

دانشگاه مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد - مکانیک تبدیل انرژی

عنوان

**The experimental study and measuring of reverse
flow by Hot-Wire Anemometer**

بررسی تجربی جریان معکوس و اندازه‌گیری آن بوسیله

جریان سنج سیم‌رذاغ (HWA)

اساتید راهنما:

دکتر عبدالمجید شیربیک خوشنویس

دکتر محمدرضا اردکانی

دانشجو:

حمید رضا عطار

۸۳۴۰۱۰۵

تلفن: ۱۳۸۸

تقدیم:

در ابتدا لازم است که خدای خود را که مرا در دوران تحصیلم تا به امروز یاری نموده است شکر کنم و این پایان نامه را به پدر و مادر و همسر عزیزم که حامی من در دوران تحصیلم بودند، تقدیم کنم تا بتوانم گوشه‌ای از زحمات ایشان را جبران کنم.

تقدیر و تشکر:

در اینجا بر خود وظیفه دانسته تا از زحمات بی شائبه جناب آقای دکتر محمد علی اردکانی که در دوران انجام پروژه مرا یاری نموده تشکر نمایم. همچنین کمال تشکر را از جناب آقای دکتر عبدالامیر خوشنویس داشته که با راهنماییهای ایشان انجام این پروژه مقدور گردید. در اینجا جا دارد از مسولین سازمان پژوهشهای علمی صنعتی ایران پژوهشکده مکانیک که آزمایشهای مربوط به این پایان نامه در آن قسمت انجام پذیرفته سپاسگزار نمایم.

چکیده

در مهندسی، بسیاری از جریانهای سیال وجود دارد که جهت آنها مشخص نبوده و احتمال معکوس شدن آنها نیز هست. نمونه‌هایی از جریانهای معکوس عبارتند از: جریان پشت موانع، انبساط ناگهانی در لوله‌ها و کانالها، جدایش جریان روی سطوح منحنی شکل با انحنای زیاد و جریانهای چرخشی (در اتاق احتراق و ...). همچنین در برخی از کاربردهای مهندسی پزشکی نظیر ساخت اسپرومتر، جریان در حالت دم و بازدم دارای جهت‌های معکوس است.

و با توجه به اینکه اصول اندازه‌گیری جریان سنج سیم‌داغ بر مبنای انتقال حرارت می‌باشد و انتقال حرارت یک کمیت اسکالر بوده، بنابراین قادر به اندازه‌گیری بردار سرعت جریان نمی‌باشد و یا به عبارت دیگر جهت جریان سیال را با استفاده از یک پراب یک بعدی نمی‌توان اندازه‌گیری نمود. اسپرومترها که برای اندازه‌گیری دبی حجمی دم و بازدم ریه از آن استفاده می‌شود، در مهندسی پزشکی کاربرد فراوان دارد و پزشکان با استفاده از آن می‌توانند تا حدودی بیماریهای تنفسی را تشخیص دهند. با توجه به این که زمان دم و بازدم کوتاه می‌باشد، نیاز است که اسپرومترها قادر به اندازه‌گیری تغییرات دبی حجمی در زمان کوتاه باشند. یکی از روشهای اندازه‌گیری در دستگاههای اسپرومتر، استفاده از جریان سنج سیم‌داغ است.

همانگونه که بیان شد با استفاده از جریان سنج سیم‌داغ می‌توان جهت جریان معکوس را تشخیص داده، بنابراین یکی از مشکلات اسپرومتر از نوع سیم‌داغ تشخیص جریان دم و بازدم از یکدیگر می‌باشد. برای مشخص نمودن جریان دم و بازدم و یا به عبارت دیگر جریانهای معکوس شونده با استفاده از جریان سنج سیم‌داغ روشهایی وجود دارد که در این تحقیق سعی شده است در مورد نحوه اندازه‌گیری جریان معکوس توسط دستگاه جریان سنج سیم‌داغ بررسی دقیقی انجام شود.

عنوان صفحه

مقدمه ۱

فصل اول تئوری و اصول عملکرد دستگاه جریان سنج سیم داغ (HWA) ۳.

۱-۱- کمیتهای مهم جریان سیال ۴

۲-۱- ویژگیهای دستگاه جریان سنج سیم داغ ۷

۳-۱- اجزای تشکیل دهنده دستگاه جریان سنج سیم داغ ۹

۴-۱- مدار الکترونیکی دستگاه جریان سنج سیم داغ ۱۰

۵-۱- مدار الکترونیکی دما ثابت CT ۱۱

۶-۱- اصول عملکرد دستگاه جریان سنج سیم داغ ۱۴

۷-۱- انتقال حرارت ۱۵

۱-۷-۱- انتقال حرارت از سیمی با طول محدود (سنسور سیم داغ) ۱۷

۸-۱- اثر دما بر ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ ۲۱

۱-۸-۱- جبران اثر دما به روش تحلیلی ۲۴

۹-۱- رابطه سرعت جریان سیال و ولتاژ خروجی جریان سنج سیم داغ ۲۶

۱-۹-۱- تبدیل ولتاژ به سرعت لحظه‌ای و تجزیه و تحلیل آن ۲۹

۲-۹-۱- تجزیه و تحلیل سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده ۳۱

۱۰-۱- بررسی اثر شدت اغتشاشهای جریان سیال در اندازه‌گیری سرعت جریان سیال ۳۳

فصل دوم هدف از انجام این پایان‌نامه و کاربرد آن ۳۸

۱-۲- هدف از انجام این پایان‌نامه ۳۹

۲-۲- اسپرومتر ۴۱

۱-۲-۲- حجمها و ظرفیتهای ریوی ۴۱

عنوان صفحه

۲-۲-۲- اجزای اسپرومتر از نوع سیم داغ ۴۳

۳-۲-۲- محدودیتهای اسپرومتر از نوع سیم داغ و روشهای برطرف نمودن آن ۴۵

فصل سوم مروری بر کارهای انجام گرفته در مورد اندازه گیری

جریان معکوس بر روی دستگاه جریان سنج سیم داغ ۴۷

۳-۱- اندازه گیری جریانهای معکوس با استفاده از جریان سنج سیم داغ ۴۸

۳-۲- پرابهای تحت تاثیر استوانه سرد ۵۰

۳-۳- پرابهای تحت تاثیر استوانه گرم ۵۲

۳-۴- جریان سنج ضربانی (PWA) ۵۳

۳-۵- جریان سنج سیم داغ با پراب متحرک (FHA) ۵۷

۳-۵-۱- مکان و سرعت پراب ۵۹

۳-۵-۲- اندازه گیری سرعت نسبی ۶۱

فصل چهارم اجزای جانبی بکاررفته در آزمایشها و

کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم داغ ۶۳

۴-۱- تونل باد ۶۴

۴-۲- مکانیزم انتقال دهنده پراب ۶۷

۴-۳- لوله استاتیکی پیتوت و مدل الکتریکی آن ۶۸

۴-۴- پراب سیم داغ ۶۹

۴-۵- سنسور سیم داغ ۷۰

۴-۶- سنسور فیلم داغ ۷۲

عنوان صفحه

| | |
|---|-----|
| ۷-۴- پراب یک بعدی..... | ۷۴ |
| ۸-۴- تطبیق دهنده سیگنال (Signal Conditioner)..... | ۷۶ |
| ۹-۴- جمع‌آوری و دریافت داده‌ها..... | ۷۷ |
| ۱۰-۴- نرم‌افزار (Flow Ware)..... | ۷۸ |
| ۱-۱۰-۴- مدیریت داده‌ها..... | ۷۹ |
| ۲-۱۰-۴- تنظیم سخت‌افزار جریان‌سنج سیم داغ..... | ۷۹ |
| ۲-۱-۱۱-۴- استفاده از گرا دیسک‌های منظم..... | ۸۵ |
| ۱۱-۴- کالیبراسیون دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ..... | ۸۲ |
| ۱-۱۱-۴- روشهای کالیبراسیون..... | ۸۳ |
| ۱-۱-۱۱-۴- استفاده از اتاق آرامش تونل‌باد..... | ۸۵ |
| فصل پنجم روش آزمایش و بررسی و تجزیه تحلیل نتایج آزمایشها..... ۹۳ | |
| ۱-۵- روش آزمایش..... | ۹۴ |
| ۱-۱-۵- اندازه‌گیری جریان پایین دست مفتول با قطرهای مختلف و صفحه نازک..... | ۹۵ |
| ۲-۱-۵- اندازه‌گیری جریان پایین دست مفتول با قطرهای مختلف و صفحه نازک..... | ۹۷ |
| ۳-۱-۵- کاهش غیر یک‌ساخته جریان هوا با استفاده از توری با مشهای مختلف..... | ۹۹ |
| ۴-۱-۵- اندازه‌گیری جریان داخل نازل..... | ۱۰۲ |
| ۵-۱-۵- اندازه‌گیری جریان در مجرای (حجمی)..... | ۱۰۳ |
| ۱۷-۲- کالیبره نمودن اسپرومتر..... | ۱۰۴ |
| ۲-۵- بررسی و تجزیه تحلیل آزمایشها..... | ۱۰۵ |
| ۱-۲-۵- جریان پایین دست مفتول..... | ۱۰۵ |
| ۱-۱-۲-۵- سرعت متوسط..... | ۱۰۸ |

| | |
|---|-----------|
| عنوان..... | صفحه..... |
| ۵-۲-۱-۲- شدت اغتشاشها..... | ۱۲۱..... |
| ۵-۲-۱-۳- بررسی گردابه‌های پایین دست مفتول..... | ۱۳۱..... |
| ۵-۲-۲- جریان پایین دست صفحه نازک (plate)..... | ۱۳۷..... |
| ۵-۲-۲-۱- سرعت متوسط..... | ۱۳۷..... |
| ۵-۲-۲-۲- شدت اغتشاشها..... | ۱۴۵..... |
| ۵-۲-۳- مقایسه مفتول و صفحه..... | ۱۵۱..... |
| ۵-۲-۴- اثر دو سنسور فیلم‌داغ..... | ۱۵۹..... |
| ۵-۲-۴-۱- بررسی توزیع سرعت در جهت Y..... | ۱۶۰..... |
| ۵-۲-۴-۲- بررسی توزیع سرعت در جهت X..... | ۱۷۲..... |
| ۵-۲-۵- کاهش غیر یک:واختی جریان هوا با استفاده از توری..... | ۱۷۹..... |
| ۵-۲-۵-۱- اثر توری در جریان هوا..... | ۱۷۹..... |
| ۵-۲-۵-۲- اثر توری، بر روی توزیع سرعت و شدت اغتشاشهای جریان هوا..... | ۱۸۱..... |
| ۵-۲-۵-۳- اثر توری بر روی لایه مرزی..... | ۱۸۷..... |
| ۵-۲-۶- بررسی جریان داخل لوله و نازل..... | ۱۹۰..... |
| ۵-۲-۷- آزمایش دیسک سنجی جریان..... | ۲۰۹..... |
| فصل ششم نتیجه گیری..... | ۲۱۲..... |
| پیوست..... | ۲۲۰..... |
| چکیده انگلیسی..... | ۲۸۷..... |
| مراجع..... | ۲۸۸..... |

مقدمه:

حرکت سیال نقش مهمی در زندگی و نیز صنایع پیرامون آدمی نظیر توربوماشینها، سیستمهای هیدرودینامیکی، صنایع هوا و فضا، صنایع نفت و گاز و بسیاری موارد دیگر ایفا می‌کند. از آنجا که در اکثر صنایع و سیستمها، رژیم جریان به صورت آشفته است، بنابراین این نوع جریان از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار می‌باشد. دلیل اهمیت آن این است که جریان آشفته نقش مهمی در انتقال اندازه حرکت (ممنتوم)، انتقال حرارت و جرم، تلفات انرژی و اصطکاک در سیستمهای سیالات دارد. بنابراین به منظور طراحی بهینه و مطلوب سیستمهای سیالات در صنایع مختلف، نیاز آن است تا جریانهای آشفته را شناخته و کمیت‌های آن را مشخص نمود. تعیین این کمیتها توسط روشهای عددی و تجربی انجام می‌پذیرد.

در روشهای عددی با استفاده از شبیه‌سازی و حل معادله‌های حاکم بر جریان سیال نظیر معادله‌های پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی، کمیت‌های جریان را در شرایط مختلف به دست آورده و با توجه به نتایج به دست آمده، سیستمهای مورد نظر طراحی و یا بهینه می‌شوند. در روشهای تجربی با استفاده از تجهیزاتی نظیر تونل باد، تونل آب و ... مدل را در شرایط آزمایش قرار داده و با استفاده از دستگاههای اندازه‌گیری، کمیت‌های مختلف جریان سیال اندازه‌گیری شده در نتیجه می‌توان پدیده‌های فیزیکی را درک و سیستمهای سیالاتی را طراحی و بهینه نمود. دو روش فوق دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشند که پژوهشگران و طراحان باید از مزایای این دو روش به نحو مطلوبی استفاده نمایند.

در روشهای تجربی نیاز به مدل، تجهیزات آزمایش و دستگاههای اندازه‌گیری بوده که معمولاً پرهزینه‌تر از روشهای عددی است. با توجه به مشکلات اندازه‌گیری برخی از کمیت‌های جریان سیال و یا جریانهای ناپایا در زمانهای بسیار کوتاه، نظیر بررسی جریان اطراف یک جسم آیرودینامیکی از لحظه صفر تا زمان شکل‌گیری لایه‌مرزی، استفاده از روشهای تجربی بسیار پیچیده و مشکل است. در روشهای عددی، معادله‌های حاکم بر جریان سیال از روشهای مختلف حل می‌شوند. در این روشها با توجه به ساده‌سازی معادله‌های حاکم بر جریان سیال، خطای ناشی از مدل آشفتگی و یا تأثیر شرایط مرزی، امکان خطا در نتایج به‌دست‌آمده وجود دارد که بهتر است صحت نتایج حاصله با نتایج حاصل از روشهای تجربی مقایسه و کدهای نوشته شده را اصلاح نمود. سرعت‌لحظه‌ای، سرعت‌متوسط و اغتشاشهای سرعت جریان سیال را می‌توان با استفاده از دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ اندازه‌گیری نمود. همچنین با استفاده از دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ و تجهیزات جانبی آن می‌توان پدیده‌های مختلف جریان سیال نظیر لایه‌مرزی، جدایش جریان، ناحیه دنباله اجسام، جریان در نزدیکی دیواره، گردابه‌ها، تنش برشی و... را به‌صورت تجربی بررسی و اندازه‌گیری نمود.

مزیت اصلی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ پاسخ فرکانسی سریع آن و همچنین حساسیت بالا در سرعت‌های کم است. با توجه به مزیت فوق‌کاربردهای فراوانی برای دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ می‌توان در مهندسی پزشکی، صنعت خودرو، صنایع نظامی و غیره یافت. به‌طورکلی برای اندازه‌گیری جریانهای با سرعت کم و یا جریانهای غیر پایا که در آن تغییرات سرعت برای زمانی کوتاه مدنظر است، دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ استفاده می‌شود.

فصل اول

تئوری و اصول عملکرد دستگاه جریان سنج

سیم داغ (HWA)

تئوری و اصول عملکرد دستگاه جریان سنج سیم‌داغ (HWA):

با توجه به موضوع پایان‌نامه که اندازه‌گیری جریان معکوس با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ و کاربرد عملی آن در ساخت اسپرومتر می‌باشد در این بخش در رابطه با کمیت‌های مهم جریان سیال و ویژگی‌های دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ و اصول عملکرد آن بحث می‌شود و همچنین رابطه سرعت و ولتاژ خروجی جریان‌سنج سیم‌داغ نیز توضیحاتی ارائه می‌شود.

