.
- [۴۶] اردکانی م،ع، (۱۳۸۵) " جریان سنج سیم داغ " چاپ اول، انتشارات دانشگاه خوجه نصیرالدین طوسی، تهران، ص ۹۰.
- [۴۷] Roach P.E. (1987) "The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids" **Int. J. of Heat and Fluid Flow.**, 8(2).
- [۴۸] Roshko A., (1993) "Perspectives on bluff body aerodynamics" **J. Wind Eng. Industrial Aerodyn.** pp 49-79.
- [۴۹] Roshko, A., (1954) "On the development of turbulent wakes from vortex streets" National Advisory Committee for Aeronautics. Report 1191.
- [۵۰] Bloor MS., (1964) "The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder" **J. Fluid Mech** 19., pp 290.
- [۵۱] Dennis S. Chang G., (1970) "Numerical solutions for steady flow steady flow past a circular cylinder at Reynolds numbers up to 100" **J. Fluid Mech** 42., pp 471.
- [۵۲] Countanceau M. Bouard R., (1997) "Exprerimental determination of the main features of the viscous flow in the wake of a circular cylinder in uniform translation: steady flow" **J. Fluid Mech.** 79., pp 231.
- [۵۳] Zhang H. Fey U. Noack BR. Konig M. Eckelmann H., (1995) "On the transition of the cylinder wake" **Phys. Fluids** 7., pp 1.

- [۵۴] Williamson CHK., (1989) "Oblique modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers" **J. Fluid Mech.** **206.**, pp 579.
- [۵۵] Hammache M. Gharib M., (1989) "Anovel method to promote parallel shedding in the wake of circular cylinders" **Phys. Fluids A** **1.**, pp 1611.
- [۵۶] Williamson CHK., (1995) "Three-dimensional wake transition behind a cylinder" **J. Fluid Mech.**, Submitted.
- [۵۷] Unal MF. Rockwell D., (1988) "On vortex shedding from a cylinder: Part 1. The initial instability" **J. Fluid Mech.** **190.**, pp 491.
- [۵۸] Lin J. C. Towfigh. J. Rockwell D. (1995) "Instantaneous structure of near-wake of a cylinder: on the effect of Reynolds number" **J. Fluids Struct.**, Submitted.
- [۵۹] Roshko A., (1961) "Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number" **J. Fluid Mech.** **10.**, pp 345.
- [۶۰] جلالی ع، (۱۳۸۶) پایان نامه ارشد: " بررسی دنباله سیلندر مثلی در زوایای حمله متفاوت"، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۶۱] Chao D. and Van Dam C. P., (1999) "Airfoil Drag Prediction and Decomposition" **J. of Aircraft.**, Vol 36. No 4. pp 675-681.
- [۶۲] Antonia R. A. and Rajagopalan S., (1990) "Determination of Drag of a Circular Cylinder" **AIAA Journal.**, Vol 28. No 10. pp 1833-1834.
- [۶۳] Van Dam C.P., (1999) "Recent experience with different methods of drag prediction" **Progress in Aerospace Science** **35.**, pp751-798.
- [۶۴] Goldstein S., (1936) "A Note on the Measurmant of Total Head and Static Pressure in a Turbulent Stream" **Proceedings of the Royal Society of London.**, Series A. Vol 155. pp 570-575.
- [۶۵] Sucker D. and Brauer H., (1975) "Fluid dynamic bei der angestromten Zylindern" **Warme und stoffubertragung.**, Vol 8. pp 149-158.

Abstract

Cylinder aerodynamics has been studied for over 100 years. The incompressible, viscous flow around a circular cylinder is a classical problem in fluid mechanics. The impact of the Reynolds number, free stream turbulence, blockage and rotation on the flow past a circular cylinder is reported in the thesis. In this investigation, the hotwire technique was used to measure velocity distribution. Experiments were performed using the open wind tunnel of 40×40 cm in section and 168 cm in length. The model used was a cylinder of diameter $D = 2$ cm. The experimental instrumentation available at the aerodynamics laboratory of the University of Sabzevar was used. The Reynolds number range covered is from about 5900-30680. The present results indicate that an increase in rotation and free stream turbulence and a decrease in blockage ratio and the Reynolds number lead to a decrease in the drag coefficient.

Keywords: *aerodynamics , circular cylinder , drag coefficient , hot wire*