۱-۱- کمیت‌های مهم جریان سیال:

برای بررسی آثار جریان سیال و نحوه تأثیر آن بر محیط‌های واقعی و کنترل رفتار آن، نیاز به اندازه‌گیری کمیت‌های جریان سیال است. برای مثال در مهندسی سازه برای تعیین نحوه بارگذاری حاصل از نیروی باد و یا شناخت جریان‌ها در اطراف سازه‌هایی نظیر ساختمانها، پلها، استادیومها و ... نیاز به مشخص نمودن توزیع فشار، توزیع سرعت، طیف اغتشاشهای جریان‌ها و ضخامت لایه مرزی جریان‌ها است. برای بررسی و اندازه‌گیری این کمیتها نیاز به انجام آزمایش است، بدین ترتیب که مدل کوچکی از سازه مورد نظر را ساخته و با استفاده از تونل باد، رفتار جریان‌ها در اطراف مدل بررسی می‌شود. آنچه که در این روش حائز اهمیت است، قرار گرفتن مدل در داخل لایه مرزی و ایجاد تشابه هندسی و دینامیکی میان جریان‌های درون تونل باد و جریان اتمسفری می‌باشد. این امر توسط پارامترهایی نظیر عدد رینولدز، نحوه توزیع سرعت در داخل تونل باد و اندازه‌گیری طیف اغتشاشهای جریان‌ها انجام می‌شود. به‌منظور

می‌شود. به منظور بررسی رفتار ارتعاشی سازه‌ها اندازه‌گیری نوع فرکانس اغتشاشهای جریان هوا بسیار حائز اهمیت است، بنابراین مشاهده می‌شود که اندازه‌گیری دقیق کمیت‌های جریان هوا در اطراف مدل بسیار پر اهمیت بوده و هرگونه اشتباه و خطایی در مقادیر اندازه‌گیری شده می‌تواند باعث اشتباه در طراحی شود.

یکی از کمیت‌های تأثیرگذار بر عملکرد جریان سیال، سرعت جریان سیال است. سرعت لحظه‌ای جریان سیال را می‌توان به شکل برداری $\vec{V}(t)$ نشان داد که دارای مؤلفه‌های $W(t), V(t), U(t)$ به ترتیب در راستای مختصات دکارتی است. سرعت لحظه‌ای را می‌توان به صورت مجموع سرعت متوسط و اغتشاشهای سرعت نشان داد.

$$\begin{aligned}U(t) &= \bar{U} + u(t) \\V(t) &= \bar{V} + v(t) \\W(t) &= \bar{W} + w(t)\end{aligned}\quad (1-1)$$

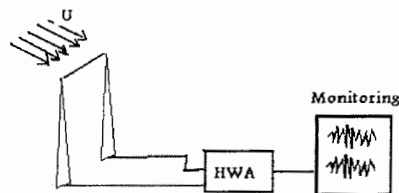
اندازه‌گیری مؤلفه‌های اغتشاشی u ، v ، w و تغییرات آنها در حوزه زمان و یا فرکانس در شناخت جریان سیال و کنترل آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فرکانس اغتشاشهای سرعت جریان سیال از چند هرتز در جریان آرام تا چندین کیلوهرتز در جریان آشفتنه متغیر بوده و به عدد رینولدز بستگی دارد. همچنین اثر متقابل u و v و w بر روی یکدیگر نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

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 سیم‌داغ و ... سرعت جریان سیال اندازه‌گیری می‌شود. در روش مستقیم، خروجی دستگاه جریان‌سنج

سیم‌داغ که معمولاً به صورت ولتاژ می‌باشد باید در ابتدا کالیبره شده، سپس با استفاده از ولتاژ خروجی و معادله‌های کالیبراسیون سرعت جریان سیال اندازه‌گیری شود.

در روش غیرمستقیم با استفاده از لوله پیتوت، فشار دینامیکی جریان سیال اندازه‌گیری و با استفاده از قوانین مکانیک سیالات سرعت متوسط جریان سیال تعیین می‌شود. در این روش اغتشاشهای جریان سیال را نمی‌توان اندازه‌گیری کرد. 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 هنگامی که پاسخ سریع وسیله اندازه‌گیر در مقابل تغییرات جریان سیال مورد نظر باشد، از دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ و یا از دستگاه جریان‌سنج لیزری استفاده می‌شود.

دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ (*Hot-Wire Anemometry*)، ابزاری است که به وسیله آن می‌توان سرعت لحظه‌ای جریان سیال را با فرکانس بسیار بالا اندازه‌گیری نموده و با استفاده از سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده، سرعت متوسط، اغتشاشهای جریان سیال، تنشهای رینولدز، زاویه جریان (در صورت استفاده از سیم‌داغ دو و یا سه بعدی)، دمای جریان، جهت حرکت جریان (به خصوص در جریانهای معکوس)، کمیت‌های جریان دو فازی و ... را اندازه‌گیری نمود.



شکل (۱-۱) نمای کلی دستگاه HWA

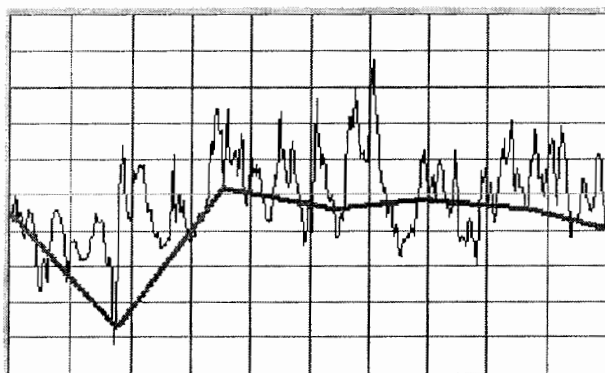
۱-۲- ویژگیهای دستگاه جریان سنج سیم‌داغ:

همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد، دستگاه جریان سنج سیم‌داغ به‌عنوان یکی از ابزارهای اصلی اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال می‌باشد. با توجه به ویژگیهای منحصر به فرد این دستگاه، اصلی‌ترین و عمده‌ترین کاربرد آن در انجام آزمایشهای جریانهای آشفته گاز و یا هوا است. البته اندازه‌گیری به‌وسیله این دستگاه در جریانهایی با اغتشاشهای کم یا متوسط (کمتر از ۰.۲۵٪) از دقت بالاتری نسبت به سایر دستگاههای اندازه‌گیری برخوردار است. عمده امتیازات دستگاه جریان سنج سیم‌داغ عبارتند از:

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

۲- با کاهش سرعت، دقت دستگاههای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال به شدت پایین می‌آید. به‌عنوان مثال در سرعت 1 m/s فشار دینامیکی 0.6 Pa بوده و اندازه‌گیری آن عاری از خطا نمی‌باشد. این در حالی است که دقت دستگاه جریان سنج سیم‌داغ با کاهش سرعت افزایش می‌یابد.

۳- دستگاه جریان سنج سیم‌داغ دارای قابلیت اندازه‌گیری سرعت جریان سیال در محدوده وسیعی است. به‌عنوان مثال برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در محدوده 5 m/s الی 100 m/s با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت، اندازه‌گیری فشار دینامیکی در بازه 15 Pa الی 6000 Pa نیاز است. اندازه‌گیری فشار دینامیکی با دقت مناسب در این بازه پیچیده و سخت است.



شکل (۲-۱) اسیلوگرام سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده به وسیله جریان سنج سیم داغ و مقایسه با دستگاه اندازه‌گیری با فرکانس

پایین تر - فاصله بین خطوط زمان 50 ms

۴- دقت دستگاه جریان سنج سیم داغ در شرایط مناسب حدود 0.2% - 0.1% است.

۵- پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ حدود 50 kHz می‌باشد که می‌توان پاسخ فرکانسی را تا چند صد کیلوهرتز افزایش داد. شکل (۲-۱) اسیلوگرام سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده به وسیله جریان سنج سیم داغ و مقایسه آن با دستگاه اندازه‌گیری با فرکانس پایین تر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل فوق در صورتی که جریان آشفته باشد و اندازه‌گیری با استفاده از دستگاه اندازه‌گیر جریان سنج سرعت با پاسخ فرکانسی کم انجام شود، اندازه‌گیری به نحو مطلوبی نخواهد بود و دارای خطا است.

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

۷- سنسورهای سیم داغ متداول با قطر $5\text{ }\mu\text{m}$ و طول $1/25\text{ mm}$ فضای کمی را اشغال می‌کنند. اگرچه سنسورهای کوچکتر با قطر $0.25\text{ }\mu\text{m}$ و طول 1 mm نیز موجود می‌باشند ولی دستگاه‌های اندازه‌گیر دیگر حجم بیشتری را دارا می‌باشند.

هنگام استفاده از دستگاه جریان سنج سیم داغ ممکن است با مشکلاتی مواجه شد که روشهای رفع

آنها در زیر ارایه شده است:

الف- آلودگیهای موجود در جریان روی سنسور اثر گذاشته و مشخصه‌های کالیبراسیون را تغییر می‌دهد، در نتیجه سبب افزایش پاسخ‌زمانی می‌شود. در این حالت باید پراب را تمیز نموده و دوباره کالیبره نمود.

ب- سنسور جریان‌سنج سیم‌داغ بسیار ظریف است و به‌سادگی از بین می‌رود، اما در صورتی‌که با دقت از آن استفاده شود، مدت زمان طولانی قابل استفاده خواهد بود. در مطالعات جریان‌هوا با سرعت کم، مهمترین عاملی که سبب از بین رفتن سنسور می‌شود بی‌تجربگی کاربر است.

ج- در جریانهای با سرعت بالا، ممکن است سنسور سیم‌داغ در اثر برخورد ذرات ریز موجود در جریان سیال پاره شود که این مشکل را می‌توان با قراردادن فیلتر در مسیر جریان رفع نمود. بالا رفتن دما از حد مجاز نیز باعث سوختن سنسور می‌شود.

د- پراب سیم‌داغ هنگامی‌که در جریان قرار می‌گیرد، اغتشاشهایی در جریان سیال ایجاد می‌کند که با طراحی مناسب پراب می‌توان خطاهای آن را به حداقل رساند.

۱-۳- اجزای تشکیل‌دهنده دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ:

شکل (۱-۳) شماتیک سیستم دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ به‌همراه تجهیزات جانبی آن را نشان می‌دهد. اجزای اصلی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ پراب، مدار الکترونیکی دما ثابت (Constant Temperature) CT، مدار الکترونیکی تطبیق دهنده سیگنال (Signal Conditioner) SC، برد (Data Acquisition) DAQ و نرم‌افزار مربوطه می‌باشند. به‌منظور اصلاح تأثیر دما بر اندازه‌گیری دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ، نیاز به استفاده از دماسنج برای اندازه‌گیری دما است. همچنین به‌منظور اندازه‌گیری توزیع و تغییرات محلی سرعت جریان سیال نیاز به مکانیزم انتقال دهنده پراب و برای کالیبره نمودن دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ نیاز به تونل باد و یا دستگاه

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

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

مدارهای الکترونیکی CT و CV دارای حلقه بازخورد بوده و به‌طور خودکار برای اندازه‌گیری سرعت

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

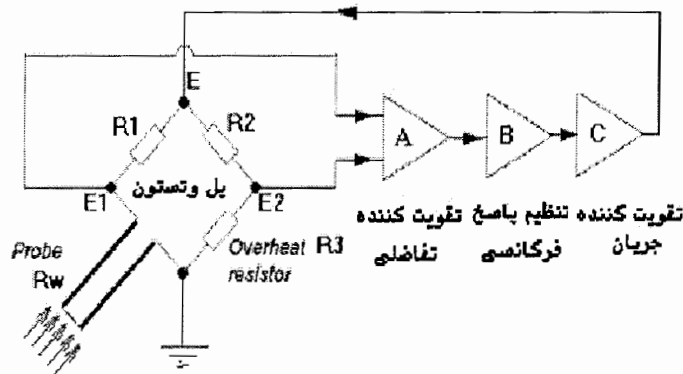
آن را برای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال تنظیم نمود.

۱-۵- مدار الکترونیکی دما ثابت CT :

مدار الکترونیکی دما ثابت CT یکی از قسمتهای اصلی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ است، شکل (۴-۱)

این مدار را به‌طور شماتیک نشان می‌دهد. مدار الکترونیکی دما ثابت CT شامل پل‌وتسون، تقویت‌کننده

تفاضلی، تنظیم‌کننده پاسخ فرکانسی و تقویت‌کننده جریان است.



شکل (۴-۱) مدار الکترونیکی دما ثابت CT

پل‌وتسون 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 CT طوری طراحی شده است که به‌طور خودکار پل‌وتسون را متوازن می‌کند، به‌صورتی که در حالت توازن (E_1-E_2) نزدیک به صفر است. با استفاده از مقاومت متغیر R_3 سنسور دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ R_w گرم شده و مقاومت سنسور سیم‌داغ طبق رابطه $R_w = (R_3 \cdot R_1) / R_2$ محاسبه می‌شود. دمای سنسور در مقاومت R_w نیز طبق معادله $(T_w - T_a) = (R_w / R_a - 1) / \alpha_a$ محاسبه می‌شود که در آن T_a دمای محیط، R_a مقاومت سنسور در دمای محیط و α_a ضریب حرارتی سنسور در دمای T_a است.

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 سنسوری از جنس تنگستن نشود. نسبت مقاومت‌های R_2 / R_1 را نسبت پل می‌نامند. با توجه به این که جریان‌الکتریکی باید بیشتر از شاخه‌ای از پل‌وتسون که شامل سنسور سیم‌داغ است عبور کند، بنابراین نسبت پل حدود ۵ الی ۲۰ انتخاب می‌شود. در مواردی که فاصله سنسور تا مدار الکترونیکی CT طولانی است، همچنین برای به‌دست آوردن پاسخ فرکانسی بالا از پل‌وتسون با نسبت $R_2 / R_1 = 1$ نیز استفاده می‌شود.

هنگامی که سنسور در جریان‌سیال قرار می‌گیرد، مقاومت سنسور کاهش یافته و پل‌وتسون از حالت توازن خارج می‌شود در نتیجه اندازه (E_1-E_2) افزایش می‌یابد. این افزایش توسط تقویت‌کننده تفاضلی، تقویت‌شده و با استفاده از تقویت‌کننده جریان به‌طور خودکار به پل‌وتسون جریان‌الکتریکی بیشتری اعمال می‌شود، بنابراین ولتاژ بالای پل E افزایش یافته و این ولتاژ با سرعت جریان‌سیال طبق معادله $E^2 = A + BU^n$ نیز مشخص می‌شود.

در این حالت اگرچه مقدار (E_1-E_2) نزدیک به صفر است، اما با افزایش سرعت جریان‌سیال این مقدار نیز افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش سرعت جریان‌سیال، مقاومت سنسور افزایش یافته و در

نتیجه پلوتسون از توازن خارج شده در این حالت تقویت کننده ولتاژ و جریان به طور خودکار میزان جریان الکتریکی عبور کننده از سنسور را کاهش داده و در نتیجه پلوتسون دوباره متوازن می شود. با تغییر جریان الکتریکی عبور کننده از سنسور، ولتاژ اعمالی E به بالای پلوتسون تغییر کرده و با استفاده از این ولتاژ می توان تغییرات سرعت جریان سیال را اندازه گیری نمود. با استفاده از تنظیم کننده پاسخ فرکانسی که شامل تقویت کننده و فیلتر می باشد، پاسخ فرکانسی دستگاه جریان سنج سیم داغ به همراه سنسور آن بهینه می شود.

نسبت فراگرمایی (Overheat Ratio): نسبت فراگرمایی معادل با نسبت $(R_w - R_a)/R_a$ تعریف می شود که R_w مقاومت سنسور در دمای عملکرد و R_a مقاومت سنسور در دمای محیط است. به منظور اصلاح اثر تغییرات دمای محیط بر اندازه گیری سرعت لحظه ای، لازم است اندازه دقیق نسبت فراگرمایی $(R_w - R_a)/R_a$ مشخص شود، در نتیجه می بایست R_w و T_w تعیین شوند. برای یک سنسور از جنس تنگستن نسبت فراگرمایی، معمولاً حدود $1 \sim 0.6$ انتخاب می شود. همان طور که بیان شد هر چه دمای سنسور بالاتر باشد، حساسیت آن نسبت به تغییرات سرعت بیشتر خواهد بود. ولی هنگامی که از سنسور با جنس تنگستن استفاده می شود، برای جلوگیری از اکسید شدن سنسور لازم است که دمای سنسور در هر نقطه ای از آن کمتر از $350^\circ C$ باشد.

مقاومت پراب متشکل از مقاومت سنسور R_s و مقاومت اتصالات و کابل R_l است که طبق رابطه $R_p = R_s + R_l$ بیان می شود. برای اندازه گیری مقاومت پراب از اهم متر استفاده می شود، برای اندازه گیری صحیح مقاومت پراب باید جریان الکتریکی عبوری از سنسور کمتر از $1 mA$ باشد تا موجب گرم شدن سنسور و در نتیجه، تغییر مقاومت آن نشود. در انتخاب نسبت فراگرمایی باید دقت شود که فقط مقاومت سنسور در نظر گرفته شود. در صورتی که مقاومت پراب یعنی مقاومت سنسور، اتصالات و کابل آن R_p در نظر گرفته شود، احتمال سوختن سنسور وجود دارد. به مثال زیر توجه کنید: سنسور سیم داغ از

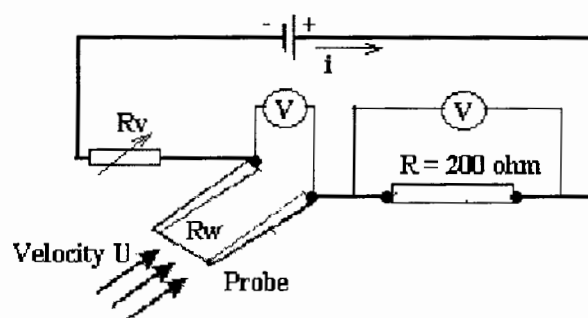
جنس تنگستن با طول $1/25\text{ mm}$ و قطر $5\ \mu\text{m}$ ، معمولاً دارای مقاومت $R_a = R_{20} = 3/5\ \Omega$ است. با انتخاب نسبت فراگرمایی برابر $0/8$ ، مقاومت کاری سنسور سیم‌داغ برابر $6/3 = 1/8 \times 3/5 = 6/3$ است. با توجه به معادله‌های بالا میانگین و ماکزیمم دمای سنسور به ترتیب برابر 230°C و 290°C است.

برای پرابی که $R_{s,a} = 3/5\ \Omega$ و $R_l = 1/6\ \Omega$ است، $R_{p,a} = 5/1\ \Omega$ بوده و با نسبت فراگرمایی $0/8$ ، $R_{s,w} = 6/3\ \Omega$ خواهد بود. بنابراین $R_{p,w} = 6/3 + 1/6 = 7/1\ \Omega$ است. در صورت نادیده گرفتن R_l آنگاه $R_{s,a} = R_{p,a}$ بوده و با نسبت فراگرمایی $0/8$ ، $R_{s,w} = 1/8 \times 5/1 = 9/2\ \Omega$ است. در صورتی که نسبت فراگرمایی واقعی برابر با $1/15 = (9/2 - 1/6) / (5/1 - 1/6)$ باشد، دمای میانگین سنسور برابر 340°C و ماکزیمم دمای سنسور 425°C خواهد بود که این امر سبب سوختن و یا کم شدن طول عمر سنسور سیم‌داغ از جنس تنگستن خواهد شد. بنابراین دانستن و یا اندازه‌گیری مقاومت جوش و کابل پراب مهم است و باید در هنگام انتخاب، نسبت فراگرمایی و مقاومت متغیر پل‌وتسون مد نظر قرار گیرد.

۱-۶- اصول عملکرد دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ:

دستگاه بادسنج سیم‌داغ جهت اندازه‌گیری سرعت و دمای جریان سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد که این اندازه‌گیری‌ها از طریق یک سیم‌داغ و یا یک فیلم نازک داغ می‌باشد که به ترتیب بر روی دو پایه و یا بر روی یک زیر لایه قرار می‌گیرند. چگونگی اندازه‌گیری سرعت و دمای سیال، از طریق انتقال حرارت جابجایی در هنگام قرار گرفتن سنسور سیم‌داغ در جریان سیال است. این انتقال حرارت جابجایی، از سیم‌داغ که در دمای T_w است به هوا که در دمای T_a است صورت می‌گیرد که رابطه آن به صورت $Q = h \cdot (T_w - T_a)$ است. در اینجا Q نرخ انتقال حرارت در واحد سطح و h نیز ضریب جابجایی هوا می‌باشد. این انتقال حرارت و یا در واقع مقدار ضریب جابجایی هوا h ، متغیری است که مقدار آن به خواص

سیال نظیر لزجت‌سنماتیکی μ ، چگالی ρ ، ضریب پخش حرارتی α و سرعت سیال U و همچنین هندسه سیم (قطر سیم d) می‌باشد که در اعداد بی‌بعد Re و Pr و Nu خلاصه می‌شود (H.H.Bruun).



(۵-۱) شماتیک مدار اندازه‌گیر منحنی مشخصه

۷-۱- انتقال حرارت:

همان‌گونه که بیان شد عملکرد جریان‌سنج سیم‌داغ بر اساس نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی از سنسور سیم‌داغ به جریان سیال می‌باشد که این سنسور توسط جریان الکتریکی I گرم می‌شود. نرخ انتقال حرارت که با رابطه $Q = h \cdot A \cdot (T_w - T_a)$ بیان می‌شود به عواملی همچون مشخصه‌های سیال مانند چگالی ρ ، لزجت سینماتیکی μ ، ضریب هدایت گرمایی k ، گرمای ویژه C_p ، ضریب پخش حرارتی α ، سرعت جریان سیال U ، دمای جریان سیال T ، هندسه سنسور سیم‌داغ مانند قطر d ، طول l و دمای سیم داغ T_w بستگی دارد. مجموعه این عوامل را می‌توان در اعداد بی‌بعد زیر خلاصه نمود:

عدد رینولدز برابر با نسبت نیروی اینرسی سیال به نیروی لزجی سیال می‌باشد. با

افزایش عدد رینولدز، مقدار نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی نیز افزایش می‌یابد.

عدد پرانتل برابر با نسبت پخش اندازه حرکت سیال به پخش حرارتی سیال است و در واقع میدان سرعت سیال را به میدان دما در سیال مربوط می‌کند. هر چه عدد پرانتل بیشتر باشد، پخش حرارتی کوچک‌تر بوده و انتقال حرارت بیشتری از طریق جابه‌جایی صورت می‌گیرد.

عدد ناسلت برابر با نسبت انتقال حرارت جابه‌جایی به انتقال حرارت هدایت است که با افزایش عدد ناسلت مقدار انتقال حرارت جابه‌جایی در سیم‌داغ نیز افزایش می‌یابد.

عدد ماخ برابر نسبت سرعت جریان سیال U به سرعت صوت C در دمای سیال است. در جریان هوایی که سرعت آن بیش از 100 m/s است، اثر تراکم پذیری مشاهده شده و اثر تراکم‌پذیری در انتقال حرارت تأثیرگذار خواهد بود.

عدد گراشف که در آن β ضریب انبساط حجمی سیال است و برابر با نسبت نیروی شناوری به نیروی لزجی می‌باشد. در جریانهای با سرعتهای پایین که انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد اهمیت می‌یابد، عدد گراشف نقش مهمی را ایفا می‌کند.

عدد ناوسن که در آن λ برابر مسیر آزاد بین مولکولی است. در جریانهای سیال با چگالی پایین این عدد در انتقال حرارت نقش مهمی را ایفا می‌کند.

دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ برای اندازه‌گیری سرعت و دمای لحظه‌ای جریان سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. این اندازه‌گیرها توسط محاسبه میزان تبادل حرارت بین سنسور سیم‌داغ (یا فیلم‌داغ) و محیط انجام می‌شوند. با استفاده از تغییرات انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری ناشی از تغییر سرعت می‌توان سرعت جریان سیال را اندازه‌گیری نمود. نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی از سیم‌داغ در دمای T_w به هوا در دمای T_a ، به صورت $Q = h \cdot A(T_w - T_a)$ بیان می‌شود. Q نرخ انتقال حرارت و h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌باشد.

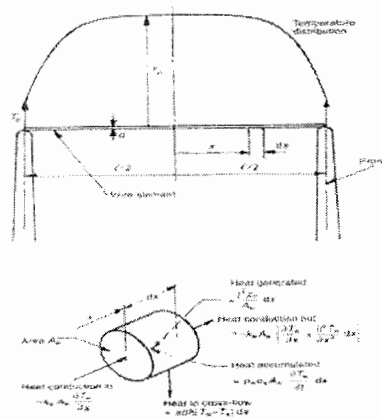
تغییر نرخ انتقال حرارت از سیم‌داغ به جریان سیال به سبب تغییر مقاومت الکتریکی سیم‌داغ (یا فیلم‌داغ) R_w و یا مقدار جریان الکتریکی I که باعث گرم شدن سیم می‌شود، همچنین تغییر ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ می‌شود. به کمک معادله کالپیراسیون مورد نظر، تغییرات سرعت و یا دمای جریان سیال اندازه‌گیری می‌شوند. این بخش ابتدا به تشریح نحوه عملکرد و حالت‌های کاری دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ، انتقال حرارت از سیم‌داغ و روابط مربوط به آن و سپس به تشریح حساسیت ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ به تغییرات دما و سرعت می‌پردازد.

دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ دارای سنسوری از جنس تنگستن، پلاتین و یا آلیاژهای آن است که^{۱۰} استفاده از جریان الکتریکی آن را گرم نموده و با توجه به مقدار انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری، سرعت سیال اندازه‌گیری می‌شود. نرخ انتقال حرارت به پارامترهای مختلفی نظیر جنس، شکل، ابعاد سنسور و همچنین مشخصه‌های سیال بستگی دارد. در این مرحله ابتدا مشخصه‌های سنسور و عملکرد آن در برابر تغییرات جریان الکتریکی و سرعت جریان سیال مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۷-۱- انتقال حرارت از سیمی با طول محدود (سنسور سیم‌داغ):

انتقال حرارت از سنسور سیم‌داغ با طول محدود با انتقال حرارت از سیم‌داغ با طول بی‌نهایت متفاوت بوده به طوری که در این حالت انتقال حرارت هدایتی از دو پایه سنسور نیز قابل توجه می‌باشد. سنسور سیم‌داغ دارای طول محدودی بوده که دو سر آن به پایه‌های پراب متصل می‌باشد. پایه‌های پراب در مقایسه با المان سنسور سیم‌داغ حجیم‌تر بوده و دمای آن T_p نزدیک به دمای سیال است. با توجه به این که دمای سنسور سیم‌داغ T_w ، بیشتر از دمای پایه‌ها است، بنابراین انتقال حرارت از سنسور سیم‌داغ به پایه‌ها از طریق هدایت صورت می‌گیرد و منجر به یک گرادیان دما در سنسور سیم‌داغ

می‌شود. توزیع دما را می‌توان با نوشتن معادله توازن انرژی برای المان کوچکی از سنسور به طول dx به دست آورد شکل (۶-۱).



شکل (۶-۱) هندسه سنسور سیم داغ و توازن انرژی برای المان سنسور سیم داغ

$$d\dot{Q}_e = d\dot{Q}_{fc} + d\dot{Q}_c + d\dot{Q}_R + d\dot{Q}_s \quad (۲-۱)$$

که:

$d\dot{Q}_e$: نرخ تولید حرارت به وسیله جریان الکتریکی

$d\dot{Q}_{fc}$: نرخ انتقال حرارت به طریق جابه‌جایی اجباری

$d\dot{Q}_c$: نرخ انتقال حرارت به طریق هدایت

$d\dot{Q}_R$: نرخ انتقال حرارت به طریق تشعشع

$d\dot{Q}_s$: نرخ ذخیره گرما در سیم

در این حالت نرخ حرارت تولیدشده به وسیله جریان الکتریکی I برای یک المان محدود از سنسور سیم‌داغ برابر است با:

$$d\dot{Q}_e = \frac{I^2 \chi_w}{A_w} dx \quad (3-1)$$

χ_w مقاومت ویژه الکتریکی سنسور سیم‌داغ در دمای T_w و A_w سطح مقطع سنسور سیم‌داغ است. نرخ انتقال حرارت به طریق جابه‌جایی اجباری برای المان محدود طبق معادله (۴-۱) بیان می‌شود:

$$d\dot{Q}_{fc} = \pi dh(T_w - T_a) dx \quad (4-1)$$

نرخ انتقال حرارت از طریق هدایت برای المان محدود طبق معادله (۵-۱) بیان می‌شود:

$$d\dot{Q}_c = -k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} dx \quad (5-1)$$

k_w ضریب هدایت گرمایی سیم در دمای T_w می‌باشد. نرخ انتقال حرارت به طریق تشعشعی برابر است با:

$$d\dot{Q}_r = \pi d \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_a^4) dx \quad (6-1)$$

σ ثابت استفان بولتزمن، ε ضریب نشر سنسور و T_a دمای محیط می‌باشد. در بیشتر موارد $d\dot{Q}_r$ (میزان انتقال حرارت به طریق تشعشع) در مقایسه با انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی و هدایت، بسیار کوچک و قابل صرف نظر کردن است. نرخ گرمای ذخیره شده در المان سنسور سیم‌داغ برابر است با:

$$d\dot{Q}_s = \rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dx \quad (7-1)$$

ρ_w چگالی سنسور سیم‌داغ و c_w گرمای ویژه سنسور سیم‌داغ در واحد جرم است. با جاگذاری معادله‌های نرخ انتقال حرارت در معادله (7-1) می‌توان نوشت:

$$k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{I^2 \chi_w}{A_w} - \pi dh(T_w - T_a) - \rho_w c_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \quad (8-1)$$

در حالت پایا $\partial T_w / \partial t = 0$ بوده و با فرض این‌که دمای $(T_w - T_a)$ ثابت باشد، معادله فوق را می‌توان به صورت معادله زیر نوشت:

$$\frac{d^2 T_l}{dx^2} + K_1 T_l + K_2 = 0$$

که در آن K_1, T_l و K_2 عبارتند از:

$$T_l = T_w - T_a$$

$$K_1 = \frac{I^2 \chi_a \alpha_a}{k_w A_w^2} - \frac{\pi dh}{k_w A_w}$$

$$K_2 = \frac{I^2 \chi_a}{k_w A_w^2}$$

۸-۱- اثر دما بر ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ:

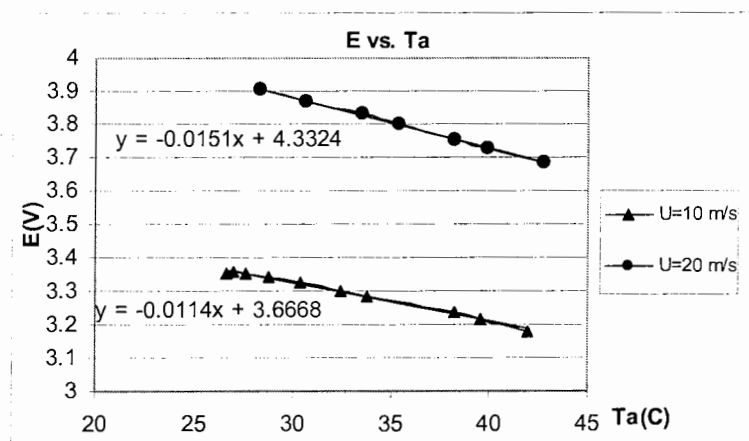
ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ بستگی به میزان انتقال حرارت از سنسور سیم داغ به سیال دارد. میزان انتقال حرارت بستگی به اختلاف دمای سنسور سیم داغ و دمای محیط ($T_w - T_a$) و همچنین سرعت جریان سیال دارد. برای اندازه گیری سرعت جریان سیال، فرض بر این است که اختلاف دمای سنسور سیم داغ و سیال ثابت است.

در بسیاری از جریانها، دمای سیال T_a ممکن است با زمان تغییر کند. این تغییر دما ممکن است به علت حرارت الکتریکی موتور فن یک تونل باد مدار بسته و یا به علت نوسانهای دمای جریان سیال باشد. ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ در جریان با سرعت ثابت با تغییر دمای محیط T_a تغییر کرده و سبب بروز خطا می شود، به طوری که برای هر درجه افزایش دما در اندازه گیری جریان هوا، میزان خطا برابر ۱/۹۶٪ و در جریان آب به میزان ۱۲٪ است. تأثیر دمای جریان سیال بر اندازه گیری سرعت جریان سیال، توسط پژوهشگران زیادی با استفاده از روشهای تحلیلی و تجربی انجام گرفته است.

ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ متناسب با مقدار انتقال حرارت جابه جایی از سنسور سیم داغ به سیال است. مقدار انتقال حرارت بستگی به عدد ناسلت Nu و اختلاف دمای سنسور سیم داغ و

جریان سیال $(T_w - T_a)$ دارد. با کاهش این اختلاف دما، ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ نیز کاهش می‌یابد. این کاهش بستگی به سرعت جریان سیال، نوع سنسور و نسبت فراگرمایی دارد.

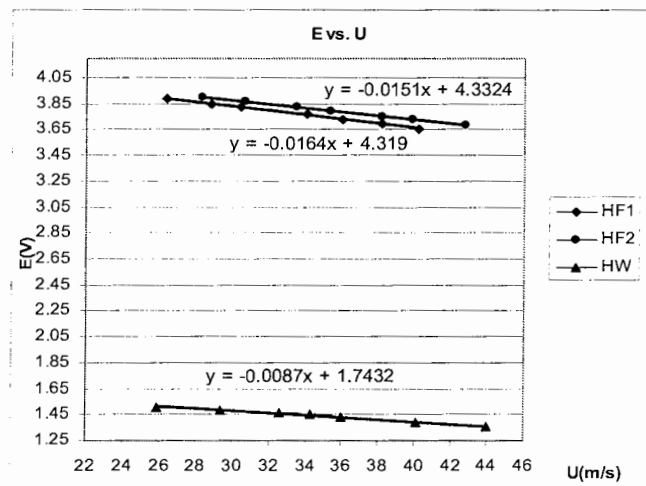
شکل (۷-۱) نحوه کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ، برای سنسور فیلم‌داغ را در نسبت فراگرمایی ۰/۴ نشان می‌دهد. این منحنیها برای دو سرعت مختلف 20 m/s و 10 m/s رسم شده‌اند. نکته قابل توجهی که در این منحنیها مشاهده می‌شود، این است که با افزایش سرعت جریان سیال، نرخ کاهش ولتاژ نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر هر چه سرعت سیال افزایش یابد، شیب خط کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ E نیز افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در کاهش مقدار T_w و حساس‌تر شدن سنسور نسبت به دمای محیط دانست. هر چه سرعت افزایش یابد، میزان ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ نیز افزایش یافته و در نتیجه با توجه به ثابت بودن بهره مدار الکترونیکی، مقدار ΔE پل‌وتسون نسبت به تقویت کننده باید افزایش یابد. نتیجه این امر، کاهش R_w و در نتیجه T_w می‌باشد.



شکل (۷-۱) کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ برای سنسور فیلم‌داغ بر اثر افزایش دمای محیط در نسبت فراگرمایی

برای سرعت‌های $U=20\text{ m/s}$ و $U=10\text{ m/s}$

شکل (۸-۱) اثر دما بر کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ را برای سنسور فیلم‌داغ و سنسور سیم‌داغ نشان داده و مقایسه می‌نماید. شکل فوق نشان‌دهنده نحوه کاهش ولتاژ E بر حسب T_a برای هر دو سنسور سیم‌داغ و فیلم‌داغ می‌باشد. این مقایسه در سرعت ثابت $U = 10 \text{ m/s}$ و نسبت فراگرمایی $0/6$ انجام شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نرخ کاهش ولتاژ E بر حسب دمای T_a برای سنسور سیم‌داغ کمتر از سنسور فیلم‌داغ است. با توجه به این‌که فیلم‌داغ از جنس نیکل بوده و دارای ضریب مقاومت حرارتی بالاتری نسبت به تنگستن است، بنابراین در یک نسبت فراگرمایی ثابت، دمای سنسور سیم‌داغ T_w ، بیشتر از دمای سنسور فیلم‌داغ T_w می‌باشد. بنابراین از آن‌جا که دمای T_w سنسور فیلم‌داغ نسبت به سنسور سیم‌داغ کمتر است، سبب کوچکتر شدن اختلاف $T_w - T_a$ شده و تغییرات T_a تأثیر بیشتری را بر نرخ انتقال حرارت و در نتیجه کاهش ولتاژ خروجی جریان سنج سیم‌داغ خواهد داشت. کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ بستگی به نسبت فراگرمایی، سرعت جریان هوا و جنس سنسور دارد.



شکل (۸-۱) مقایسه شیب کاهش ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ برای سنسور فیلم و سیم‌داغ در سرعت $U = 10 \text{ m/s}$ و

نسبت فراگرمایی $0/6$

۱-۸-۱- جبران اثر دما به روش تحلیلی:

در حال حاضر با توجه به رشد سریع رایانه‌ها، اصلاح اثر دما بر سرعت به صورت تحلیلی انجام می‌شود. در این روش دمای سیال با استفاده از دماسنجهای الکترونیکی نظیر نوع NTC و یا PT اندازه‌گیری شده و از طریق کارت DAQ و یا درگاه سریال به رایانه ارسال می‌شود. ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ نیز با توجه به دمای جریان سیال اصلاح و سپس با استفاده از معادله‌های کالیبراسیون، سرعت جریان سیال مشخص می‌شود. با توجه به این که پاسخ زمانی دماسنجهای اشاره شده حدود چند ثانیه است، بنابراین استفاده از این روش برای جریان‌سیالی که تغییرات دمای آن سریع است، مناسب نمی‌باشد. در این روش پس از اندازه‌گیری دمای سیال، ضریب اصلاح طبق معادله ($Kanevce 1973$):

$$\left(\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a}\right)^n \quad (9-1)$$

مشخص می‌شود. T_r دمای مرجع، T_a دمای جریان سیال و T_w دمای سنسور سیم‌داغ است. در صورتی که بازه تغییرات دما حدود $\pm 5^\circ$ باشد، مقدار n نزدیک به 0.5 در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که تغییرات دما بالاتر باشد مقدار n به $0.4 \sim 0.3$ کاهش می‌یابد. با توجه به معادله (۹-۱) دانستن مقدار T_w مهم است. برای مشخص نمودن آن باید نسبت فراگرمایی همچنین مقاومت سنسور و یا مقاومت کابل و جوش پراب را به‌طور دقیق دانست.

پس از اندازه‌گیری ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ، ولتاژ را در ضریب اصلاح فوق ضرب

نموده:

$$E_{w,r} = E_w \left(\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a} \right) \quad (10-1)$$

سپس از معادله‌های کالیبراسیون برای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال استفاده می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان خطای اندازه‌گیری به ازای هر درجه تغییر دما را به کمتر از ۰/۴۵٪ کاهش داد. ضریب اصلاح دما را می‌توان به صورت دیگری نظیر معادله (۱۱-۱) بیان نمود (Dantec 2004):

$$\left(\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a}\right)^{0.5(1 \pm m)} \quad (11-1)$$

در معادله فوق $m = (T_f / T_a)^{\pm 0.17}$ می‌باشد و علامت (+) برای حالتی است که $T_a > T_r$ و علامت (-) زمانی که $T_a < T_r$ است. ضریب اصلاح فوق برای معادله کالیبراسیون از نوع چندجمله‌ای به کار برده می‌شود. این ضریب در ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج ضرب شده سپس با استفاده از معادله کالیبراسیون برای اصلاح سرعت جریان سیال استفاده می‌شود.

در صورتی که از معادله توانی (King) $E^2 = A + BU^n$ استفاده شود، A و B ضرایب کالیبراسیون در

دمای مرجع می‌باشند که با توجه به معادله‌های زیر اصلاح می‌شوند:

$$A_{corr} = ((T_w - T_a) / (T_w - T_r))^{(1 \pm m)} (k_{fa} / k_{fr}) (\rho_{r_{fa}} / \rho_{r_{fr}})^{0.2} A \quad (12-1)$$

$$B_{corr} = ((T_w - T_a) / (T_w - T_r))^{(1 \pm m)} (k_{fa} / k_{fr}) (\rho_{r_{fa}} / \rho_{r_{fr}})^{0.33} (\rho_{fa} / \rho_{fr})^n$$

$$(\mu_{fa} / \mu_{fr})^{-n} B_r \quad (13-1)$$

زیرنویسهای f_a و f_r مشخص‌کننده دمای فیلم بوده و طبق معادله‌های $(T_w + T_r) / 2$

و $(T_w + T_a) / 2$ مشخص می‌شوند. سپس ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ طبق معادله:

$$U = ((E^2 - A_{corr}) / B_{corr})^{1/n} \quad (14-1)$$

به سرعت جریان سیال تبدیل می‌شود. با استفاده از این روشها می‌توان خطای اندازه‌گیری ناشی از تغییرات دمای جریان سیال را به کمتر ۰/۱٪ \pm از کاهش داد. برای کاهش اثر دما در اندازه‌گیری سرعت

جریان سیال (Mayle & Anderson 1991) معادله کالیبراسیون را به صورت معادله (۱۵-۱) پیشنهاد

دادند:

$$U = B_0 + B_1 \left[\frac{E}{\Delta T} \right]^2 + B_2 \left[\frac{E}{\Delta T} \right]^3 + B_3 \left[\frac{E}{\Delta T} \right]^4 \quad (15-1)$$

که در آن $\Delta T = T_w - T_a$ می باشد.

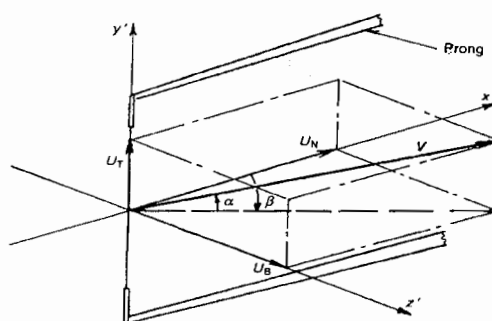
۹-۱- رابطه سرعت جریان سیال و ولتاژ خروجی جریان سنج سیم داغ:

همان گونه که بیان شد اصول عملکرد جریان سنج سیم داغ بر اساس انتقال حرارت از یک سنسور سیم داغ و یا فیلم داغ به جریان سیال است. به منظور اندازه گیری سرعت جریان سیال باید اثر عوامل مؤثر در انتقال حرارت به غیر از سرعت جریان سیال را به حداقل رسانده و یا تأثیر آن را در نظر داشته و اصلاحات لازم در اندازه گیریهای سرعت را انجام داد. انتقال حرارت از سنسور سیم داغ یک کمیت اسکالر بوده در حالی که سرعت جریان سیال یک کمیت برداری است.

معادله توانی (King) $E^2 = A + BU^n$ رابطه سرعت جریان سیال و مقدار انتقال حرارت از سنسور

سیم داغ را بیان می کند. معادله فوق با فرض یک بعدی بودن جریان سیال به دست آمده است که در این

حالت با دانستن جهت جریان سیال، اندازه U یک کمیت اسکالر خواهد بود.



شکل (۹-۱) بردار سرعت و مؤلفه های آن نسبت به مختصات سنسور

در صورتی که جهت جریان سیال مشخص نباشد، معادله فوق را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$E^2 = A + BV_e^n \quad (۱۶-۱)$$

در این حالت V_e سرعت مؤثر نامیده می شود که کمیتی اسکالر است و مقدار آن برابر مقدار سرعت جریان سیال نیست.

بردار سرعت $\vec{V} = (U, V, W)$ در شکل (۹-۱) نشان داده شده است که می توان مؤلفه های آن را نسبت به مختصات کارتزین واقع در مرکز سنسور به صورت $\vec{V} = (U_N, U_T, U_B)$ یا $\vec{V} = (|\vec{V}|, \alpha, \beta)$ بیان نمود. U_N مؤلفه سرعت عمود بر سنسور و موازی با ساقه پراب، U_T مؤلفه سرعت مماس با سنسور، U_B مؤلفه سرعت عمود بر صفحه U_N و U_T است. $|\vec{V}|$ اندازه بردار سرعت، α زاویه یاو و β زاویه پیچ است. با توجه به شکل (۹-۱) رابطه بردار سرعت با مؤلفه های آن به صورت زیر بیان می شود:

$$U_N = |\vec{V}| \cos \alpha \cos \beta \quad \text{الف (۱۷-۱)}$$

$$U_B = |\vec{V}| \cos \alpha \sin \beta \quad \text{ب (۱۷-۱)}$$

$$U_T = |\vec{V}| \sin \alpha \quad \text{ج (۱۷-۱)}$$

باتوجه به این که مؤلفه های بردار سرعت جریان سیال، اثر یکسانی بر روی انتقال حرارت ندارند.

سرعت مؤثر ناشی از انتقال حرارت طبق معادله (Jørgensen 1971a) بیان می شود:

$$V_e^2 = U_N^2 + k^2 U_T^2 + h^2 U_B^2 \quad (۱۸-۱)$$

ضرایب k و h حساسیت سنسور نسبت به زوایای یو α و پیچ β می‌باشد. در صورتی که جریان سیال یک‌بعدی و موازی پایه‌های پراب سنسور سیم‌داغ باشد، مقادیر U_T و U_B برابر صفر بوده و $V_e = U_N$ خواهد بود. در این حالت می‌توان با استفاده از پراب یک‌بعدی به همراه یک دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ، سرعت جریان سیال را اندازه‌گیری نمود. برای جریان دوبعدی در صورتی که سنسورها و پایه‌های پراب در یک صفحه قرار داشته باشند، $U_B = 0$ بوده و $V_e^2 = U_N^2 + k^2 U_T^2$ است. در این حالت با دانستن مقدار k که از کالیبراسیون جهت تعیین شده است و با استفاده از پراب دوبعدی می‌توان U_N و U_T را به‌طور هم‌زمان به دست آورد، همچنین با دانستن ضرایب حساسیت k و h نسبت به زوایای یو α و پیچ β و با استفاده از یک پراب سه مؤلفه‌ای می‌توان مؤلفه‌های بردار سرعت را به‌طور هم‌زمان به دست آورد.

اندازه‌گیری جریان سیال یک‌بعدی:

در جریان یک‌بعدی $V = W = 0$ است، بنابراین $V_e = U$ بوده و می‌توان سرعت را با استفاده از یک پراب یک‌بعدی نظیر SN اندازه‌گیری نمود. در چنین حالتی ابتدا باید جهت جریان مشخص شود. جهت برخی از جریانها مانند جریان خروجی از نازل و یا جریان در لایه مرزی بر روی صفحه تخت مشخص است، ولی جهت جریان در بسیاری از پژوهشها نامشخص می‌باشد.

در صورتی که جریان دوبعدی باشد، پراب را در صفحه جریان سیال قرار داده با تغییر زاویه یو α ، ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ اندازه‌گیری می‌شود.

همان‌گونه که بیان شد، به‌منظور افزایش دقت اندازه‌گیری سرعت جریان سیال با استفاده از مدار تطبیق‌دهنده سیگنال، ولتاژ خروجی مدار CT را آفست نموده و بهره G متناسب با بازه سرعت جریان سیال به ولتاژ آفست شده، اعمال می‌شود. بنابراین در اندازه‌گیری سرعت در جریانی که جهت آن

مشخص است، پس از دریافت داده‌ها $E_G(n)$ از طریق کارت DAQ ، به صورت نرم افزاری مطابق معادله زیر:

$$E(n) = \frac{1}{G} E_G(n) + E_{off} \quad (19-1)$$

ولتاژ خروجی از مدار تطبیق‌دهنده دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ را بر بهره اعمالی تقسیم نموده و مقدار آفست به آن اضافه می‌شود. سپس اثر دما بر روی ولتاژ $E(n)$ اعمال شده و ولتاژ خروجی $E_c(n)$ اصلاح می‌شود. مقدار $E_c(n)$ ولتاژ دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ بوده که رابطه غیرخطی با سرعت جریان سیال دارد. با استفاده از معادله‌های کالیبراسیون به دست آمده، ولتاژ خروجی $E_c(n)$ به سرعت جریان سیال تبدیل می‌شود.

۱-۹-۱- تبدیل ولتاژ به سرعت لحظه‌ای و تجزیه و تحلیل آن:

ولتاژ $E_c(n)$ که رابطه غیر خطی با سرعت مؤثر V_e دارد به دو روش به سرعت مؤثر V_e قابل تبدیل است. ۱- با استفاده از مدارات الکترونیکی و به صورت آنالوگ ۲- با استفاده از نرم‌افزار و یا روشهای دیجیتالی، که در حال حاضر با توجه به رشد سریع رایانه‌ها و میکروکنترلرها روش اول منسوخ شده است. همان‌گونه که در بخشهای قبل بیان شد، با استفاده از معادله کالیبراسیون $E = f(U)$ و معادله $U = f^{-1}(E)$ می‌توان ولتاژ $E_c(n)$ را که به صورت دیجیتال از طریق کارت DAQ وارد رایانه شده است را به سرعت مؤثر جریان سیال تبدیل نمود. اگر معادله کالیبراسیون به صورت توانی $(King)$ باشد، سرعت مؤثر طبق معادله زیر تعیین می‌شود:

$$U(n) = V_e(n) = \left(\frac{E_c(n)^2 - A}{B} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (20-1)$$

A ، B و n ضرایب کالیبراسیون می‌باشند که با انجام کالیبراسیون سرعت، مقادیر فوق مشخص شده‌اند. اگر معادله کالیبراسیون به صورت چند جمله‌ای به دست آمده باشد، ولتاژ طبق معادله زیر به سرعت لحظه‌ای جریان سیال تبدیل می‌شود:

$$U(n) = V_e(n) = C_0 + C_1 E_c(n) + C_2 E_c(n)^2 + C_3 E_c(n)^3 + C_4 E_c(n)^4 + C_5 E_c(n)^5 \quad (21-1)$$

برای تبدیل ولتاژ به سرعت، طبق معادله چند جمله‌ای (21-1) نیاز به 25 محاسبه ضرب و جمع است که زمانی طولانی در محاسبات رایانه محسوب می‌شود. لیکن با رشد سریعی که رایانه‌ها دارند این زمان مشکلی در تبدیل ولتاژ لحظه‌ای به سرعت لحظه‌ای ایجاد نمی‌کند.

زمان محاسبه چند جمله‌ای با درجه 4، معادل با محاسبه معادله معکوس توانی (20-1) است. به منظور کاهش زمان محاسبه با استفاده از رایانه‌های جدید می‌توان از روش جستجو در آرایه استفاده نمود. در این روش از یک آرایه دو بعدی استفاده می‌شود که بعد اول آرایه مربوط به ولتاژ $E_c(n)$ و بعد دوم آرایه مربوط به سرعت جریان سیال $U(n)$ می‌باشد. تعداد عضوهای این آرایه 2^n است که n تعداد بیت کارت DAQ است. با توجه به مقادیر صحیح I از 0 تا $(2^n - 1)$ مقادیر متناظر $E_{out}(I)$ محاسبه شده و با استفاده از معادله کالیبراسیون (توانی، چند جمله‌ای و یا اسپلاین) مقادیر سرعت جریان سیال که

بعد دوم آرایه دوبعدی می‌باشند، به‌ازای هر مقدار ولتاژ $E_{out}(I)$ به‌دست می‌آیند. به‌منظور کاهش خطا بهتر است از معادله کالیبراسیون به‌روش اسپلاین استفاده نمود.

برای یک کارت DAQ که ۱۲ بیتی است، آرایه دو بعدی از ۰ شروع شده و به ۴۰۹۵ ختم می‌شود. بعد اول آرایه، مقدار ولتاژ خروجی کارت DAQ است که متناظر با شماره آرایه است. با فرض این‌که بازه ولتاژ کارت DAQ بین ۱۰- و ۱۰ ولت باشد، ولتاژ خروجی از کارت DAQ که به‌صورت دیجیتال است، طبق معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$E_{out}(I) = -10 + (I) \frac{20}{4095} \quad (0 \leq I \leq 4095) \quad (22-1)$$

هر مقدار $E_{out}(I)$ متناظر با عدد صحیح I است. بعد دوم آرایه فوق، سرعت متناظر با ولتاژ خروجی کارت DAQ است که این مقدار با توجه به معادله کالیبراسیون به‌دست می‌آید. آرایه فوق در قسمت RAM رایانه ذخیره شده و هنگامی که ولتاژ خروجی کارت DAQ وارد رایانه می‌شود، طبق معادله (۱-۲۲) عدد صحیح I محاسبه شده و با استفاده از آرایه متناسب با I مقدار سرعت جریان سیال مشخص می‌شود. با استفاده از این روش فقط با ۳ محاسبه می‌توان ولتاژ خروجی از دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ را به سرعت لحظه‌ای جریان سیال تبدیل نمود. با تبدیل ولتاژ $E_c(n)$ به $U(n)$ و با مشخص بودن نرخ نمونه برداری می‌توان سرعت جریان سیال را به‌صورت آماری و لحظه‌ای بررسی نمود.

۱-۹-۲- تجزیه و تحلیل سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده :

پس از اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال نیاز به تجزیه و تحلیل آن می‌باشد که به دو صورت

آماری و زمانی انجام می‌شود.

تجزیه و تحلیل آماری: همان گونه که بیان شد، دستگاه جریان سنج سیم‌داغ، سرعت جریان را به طور لحظه‌ای اندازه‌گیری می‌کند. به منظور بررسی کمی و کیفی جریان سیال نیاز است تا مقادیر آماری مشخص شود. یکی از مهمترین مشخصه‌های آماری جریان سیال، سرعت متوسط است که طبق معادله زیر تعریف می‌شود:

$$U_{mean} = \frac{1}{N} \sum_1^N U(n) \quad (23-1)$$

N تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری شده، $U(n)$ سرعت لحظه‌ای و U_{mean} سرعت متوسط جریان سیال است. با استفاده از سرعت متوسط و تغییر موقعیت مکانی پراب به وسیله مکانیزم انتقال دهنده پراب، می‌توان توزیع سرعت جریان سیال نظیر لایه مرزی، دنباله و ... را اندازه‌گیری نمود. انحراف معیار سرعت جریان سیال که مشخص کننده شدت اغتشاشهای جریان سیال است طبق معادله زیر تعریف می‌شود:

$$u_{rms} = \left(\frac{1}{N-1} \sum_1^N (U(n) - U_{mean})^2 \right)^{0.5} \quad (24-1)$$

با استفاده از انحراف معیار سرعت جریان سیال، می‌توان شدت اغتشاشهای جریان سیال (*Turbulence Intensity*) را به صورت زیر تعریف نمود:

$$Tu = \frac{u_{rms}}{U_{mean}} \% \quad (25-1)$$

شدت اغتشاشهای جریان سیال می‌تواند بیانگر نوع جریان سیال، نوع لایه مرزی و غیره باشد. این پارامتر در بررسی کیفیت جریان تونل باد در اتاق آزمون بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار شدت اغتشاشهای جریان سیال در لایه مرزی آرام معمولاً کمتر از ۰.۲٪ و در لایه مرزی آشفته بیشتر از ۰.۵٪ می‌باشد. شدت اغتشاشها در لایه مرزی بستگی به عدد رینولدز و شرایط بالادست جریان دارد. انحراف از معیار ریشه دوم واریانس است که برخی از پژوهشگران علاقه‌مند به استفاده از واریانس طبق معادله زیر می‌باشند:

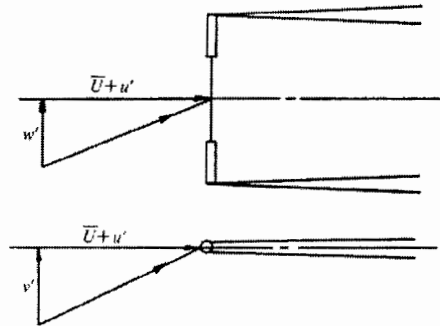
$$\sigma^2 = \sum_1^N \frac{(U(n) - U_{mean})^2}{N - 1} \quad (۲۶-۱)$$

تجزیه و تحلیل زمانی: بررسی سرعت لحظه‌ای جریان سیال را می‌توان در حوزه زمان و فرکانس انجام داد. در حوزه زمان، نمایش سرعت لحظه‌ای به صورت اسپلوگرام است. با استفاده از اسپلوگرام سرعت جریان سیال می‌توان تغییرات سرعت لحظه‌ای جریان سیال را نسبت به زمان بررسی کرد. به منظور بررسی دقیق سرعت لحظه‌ای، بهتر است آن را مطابق 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.

۱-۱۰- بررسی اثر شدت اغتشاشهای جریان سیال در اندازه‌گیری سرعت جریان سیال:

معمولاً اغتشاشهای موجود در جریان سیال به صورت سه‌بعدی است، اگر شدت اغتشاشهای جریان سیال کم باشد، برای جریان سیال یک‌بعدی مؤلفه‌های سرعت عمود بر جهت جریان سیال برابر صفر بوده $V = W = 0$ در نتیجه $V_e(n) = U(n)$ می‌شود. سری زمانی سرعت لحظه‌ای است که می‌توان برای شدت اغتشاشهای کم، سرعت جریان سیال را طبق رابطه $U(n) = \bar{U} + u(n)$ بیان نمود، در این حالت از

اثر اغتشاشهای سرعت جریان سیال v و w در جهات عمود بر جریان سیال صرف نظر شده است ولی برای جریانهای یک بعدی نظیر جریان در لایه مرزی آشفته، ناحیه دنباله (*Wake*) اجسام و ...



شکل (۱۰-۱) سنسور سیم داغ در جریان یک بعدی با شدت اغتشاشهای بالا

مقدار اغتشاشهای سرعت جریان سیال (u, v, w) کوچک نبوده و باعث ایجاد خطا در اندازه گیری سرعت می شود. برای شدت اغتشاشهای متوسط و یا بالا اگر چه جریان سیال یک بعدی است و مقادیر متوسط $\bar{v} = \bar{w} = 0$ است، ولی اغتشاشهای سرعت v و w محسوس بوده (شکل (۱۰-۱)) و بر روی انتقال حرارت تأثیر خواهد گذاشت. با توجه به این که مقدار $k^2 \ll h^2$ است، بنابراین اغتشاشهای جریان سیال در جهت مؤلفه سرعت V ، تأثیری بر اندازه گیری سرعت متوسط جریان سیال U نخواهد گذاشت. با توجه به این که سرعت لحظه ای را می توان ترکیبی از سرعت متوسط و اغتشاش سرعت $U(t) = \bar{U} + u(t)$ در نظر گرفت. در صورتی که جریان سیال یک بعدی باشد $\bar{v} = \bar{w} = 0$ می توان نوشت:

$$V_e^2 = U^2 + k^2 v^2 + h^2 w^2 \quad (27-1)$$

$$V_e = ((U + u)^2 + k^2 v^2 + h^2 w^2)^{\frac{1}{2}} \quad (28-1)$$

با بسط معادله فوق معادله (۲۹-۱) به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_e = ((\bar{U} + u) + \left(\frac{1}{2}\right) \frac{k^2 v^2 + h^2 w^2}{U + u} - \left(\frac{1}{8}\right) \frac{(k^2 v^2 + h^2 w^2)^2}{8(U + u)^3} + \dots) \quad (29-1)$$

با توجه به این که $k^2 \ll h^2$ می باشد، معادله (۲۹-۱) به صورت زیر ساده می شود:

$$V_e = \bar{U} \left(1 + \frac{u}{\bar{U}} + \left(\frac{1}{2}\right) \frac{h^2 w^2}{\bar{U}(\bar{U} + u)} + \dots \right)$$

با فرض کوچک بودن u نسبت به U می توان نوشت:

$$\bar{U}_m = \bar{U} \left(1 + \frac{1}{2} h^2 \frac{\bar{w}^2}{\bar{U}^2} \right) \quad (30-1)$$

همچنین با بسط معادله (۲۸-۱) می توان معادله را برای شدت اغتشاشهای اندازه گیری شده بیان نمود:

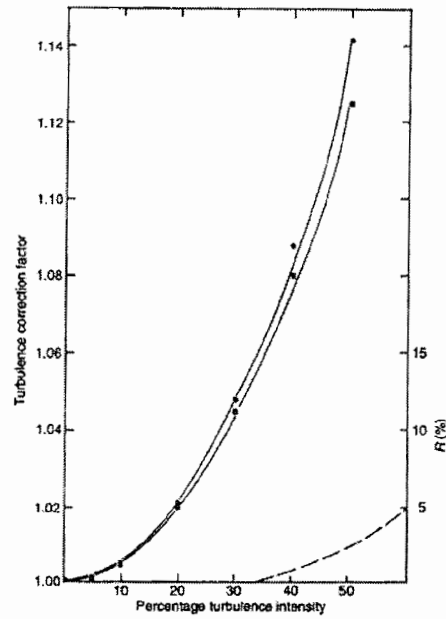
$$\bar{u}_m^2 = u^2 \left(1 + h^2 R_{ww^2} Tu \right) \quad (31-1)$$

$$Tu = \frac{(\bar{u}^2)^{1/2}}{\bar{U}} \quad \text{و} \quad R_{ww^2} = \frac{\bar{uw}^2}{(\bar{u}^2)^2}$$

در معادله‌های فوق \bar{U}_m و \bar{u}_m^2 به ترتیب مقدار سرعت متوسط و شدت اغتشاشهای سرعت اندازه‌گیری شده است، \bar{U} و \bar{u}^2 به ترتیب سرعت متوسط و شدت اغتشاشهای واقعی جریان است. با توجه به معادله‌های (۳۰-۱) و (۳۱-۱) می‌توان دریافت، هنگامی که شدت اغتشاشهای سرعت جریان سیال بالا است، مقدار سرعت اندازه‌گیری شده و مقدار سرعت واقعی با یکدیگر تفاوت دارند. با فرض همگن بودن اغتشاشهای جریان سیال $\bar{u}^2 = \bar{v}^2 = \bar{w}^2$ ، خطای ناشی از شدت اغتشاشها بر روی سرعت متوسط طبق جدول (۱-۱) به دست آمده است (Bruun 1976).

جدول (۱-۱) نسبت سرعت اندازه‌گیری شده به سرعت واقعی در شدت اغتشاشهای مختلف جریان

| $Tu(\%)$ | \bar{U}_m / \bar{U} |
|----------|-----------------------|
| ۱۰ | ۱/۰۰۶ |
| ۲۰ | ۱/۰۲ |
| ۳۰ | ۱/۰۵ |



شکل (۱۱-۱) ضریب اصلاح سرعت متوسط جریان سیال ناشی از شدت اغتشاشهای جریان سیال

(Swaminathan et al. 1986)

طبق جدول (۱-۱) مقدار \bar{U}_m / \bar{U} در شدت اغتشاشهای پایین ناچیز بوده و هنگامی که مقدار آن به ۳۰٪ می‌رسد، مقدار \bar{U}_m / \bar{U} برابر ۱/۰۵ خواهد بود. شکل (۱۱-۱) ضریب اصلاح شدت اغتشاشهای جریان سیال را برای سرعت متوسط U نشان می‌دهد (Swaminathan et al. 1986).

فصل دوم

هدف از انجام این پایان نامه و کاربرد آن

هدف از انجام این پایان نامه و کاربرد آن:

۲-۱- هدف از انجام این پایان نامه:

دانش فنی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ برای اولین بار در ایران توسط دکتر اردکانی بدست آمد. و با توجه به ویژگیهای دستگاه جریان سنج سیم‌داغ که دارای پاسخ فرکانسی بالا می‌باشد از آن می‌توان در اندازه-گیری جریان سیال با اغتشاشهای بالا استفاده کرد. یکی از کاربردهای آن در صنایع پزشکی استفاده در اسپرومتر است. در اسپرومتر حجم ریوی اندازه‌گیری می‌شود که در قسمت بعد بطور مبسوط بحث خواهد شد. به دلیل اینکه زمان دم و بازدم کوتاه می‌باشد و در این زمان کوتاه ما حداقل حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ داده برای اندازه‌گیری نیاز داریم پس می‌توانیم از دستگاه جریان سنج سیم‌داغ در آن استفاده کنیم. به دلیل اینکه دستگاه جریان سنج سیم‌داغ نمی‌تواند در دم بودن جریان و یا بازدم بودن آن را تشخیص دهد (به دلیل ناتوانی در اندازه‌گیری جریان معکوس) پس باید به وسیله روشهایی این کار انجام شود به همین دلیل پروژه‌ای با عنوان بررسی جریان معکوس به وسیله دستگاه جریان سنج سیم‌داغ تعریف شد. که از نتایج آن علاوه بر ساخت اسپرومتر می‌توان در کالیبراسیون دستگاه نیز از آن استفاده کرد. حال به توضیح و شرح اسپرومتر که یکی از کاربردهای اندازه‌گیری جریان معکوس است می‌پردازیم.

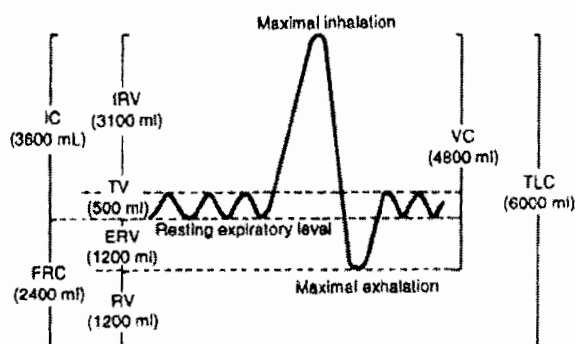
۲-۲-۲- اسپرومتر

اسپرومتر دستگاهی است که با آن حجمها و ظرفیت‌های ریوی را اندازه گیری می‌کنند. آزمایش و عمل انجام شده توسط اسپرومتر را اسپرومتری (*Spirometry*) می‌نامند. اسپرومتری یکی از اقدامات تشخیص اساسی و اولیه در ارزیابی بیماریهای تنفسی است. در افرادی که از نظر سابقه و یا معاینات بالینی، حدس زده می‌شود که دارای مشکلات تنفسی هستند با استفاده از اسپرومتری می‌توان بیماری را تا حدودی تشخیص داد. اسپرومتری به مفهوم بررسی و ثبت نتایج ناشی از حجم هوایی است که با تنفس به ریه وارد و یا خارج می‌شود. ارزیابی ریه در شرایط عادی تنفس و نیز همراه با حداکثر تلاش در جهت بکارگیری عضلات تنفسی در دم و بازدم انجام می‌گیرد. منحنی ایجاد شده ناشی از حجم در زمان را اسپروگرام یا به عبارتی دیگر منحنی حجم-زمان (*Volume-Time*) می‌گویند. معمولاً یک اسپرومتر علاوه بر منحنی حجم-زمان قادر به نمایش منحنی جریان-حجم (*Flow-Volume*) نیز می‌باشد.

۲-۲-۱- حجمها و ظرفیتهای ریوی:

برخی از حجمهای ریه که به حجم استاتیک موسومند با اسپرومتری ساده قابل اندازه‌گیری هستند. شکل (۱-۲) حجمها و ظرفیتهای ریه را برای یک مرد بالغ با ریه‌های طبیعی نشان می‌دهد.

هنگامی که تنفس معمولی انجام می‌شود، حجم جاری (*Tidal Volume*)، حجمی است که در حین تنفس طبیعی دم یا بازدم به داخل یا خارج ریه جریان می‌یابد، اندازه‌گیری می‌شود. این مقدار برای افراد بالغ حدود ۷۰۰~۳۵۰ میلی‌لیتر است. همان‌طور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده‌است، پس از دم و بازدم طبیعی، دمی عمیق و پس از آن بازدمی عمیق اندازه‌گیری می‌شود.



شکل (۱-۲) حجم و ظرفیتهای ریه برای یک مرد بالغ با ریه‌های طبیعی

حداکثر حجم هوا که بعد از عمل دم با یک بازدم عمیق از ریه‌ها خارج می‌شود را ظرفیت حیاتی (*Vital Capacity*) می‌نامند و تقریباً ۸۰٪ ظرفیت کلی ریه است. این مقدار برای افراد بالغ حدود ۴۸۰۰~۴۵۰۰ میلی‌لیتر است.

بعد از بازدم عمیق که دیگر شخص قادر نیست هوای بیشتری با حداکثر تلاش از ریه‌های خود خارج کند، باز هم مقداری هوا در ریه‌ها باقی می‌ماند که به آن حجم باقیمانده (*Residual Volume*) می‌گویند. میزان متوسط حجم باقیمانده در یک مرد بالغ به طور متوسط ۱۵۰۰~۱۲۰۰ میلی‌لیتر بوده. حدود ۲۰٪ ظرفیت کلی ریه می‌باشد. حجم باقیمانده را نمی‌توان با استفاده از اسپرومتری اندازه‌گیری نمود. حداکثر ظرفیت دمی که به ظرفیت دمی (*Inspiratory Capacity*) موسوم است، حداکثر حجمی از هوا است که بعد از یک بازدم معمولی با عمل دم عمیق وارد ریه‌ها می‌شود که تقریباً ۷۵٪

ظرفیت حیاتی را تشکیل می‌دهد و میزان متوسط آن برای یک مرد بالغ ۳۶۰۰~۳۵۰۰ میلی لیتر است. حداکثر هوایی را که در انتهای بازدم معمولی بیمار می‌تواند از ریه خود خارج کند به حجم ذخیره بازدمی (*Expriatory Reserve Volume*) موسوم است که حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد ظرفیت حیاتی است و میزان متوسط آن برای یک مرد بالغ حدود ۱۲۰۰~۱۰۰۰ میلی لیتر می‌باشد.

شکل (۲-۱) تغییرات حجم بر حسب زمان را نشان می‌دهد که توسط اسپرومتری اندازه‌گیری شده‌است، در صورتی که بررسی مقاومت در راه‌های هوایی ریه مطرح باشد، تغییرات دبی حجمی در شرایط مختلف حجمی ریه مورد بررسی قرار می‌گیرد

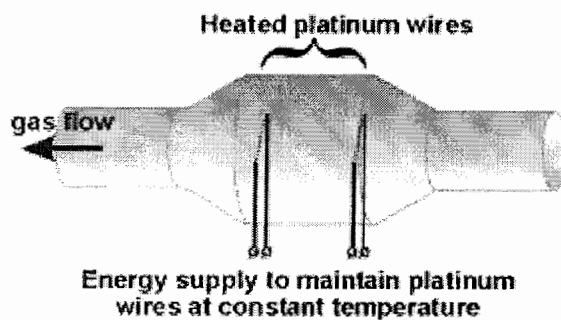
برای به دست آوردن منحنیهای حجم-زمان و یا جریان-حجم، نیاز به اندازه‌گیری دقیق دبی حجمی دم و بازدم می‌باشد. با استفاده از اندازه‌گیری دبی حجمی می‌توان مقدار حجم دم و بازدم را مشخص نمود. دبی حجمی تابعی از زمان می‌باشد، با توجه به این که زمان اسپرومتری بیش از چند ثانیه طول نمی‌کشد، بنابراین نیاز است که دستگاه فوق دارای فرکانس اندازه‌گیری مناسب باشد. در صورتی که فرکانس اندازه‌گیری دستگاه اسپرومتر کم باشد، اسپرومتری به طور صحیح انجام نمی‌شود.

۲-۲-۲- اجزای اسپرومتر از نوع سیم‌داغ:

اجزای اسپرومتر از نوع سیم‌داغ شامل محفظه و سنسور، دماسنج، مدار الکترونیکی دما ثابت CT و نرم‌افزار است.

محفظه و سنسور: مطابق شکل (۲-۲) در محفظه اسپرومتر از نوع سیم‌داغ دو سنسور وجود دارد. سنسورهای سیم‌داغ و یا فیلم‌داغ در دستگاه اسپرومتر قابل استفاده می‌باشند، ولی با توجه به این که سنسور فیلم‌داغ از سنسور سیم‌داغ محکم‌تر بوده و همچنین اثرات ذرات بر روی آن کمتر است، بهتر است

که از سنسور فیلم‌داغ استفاده شود. ترکیب قرارگیری و نوع سنسورها بستگی به روش جبران اثرات دما و تشخیص جریان دم و بازدم دارد که در قسمتهای بعد توضیح داده می‌شود.



شکل (۲-۲) شماتیک اسپرومتر سیم‌داغ

همان‌گونه که بیان شد، دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ قادر به اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال است. برای اندازه‌گیری دبی حجمی جریان سیال از معادله (۱-۲) استفاده می‌شود:

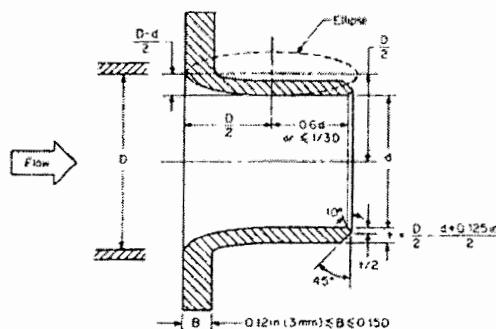
$$Q = AU_m \quad (۱-۲)$$

A سطح مقطع مکانی است که سنسور در آن قرار دارد و U_m سرعت متوسط در آن سطح مقطع می‌باشد که طبق معادله (۱-۲) به دست می‌آید:

$$U_m = \frac{1}{A} \int U.dA \quad (۲-۲)$$

برای آن که اندازه‌گیری دبی حجمی جریان دقت بالاتری داشته باشد، بهتر است که توزیع سرعت در سطح مقطعی که سنسور در آن قرار دارد، یکسان باشد. بدین منظور قبل از ورود به مقطع آزمون اسپرومتر از نازل استفاده می‌شود. نازل جریان هوای دم و بازدم را یکنواخت می‌کند به طوری که سرعت اندازه‌گیری شده U و سرعت متوسط در سطح مقطع U_m با یکدیگر برابر شوند.

شکل (۳-۲) نازلی را به شعاع طولانی نشان می‌دهد که برای استفاده در دستگاههای اسپرومتر مناسب است. منحنی داخل نازل از اهمیت بالایی برخوردار است و به شکل $1/4$ بیضی است. مطابق شکل قطر ورودی نازل D و قطر خروجی آن d است. بیضی که شکل نازل را تعیین می‌کند دارای قطر کوچک $(D-d)/2$ و قطر بزرگ $(D/2+0.6d)$ است. با توجه به این که عمل دم و بازدم در اسپرومتری انجام می‌شود، بنابراین باید در ورودی و خروجی محفظه سنسور از نازل استفاده شود.



شکل (۳-۲) نازل طبق استاندارد ASME

۳-۲-۲- محدودیتهای اسپرومتر از نوع سیم‌داغ و روشهای برطرف نمودن آن :

مزایتهای اسپرومتر از نوع سیم‌داغ پاسخ فرکانسی بالا و اندازه‌گیری سرعتهای کم جریان سیال با دقت بالا است. محدودیتهای این روش تأثیرگذاری تغییرات دمای محیط بر روی اندازه‌گیری دبی حجمی و همچنین عدم تشخیص جریان دم و بازدم است.

اثر دما: همان‌گونه که بیان شد، اندازه‌گیری سرعت و در نتیجه دبی حجمی جریان با استفاده از مقدار انتقال حرارت از سیم‌داغ به سیال به دست می‌آید. طبق معادله $Q = hA(T_w - T_a)$ ، دمای محیط اثر مستقیمی بر رابطه انتقال حرارت و در نتیجه سرعت اندازه‌گیری شده دارد، به طوری که افزایش دما در اندازه‌گیری سرعت و یا دبی حجمی جریان هوا، سبب ایجاد خطا برابر ۱/۹۶٪ می‌شود. به منظور کاهش این خطا باید مقدار $(T_w - T_a)$ را ثابت نگه داشت و یا آن که با استفاده از ضریب تصحیح آن را اصلاح نمود.

دمای بازدم حدود $37^\circ C$ است و می‌توان بر طبق دمای بازدم، سنسور اندازه‌گیر دبی حجمی جریان بازدم را برای دمای $37^\circ C$ کالیبره نمود. همچنین با اندازه‌گیری دمای محیط می‌توان، تغییرات دمای محیط را بر اندازه‌گیری دبی حجمی جریان دم اعمال نمود. اصلاح تغییرات دما به دو صورت نرم‌افزاری: سخت‌افزاری است که در بخش‌های قبل به تفصیل بحث شده است.

تشخیص جریان دم و بازدم: با توجه به این که انتقال حرارت کمیتی اسکالر بوده ولی سرعت کمیتی برداری است، بنابراین نمی‌توان جهت جریان دم و بازدم را تشخیص داد. به این منظور باید از روش‌های گوناگونی برای مشخص نمودن جهت جریان دم و بازدم استفاده نمود که بحث مفصل آن در قسمت اندازه‌گیری جریان معکوس و روش آزمایش در قسمت‌های بعد انجام شده است.

فصل سوم

مروری بر کارهای انجام گرفته در مورد

اندازه‌گیری جریان معکوس بوسیله دستگاه

جریان سنج سیم‌داغ

مروری بر کارهای انجام گرفته در مورد اندازه‌گیری جریان معکوس بوسیله دستگاه

جریان سنج سیم‌داغ:

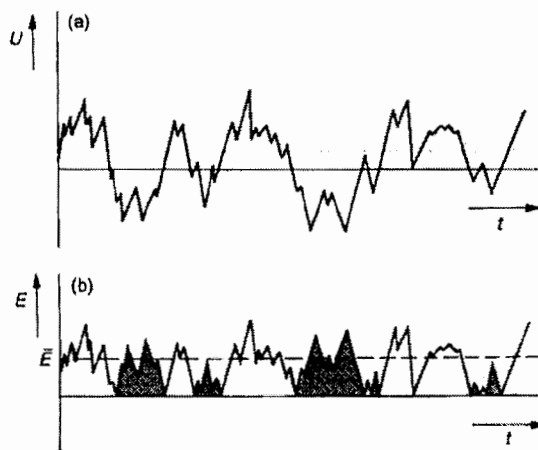
۳-۱- اندازه‌گیری جریانهای معکوس با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ:

بسیاری از جریانهای سیال وجود دارد که جهت آنها نامشخص بوده و احتمال معکوس شدن آنها نیز هست. نمونه‌هایی از جریانهای معکوس عبارتند از: جریان پشت موانع، انبساط ناگهانی در لوله‌ها و کانالها، جدایش جریان روی سطوح منحنی‌الشکل با انحنای زیاد و جریانهای چرخشی (در اتاق احتراق و ...). همچنین در برخی از کاربردهای مهندسی پزشکی نظیر ساخت اسپرومتر جریان در حالت دم و بازدم دارای جهت‌های معکوس است. یکی از مشکلات اندازه‌گیری با دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ این است که نمی‌توان جهت جریان سیال را تشخیص داد. با توجه به این که اساس کار دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ بر مبنای انتقال حرارت از سنسور سیم‌داغ به جریان سیال است، انتقال حرارت کمیتی اسکالر بوده و سرعت جریان سیال کمیتی برداری است بنابراین تشخیص جهت جریان ممکن نخواهد بود.

شکل (۳-۱) الف تغییرات سرعت لحظه‌ای جریان سیالی که در زمانهای خاص معکوس می‌شود را نشان می‌دهد. شکل (۳-۱) ب نشان‌دهنده ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ است که توسط یک

شکل (۱-۳) الف تغییرات سرعت لحظه‌ای جریان سیالی که در زمانهای خاص معکوس می‌شود را نشان می‌دهد. شکل (۱-۳) ب نشان‌دهنده ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ است که توسط یک پراب SN اندازه‌گیری شده است. با توجه به این که پراب SN قادر به اندازه‌گیری جهت سرعت جریان سیال نمی‌باشد، بنابراین سرعت منفی را به صورت سرعت مثبت نشان می‌دهد. در این شکل نواحی زیر محور t به بالا منتقل شده‌اند (نواحی سایه) که این اشتباه در اندازه‌گیری سبب افزایش مقدار سرعت متوسط جریان سیال \bar{U} و کاهش شدت اغتشاشهای جریان سیال \bar{u}^2 می‌شود. در این فصل روشهای مختلف برای اندازه‌گیری صحیح سرعت جریان سیالی که گاهی اوقات معکوس می‌شود، بیان می‌شوند.

با استفاده از دستگاههای جریان‌سنج سیم‌داغ به همراه سنسورهای سیم‌داغ و یا سنسورهای سیم‌سرد (سیم مقاومتی) می‌توان با توجه به تأثیرگذاری سنسورها بر روی عملکرد یکدیگر، جهت جریان را تشخیص داد.



شکل (۱-۳) جریان سیالی که گاهی اوقات معکوس می‌شود ب- سرعت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ برای جریان سیال معکوس شونده

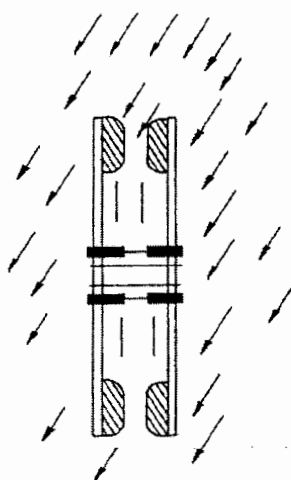
۳-۲- پرابهای تحت تاثیر استوانه سرد:

این پراب به گونه‌ای طراحی شده است که یک استوانه با قطر D مابین دو سنسور سیم‌داغ قرار گرفته و موازی با آنها است. در واقع با استفاده از تأثیر این استوانه بر روی ولتاژ خروجی دستگاههای جریان‌سنج سیم‌داغ که سنسورهای سیم‌داغ به آن متصل می‌باشند، می‌توان جهت جریان سیال را مشخص نمود. اندازه‌گیری جهت جریان سیال با استفاده از دو سنسور به دو روش صورت می‌گیرد:

۱- در این روش که توسط (Gupta & Srivastava 1979) ابداع شد از تولید گردابه‌های منظم

که در پشت استوانه ایجاد می‌شوند برای مشخص نمودن جهت جریان سیال، استفاده می‌شود. سنسوری که در پایین دست جریان قرار دارد سیگنالی را که ناشی از گردابه‌های موسوم به کارمن ورتکس است، نشان می‌دهد. بنابراین سیگنال فوق به صورت سینوسی است. با مقایسه سیگنالهای بین سیمی که تحت گردابه استوانه قرار دارد و سیمی که در بالادست استوانه است می‌توان جهت جریان را تشخیص داد. با اندازه‌گیری فرکانس گردابه تولید شده پشت استوانه، می‌توان سرعت U را نیز به دست آورد. (Roshko 1954) نشان داد که عدد استروهل $S=fD/U$ (Strouhal) برای گردابه‌های ناشی از استوانه، در بازه $40 < Re < 400$ ثابت بوده و برابر 0.21 است. در رابطه عدد استروهل f فرکانس گردابه پشت استوانه، D قطر استوانه و U سرعت جریان سیال است، بنابراین در این روش با اندازه‌گیری فرکانس گردابه پشت استوانه می‌توان جهت و مقدار سرعت جریان سیال را اندازه‌گیری نمود، در این حالت نیازی به کالیبراسیون سرعت جریان سیال نمی‌باشد، همچنین با استفاده از فرکانس ناشی از استوانه می‌توان، جهت جریان و با استفاده از سنسور دیگر سرعت جریان سیال را اندازه‌گیری نمود. برای چنین حالتی نیاز است که دستگاههای جریان‌سنج سیم‌داغ برای سنسورهای مربوطه کالیبره شوند. مشکل این پراب در جریانهای آشفته است. از آنجایی که استوانه و دو سنسور سیم‌داغ در یک صفحه واقع هستند، گردابه حاصل از استوانه توسط سنسور پایین دست دریافت نشده و در نتیجه تشخیص جریان معکوس مشکل است.

۲- در این روش، (Mahler 1982) دو سنسور سیم‌داغ را در دو طرف استوانه‌ای قرار داد، سنسور سیم‌داغ بالادست در معرض جریان سیال قرار گرفته و سنسور سیم‌داغ پایین‌دست تحت تأثیر ناحیه جدایش استوانه قرار می‌گیرد، بنابراین سنسور بالادست در معرض جریان سیال قرار گرفته و انتقال حرارت بیشتری خواهد داشت. برای این که جریانی یک‌بعدی از روی سنسورها بگذرد، سنسورها و استوانه را درون لوله کوچکی قرار داده شکل (۲-۳) که دهانه ورودی و خروجی آن به صورت نازل می‌باشد، همچنین این دو سنسور سیم‌داغ به دو طرف پل‌وتسون متصل شده و دو سر دیگر آنها به دو سر دو مقاومت ثابت پل‌وتسون وصل می‌شود. در ابتدا با متعادل کردن پل‌وتسون، جریان را در آن به صفر می‌رسانند. هنگامی که پرآب در جریان قرار می‌گیرد، تعادل پل‌وتسون به هم می‌خورد و این عدم تعادل بسته به جهت جریان هوا، ممکن است مثبت یا منفی باشد. بزرگی و مقدار عدم تعادل، معیار اندازه‌گیری سرعت هوا می‌باشد. این پرآب می‌تواند جریان معکوس را در سرعت‌های $m/s \pm 1/5$ اندازه‌گیری کند.



شکل (۲-۳) پرآب اندازه‌گیر سرعت و جهت جریان متشکل از دو سنسور سیم‌داغ و یک استوانه

(Mahler 1982)

۳-۳- پرابهای تحت تاثیر استوانه گرم:

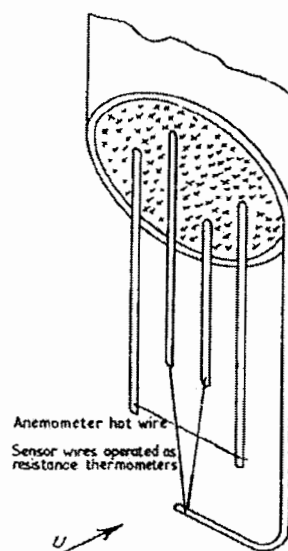
در این روش جهت جریان سیال به وسیله اثر دنباله گرم که توسط یک سنسور ایجاد شده و در سیگنال خروجی سنسور بعدی مشاهده می شود، به دست می آید. این روش به دو صورت انجام می شود:

۱- پرابی که هر دو سنسور سیم داغ آن با مدار الکترونیکی دما ثابت CT کار می کنند ۲- پرابی که یک سنسور سیم داغ در مدار الکترونیکی دما ثابت CT و دو سنسور سیم سرد در مدار الکترونیکی جریان ثابت CC کار می کنند، سنسورهای سیم سرد در دو طرف سنسور سیم داغ قرار می گیرند.

۱- این پراب شامل دو سنسور موازی و بسیار نزدیک به هم در داخل لوله می باشد (Gunkel et al. 1971). لوله سبب می شود که جریان یک بعدی از روی سنسورهای سیم داغ عبور کند. با قرار دادن لوله شامل سنسورها در جهت جریان سیال، می توان سنسور بالادست را کالیبره نمود و با عوض کردن جهت ورودی سیال، سنسور دیگر را نیز کالیبره نمود. سنسور سیم داغی که تحت تأثیر دنباله گرم حاصل از سنسور سیم داغ دیگر قرار می گیرد انتقال حرارت کمتری داشته و در واقع سنسور پایین دست خواهد بود و سنسور سیم داغ سیم تولید کننده دنباله، سیم بالادست خواهد بود. ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ که سنسور پایین دست به آن متصل است، کمتر خواهد بود. در هر لحظه ولتاژهای خروجی دستگاههای جریان سنج سیم داغ با یکدیگر مقایسه شده و ولتاژ بزرگتر انتخاب می شود که با استفاده از نرم افزار ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ به سرعت تبدیل می شود و همچنین جهت جریان سیال با توجه به ولتاژ بالاتر خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ مشخص می شود.

۲- این پراب شامل یک سنسور سیم داغ در مدار الکترونیکی دما ثابت CT و دو سنسور سیم سرد در مدار الکترونیکی جریان ثابت CC می باشد (Downing 1972). مقدار سرعت جریان سیال توسط ولتاژ خروجی سنسوری که در مدار الکترونیکی دما ثابت CT است، مشخص می شود. جهت جریان توسط دو سنسور سیم سرد مشخص می شود که در مدار الکترونیکی جریان ثابت CC کار می کنند. سنسورهای سیم

سرد در دو طرف پلوتسون قرار گرفته و با توجه به جهت جریان سیال پلوتسون از حالت تعادل خارج می‌شود. با تقویت ولتاژ خروجی پل و همچنین استفاده از قیاس‌گر می‌توان جهت جریان سیال را تشخیص داد. قیاس‌گر ولتاژ خروجی منطقی دارد که با عوض شدن جهت جریان، مقدار ولتاژ دستگاه جریان سنج سیم‌داغ را معکوس می‌کند. شکل (۳-۳) پرابی را که از دو سنسور سیم سرد و یک سنسور سیم‌داغ تشکیل شده است را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳) پراب اندازه‌گیر سرعت و جهت جریان شامل یک سنسور سیم‌داغ و دو سنسور سیم سرد

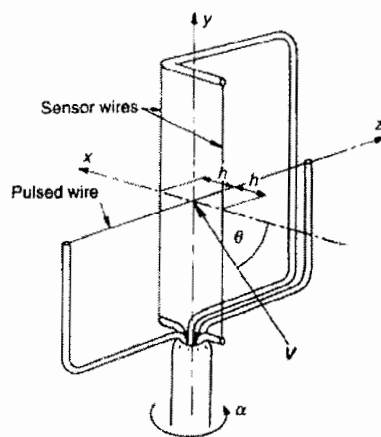
(Downing 1972)

۳-۴- جریان سنج ضربانی (PWA):

در جریان سنج ضربانی (Pulsed-Wire Anemometer) که برای اولین بار توسط (Bauer 1965) معرفی شد از دو سنسور سیم سرد موازی با سیم گرم شونده ضربانی (Pulsed Wire) برای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال استفاده شد. با اعمال ولتاژهای ضربانی، سیم مورد نظر به صورت لحظه‌ای گرم شده و باعث ایجاد دنباله حرارتی می‌شود. ضربانهای ولتاژ با فاصله زمانی

چند میکرو ثانیه، ایجاد می‌شوند، این ضربانها هوای گرمی را ایجاد می‌کند که در جریان سیال منتشر می‌شود. با استفاده از مدت زمانی که طول می‌کشد تا این دنباله گرمایی به سنسور سیم سرد پایین دست برسد، می‌توان سرعت جریان سیال و جهت آن را اندازه‌گیری نمود.

ترکیب قرارگیری سنسورهای سیم سرد و سیم ضربانی به جهت جریان سیال بسیار حساس است. در صورتی که ترکیب قرارگیری سنسورها مناسب نباشد، در جریانهای آشفته بسیاری از دنباله‌های هوای گرم به سنسور سیم سرد دوم برخورد نمی‌کند.



شکل (۴-۳) پراب Bradbury & Castro برای جریان سنج ضربانی

برای رفع مشکل فوق (Bradbury & Castro 1969) پرابی مطابق شکل (۴-۳) برای جریان سنج ضربانی طراحی نمودند که در زوایای مختلف یا α ، همچنین برای جریانهای آشفته می‌توان سرعت و جهت جریان سیال را اندازه‌گیری نمود. پراب جریان سنج ضربانی، دارای یک سیم ضربانی و دو سنسور سیم سرد است. سیم ضربانی در مرکز قرار گرفته که در دو طرف و عمود بر آن با فاصله h دو سنسور سیم سرد وجود دارد. دو سنسور فوق با هم موازی بوده ولی جهت آنها عمود بر سیم ضربانی می‌باشد. مطابق شکل (۴-۳) صفحه سیم گرم شونده صفحه (X-Z) است.

پاسخ دستگاه جریان سنج ضربانی نسبت به زاویه یاو α که حاصل چرخش حول دسته پراب است و زاویه پیچ β که مربوط به چرخش حول سیم ضربانی است، به دست می آید. برای به دست آوردن زوایای قابل قبول یکسان برای زوایای یاو و پیچ، سیم ایجاد کننده ضربان حرارتی و سنسورها دارای طول یکسان l می باشند. جریان سنجهای ضربانی ایده آل بدین گونه است که سیم تولید کننده ضربان حرارتی دارای اینرسی حرارتی نیستند، بدین صورت که با ضربان گرمایشی، درجه حرارت سیم از T_a ناگهان به دمایی بالاتر رفته و جریان هوا که در حال عبور از سنسور است را گرم می نماید. با شرط این که اثرات پخش حرارتی و دنباله کوچک باشد، مدت زمانی که طول می کشد هوای گرم از سیم تولید کننده ضربان حرارتی تا سنسور سیم سرد برسد را می توان طبق معادله (۱-۳) محاسبه نمود:

$$T = \frac{h}{|\vec{v}| \cos \theta} \quad (1-3)$$

$|\vec{v}|$ اندازه سرعت لحظه ای و θ زاویه بردار سرعت است. با اندازه گیری زمان T ، می توان $U = |\vec{v}| \cos \theta$ را به دست آورد. مزیت استفاده از دو سنسور سیم سرد در دو طرف سیم تولید کننده ضربان حرارتی، تشخیص جهت جریان سیال است.

تفاوتهای پراب ایده آل جریان سنج ضربانی و پراب واقعی در این است که سنسور سیم تولید کننده ضربان حرارتی دارای لختی حرارتی بوده و مدتی طول می کشد تا این سنسور گرم و سرد شود. برای آن که لختی حرارتی به حداقل برسد، نیاز است که ثابت زمانی سیم تولید کننده ضربان حرارتی را کاهش داد. معمولاً سیم تولید کننده ضربان حرارتی از جنس تنگستن با قطر $5 \mu m$ است که ثابت زمانی آن در سرعت $5 m/s$ حدود $1 ms$ است. این زمان در مقایسه با زمان ولتاژ اعمالی $(2-10 \mu s)$ برای تولید ضربان حرارتی زیاد است.

همچنین پخش حرارتی و دنباله نیز بر روی سنسور سیم سرد اثر دارد. این اثرات بستگی به فاصله سنسور از سیم تولید کننده ضربان حرارتی h ، سرعت جریان سیال U و ضریب هدایت حرارتی سیال دارد و به صورت عدد (Uh/k) (Peclet) بیان می‌شود. هنگامی که عدد فوق کمتر از ۵۰ می‌شود، اثرات پخش حرارت و دنباله نیز افزایش می‌یابد. بنابراین بهتر است که عدد (Peclet) بزرگتر از ۵۰ باشد، برای این حالت در صورتی که $h=1/2 \text{ mm}$ باشد، سرعت جریان هوا برای عدد فوق 1 m/s است.

برای استفاده از دستگاه جریان سنج ضربانی همانند دستگاه جریان سنج سیم‌داغ نیاز به کالیبراسیون سرعت جریان سیال می‌باشد که این کالیبراسیون باید برای هر سنسور به‌طور جداگانه انجام شود. با استفاده از کالیبراسیون می‌توان لختی حرارتی، پخش حرارتی و دنباله لزجی را در آن لحاظ نمود. معادله کالیبراسیون سرعت جریان سیال را می‌توان طبق معادله (۲-۳) بیان نمود:

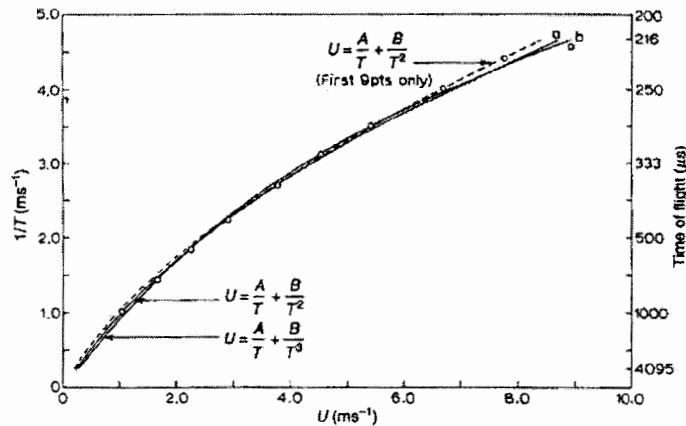
$$U = h/T + f(T) \quad (2-3)$$

U سرعت جریان سیال، T زمانی که طول می‌کشد تا حرارت تولید شده از سیم ضربان به سنسور برسد و $f(T)$ نیز تابع کوچکی است که اثرات ثانوی را بر روی معادله کالیبراسیون اعمال می‌کند. اندازه‌گیری فاصله بین سیم تولید کننده ضربان حرارتی و سنسور سیم سرد مشکل بوده و نمی‌توان به‌دقت اندازه‌گیری نمود، بنابراین مقدار h کاملاً مشخص نمی‌باشد. همچنین با توجه به این که $f(T)$ تأثیر ثانوی و کمتری دارد، می‌توان به‌صورت معادله (۳-۳) بیان نمود:

$$U = A/T + B/T^n \quad (3-3)$$

A و B ضرایب ثابت کالیبراسیون می‌باشند که پس از کالیبراسیون توسط روش تقریب نمودن حداقل مربعات به‌دست می‌آیند. (Bradbury 1976) مقدار n را برابر ۲ انتخاب کرد ولی پژوهشگران

دیگر مقدار n را برابر ۳ برای معادله کالیبراسیون انتخاب نمودند. شکل (۵-۳) منحنی کالیبراسیون سرعت و زمان را برای جریان سنج ضربانی نشان می‌دهد.



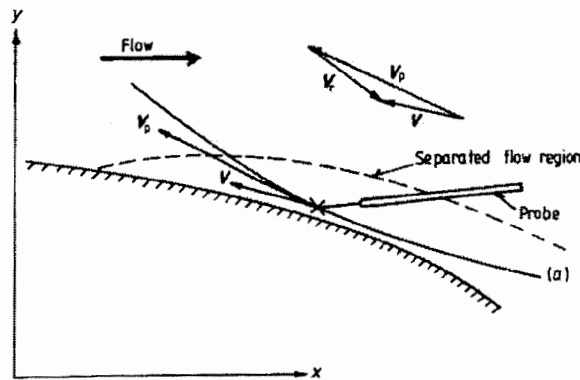
شکل (۵-۳) منحنی کالیبراسیون سرعت و زمان برای جریان سنج ضربانی
(Handford & Bradshaw 1989)

۵-۳- جریان سنج سیم‌داغ با پراب متحرک (FHA):

همان‌گونه که بیان شد یکی از محدودیت‌های پراب سیم‌داغ که در مکان ثابتی قرار دارد، عدم توانایی در اندازه‌گیری سرعت جریان معکوس سیال است. یکی از روش‌های حل این مشکل استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ با پراب متحرک (Flying Hot-Wire Anemometer) می‌باشد. از جمله مواردی که پراب سیم‌داغ متحرک در آنها کاربرد دارد، مطالعه گردابه‌های دنباله هواپیما (Jacobsen 1977)، مطالعه میدان جریان در یک موتور احتراق داخلی (Dinsdale & et al. 1988)، جریان‌های داخل توربو ماشینها (Gerich 1975) و ... می‌باشند.

با توجه به شکل (۶-۳) می‌توان اصول اندازه‌گیری با استفاده از یک پراب سیم‌داغ متحرک (FHA) را توضیح داد. در شکل (۶-۳) ناحیه جدا شده جریان به صورت دوبعدی در نظر گرفته شده است. در سیستم مختصات ثابت بردار سرعت جریان سیال \vec{V} و یا مؤلفه‌های آن U و V باید مشخص شود. پراب در یک مسیر از پیش تعیین شده حرکت کرده و با دانستن مسیر حرکت و زمان t مکان پراب (x_p, y_p) و همچنین سرعت پراب V_p مشخص می‌شود. دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ سرعت نسبی V_r را اندازه‌گیری می‌کند. بردار سرعت V_r در پراب X با اندازه‌گیری مؤلفه‌های (U'_r, V'_r) در دستگاه مختصاتی که با ساقه پراب هم محور است، مشخص می‌شود. با توجه به این که جهت قرارگیری ساقه پراب نسبت به مختصات اصلی معلوم است، بنابراین مؤلفه‌های سرعت $|\vec{V}_r|$ در مختصات اصلی (U_r, V_r) را می‌توان به دست آورد. با داشتن بردارهای \vec{V}_p و بردار سرعت \vec{V} طبق معادله (۴-۳) به دست می‌آید.

$$\vec{V} = \vec{V}_p + \vec{V}_r \quad (4-3)$$



شکل (۶-۳) اصول اندازه‌گیری سرعت جریان سیال با استفاده از پراب متحرک

۳-۵-۱- مکان و سرعت پراب:

همان‌گونه که بیان شد برای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال با استفاده از این روش نیاز است تا مکان و سرعت پراب را هر لحظه مشخص نمود. تعیین سرعت و مکان پراب به نوع مسیر به کار رفته بستگی دارد.

مسیر خطی: در مسیر خطی، حرکت پراب و در نتیجه سرعت پراب \vec{V}_p در راستای پراب در مختصات ثابت فضایی است. سیستم مختصات ثابت برای ارزیابی مؤلفه‌های سرعت جریان سیال \vec{V} به کار می‌رود. بنابراین مؤلفه‌های سرعت پراب \vec{V}_p مقدار (U_p, V_p) خواهد بود. با فرض این که سرعت پراب ثابت است، U_p را می‌توان به صورت معادله (۵-۳) بیان نمود:

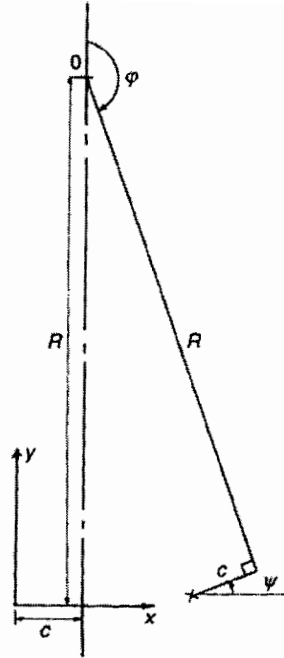
$$U_p = \frac{\Delta x_p}{\Delta t} \quad V_p = \frac{\Delta y_p}{\Delta t} \quad (۵-۳)$$

که با اندازه‌گیری Δt متناظر با Δx_p و Δy_p می‌توان مقدار U_p و V_p را به دست آورد.

مسیر دایره‌ای: در حرکت دایره‌ای، مکان (x_p, y_p) و در نتیجه سرعت حرکت پراب $\vec{V}_p = (U_p, V_p)$ را می‌توان با توجه به هندسه نشان داده شده در شکل (۷-۳) تعیین کرد. در این شکل، طول نگاه‌دارنده پراب C و طول بازوی آن R است، به طوری که بازوی چرخان و نگاه‌دارنده بر هم عمود می‌باشند. هنگامی که زاویه $\varphi = 0$ است، بازو در بالاترین نقطه قرار دارد که مبنای دستگاه مختصات ثابت در نظر گرفته می‌شود. با توجه به هندسه نشان داده شده می‌توان نوشت:

$$x_p = c + R \sin \varphi + c \cos \varphi \quad (۶-۳)$$

$$y_p = R + R \cos \varphi - c \sin \varphi \quad (۷-۳)$$



شکل (۷-۳) هندسه حرکت پراب در مسیر دایروی

با مشتق‌گیری معادله‌های بالا نسبت به زمان می‌توان سرعت U_p و V_p را به دست آورد.

$$\left(\frac{d\varphi}{dt} = \omega\right)$$

$$U_p = \omega(R \cos \varphi - c \sin \varphi) \quad (۸-۳)$$

$$V_p = -\omega(R \sin \varphi + c \cos \varphi) \quad (۹-۳)$$

برای اندازه‌گیری با استفاده از پراب X شکل نیاز است که مقدار زاویه φ که پراب و نگه‌دارنده آن با محور x می‌سازند، مشخص باشد. با توجه به هندسه نشان داده شده در شکل (۷-۳) رابطه زیر برقرار می‌باشد:

$$\psi = 180 - \phi$$

(۱۰-۳)

۳-۵-۲- اندازه‌گیری سرعت نسبی:

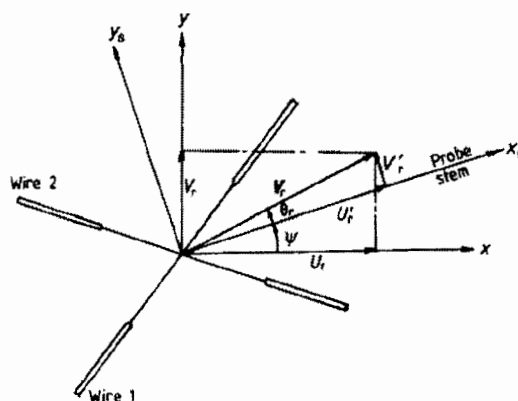
در بیشتر اندازه‌گیریها با استفاده از روش پراب متحرک از یک یا چند پراب X شکل استفاده می‌شود. این پرابها در حالت ثابت و توسط یکی از روشهای کالیبراسیون کالیبره می‌شوند. در روشی که توسط (Al-Kaylem & Bruun 1991) به کار رفت، برای کالیبراسیون پراب سیم داغ X شکل، ثابتهای کالیبراسیون در معادلات پاسخ دو سنسور سیم‌داغ، در فرآیند کالیبراسیون مطابق معادله‌های زیر

بیان شدند:

$$E_1^2 = A_1 + B_1 V_{e_1}^{n_1} \quad (11-3)$$

$$E_2^2 = A_2 + B_2 V_{e_2}^{n_2} \quad (12-3)$$

$$V_e = \left| \vec{V} \right| (\cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha)^{\frac{1}{2}} \quad (13-3)$$



شکل (۳-۸) مؤلفه‌های سرعت نسبی V_r در مختصات ثابت و متصل به ساقه

مشخص می‌شوند که $|\vec{V}|$ اندازه بردار سرعت و α زاویه یاو می‌باشند. k ضریب حساسیت سنسور به زاویه یاو است. هنگامی که یک پراب با سنسور سیم داغ X در داخل میدان جریان سیال حرکت می‌کند، در واقع دستگاه جریان سنج سیم‌داغ، سرعت نسبی را اندازه‌گیری می‌کند. مؤلفه‌های سرعت اندازه‌گیری شده، در دستگاه مختصات متصل به ساقه پراب (x_p, y_p) ارزیابی می‌شوند شکل (۳-۸).

می‌توان سرعت مؤثر V_e اندازه‌گیری شده توسط جریان سنج سیم‌داغ را به سرعت نسبی جریان سیال \vec{V}_r مرتبط نمود. در این تحلیل، معادله‌های (۳-۱۱) و (۳-۱۳) را می‌توان مستقیماً به کار برد و سرعت مؤثر V_{e1} و V_{e2} متناظر با ولتاژهای اندازه‌گیری شده (E_1, E_2) را با استفاده از معکوس نمودن معادله‌های فوق به دست آورد:

$$V_{e1} = \left[\frac{E_1^2 - A_1}{B_1} \right]^{\frac{1}{n_1}} \quad (۳-۱۴)$$

$$V_{e2} = \left[\frac{E_2^2 - A_2}{B_2} \right]^{\frac{1}{n_2}} \quad (۳-۱۵)$$

فصل چهارم

اجزای جانبی بکاررفته در آزمایشها و

کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم‌داغ

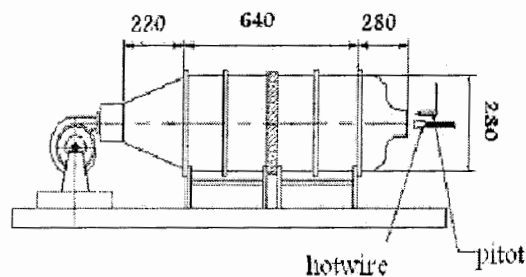
اجزای جانبی بکاررفته در آزمایشها و کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم‌داغ:

به منظور انجام تحقیقات و آزمایشها نیاز به تونل‌باد، مکانیزم انتقال‌دهنده پراب، جریان‌سنج سیم‌داغ، دبی‌سنج سیم‌داغ، پراب سنسور سیم‌داغ/فیلم‌داغ، دستگاه کالیبراسیون و سیستم اخذ داده‌ها و نرم‌افزار می‌باشد. در ابتدا لازم است که در مورد تجهیزات فوق توضیحات مبسوطی داده شده و سپس در مورد روش آزمایش بحث خواهیم کرد.

۴-۱- تونل‌باد:

تونل‌باد جریان‌هوای کنترل شده‌ای را ایجاد می‌کند که از اطراف مدل مورد نظر عبور کرده و اطلاعات لازم از چگونگی عبور جریان‌هوا از اطراف مدل به دست می‌آید و یکی از بهترین و ارزان‌ترین روشهای تجربی برای پژوهش در زمینه علم آیرودینامیک است. تونلهای باد را می‌توان از لحاظ سرعت جریان‌هوا، ابعاد و روشهای دیگر تقسیم‌بندی نمود. سرعت در تونل‌باد مادون‌صوت با جریان تراکم‌ناپذیر محدوده عدد ماخ (۰-۰/۳)، تونل‌باد مادون‌صوت با جریان تراکم‌پذیر محدوده عدد ماخ (۰/۷-۰/۳)، تونل‌باد حوالی صوت محدوده عدد ماخ (۱/۳-۰/۷)، تونل‌باد مافوق‌صوت محدوده عدد ماخ (۵-۱/۳) و تونل‌باد

ماورای صوت محدوده عدد ماخ (۱۰-۵) را داراست. باتوجه به بازه سرعت جریان هوا مورد نظر برای کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم داغ، می توان از تونل باد با بازه های مختلف سرعت استفاده نمود. تونل باد با سرعت کم از لحاظ مسیر جریان هوا به دو گروه تونل باد مدار باز (*Eiffel Type*) و تونل باد مدار بسته (*Prandtl*) یا (*Göttingen Type*) تقسیم بندی می شود. در تونل باد مدار باز، هوا از محیط مکیده شده و پس از عبور از قسمت های مختلف تونل باد و اتاق آزمایش دوباره به محیط بر می گردد. این نوع تونل باد جریان ورودی و خروجی با هم ارتباطی نداشته و بر هم تأثیری نمی گذارند. شکل (۴-۱) نوع ساده ای از تونل باد مدار باز را نشان می دهد که جریان هوا توسط فن از محیط به داخل آن دمیده می شود. جریان هوا در ابتدا از طریق دیفیوزر زاویه باز وارد اتاق آرامش (*Settling Chamber*) شده که شامل توری و لانه زنبوری است، سپس از طریق نازل که سطح مقطع آن به تدریج کاهش می یابد وارد اتاق آزمایش (*Test Section*) می شود. اتاق آزمایش مکانی است که در آن جریان به صورت دلخواه بوده و می توان مدلها را در آن مورد آزمایش قرارداد. سرعت جریان هوا با کنترل سرعت چرخشی فن قابل تنظیم است. این نوع تونل باد، با سطح مقطع کوچک $6.0\text{mm} \times 6.0\text{mm}$ برای کالیبره نمودن دستگاه جریان سنج سیم داغ مناسب است.



شکل (۴-۱) تونل باد مدار باز دمیده

با توجه به محل قرارگیری فن تونل باد در بالا دست و یا پایین دست اتاق آزمایش، تونل باد مدار باز به دو گروه دمنده و مکنده تقسیم می‌شود. در تونل باد مدار باز مکشی با اتاق آزمایش بسته، فشار استاتیکی جریان هوا از فشار خارجی اتاق آزمایش کمتر است، در نتیجه جریان هوا از محیط خارج اتاق از طریق محفظه‌هایی وارد اتاق آزمایش می‌شود، به همین دلیل استفاده از تونل باد مدار باز مکنده با اتاق آزمایش باز ممکن نیست، مگر آن‌که در اطراف آن، محفظه بزرگتری ایجاد شده تا فشار استاتیکی در این اتاق برابر با فشار استاتیکی جریان هوا شود.

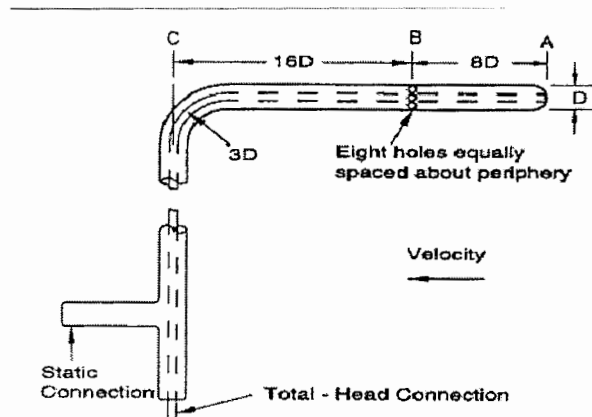
در تونل باد مدار بسته، جریان هوا از کانالی که ابتدا و انتهای آن به هم متصل است عبور می‌کند. تونل باد مدار بسته به دو گروه فوران آزاد و فوران بسته تقسیم می‌شود. در فوران آزاد تمام قسمتهای تونل باد بجز اتاق آزمایش با محیط ارتباط نداشته، یعنی اتاق آزمایش آن فاقد دیوار است. در فوران بسته هیچ یک از قسمتهای تونل باد با محیط ارتباط ندارد و اتاق آزمایش هم دارای دیوار است. در تونل باد مدار بسته با فوران بسته جریان هوا توسط فن دارای انرژی شده و در یک مسیر بسته حرکت می‌کند، سرعت جریان هوا با سرعت دورانی فن قابل تنظیم است. سرعت جریان هوا پس از عبور از فن در امتداد دیفیوزر کاهش و فشار استاتیکی آن افزایش می‌یابد. آزمایشهای این پایان نامه در تونل باد سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران که دارای سطح مقطع $60mm \times 60mm$ می باشد، انجام گرفته این تونل باد، این تونل از نوع مدار بار دمنده بوده که انرژی خود را از طریق فن سانتریفیوژ گرفته که با استفاده از این فن سانتریفیوژ می‌توان سرعت هوای خروجی از نازل را 50 m/s افزایش داد. به منظور کاهش اغتشاشهای جریان هوا تونل فوق دارای ۴ سری توری با مش ۲۰ می باشد. همچنین به منظور مستقیم نمودن جریان سیال از لانه زنبوری استفاده شده است. با استفاده از پیتوت تیوپ و مبدل الکترونیکی فشار سرعت سیال در نازل اندازه‌گیری می‌شود.

کند. بنابراین باید پیچها و راهنماهای مکانیزم انتقال‌دهنده بدون لقی باشند. هر چه گام پیچ محورهای انتقال دهنده کمتر باشد، حرکت پراب با دقت بالاتری انجام خواهد گرفت. موتورهای پله‌ای با استفاده از راه‌اندازهای الکترونیکی (*Drivers*) دوران می‌کنند که این راه‌اندازها فرمان خود را از طریق نرم‌افزار مربوطه و میکروکنترلر دریافت می‌کنند.

۴-۳- لوله استاتیکی پیتوت و مبدل الکترونیکی فشار:

یکی از وسایل رایج برای اندازه‌گیری سرعت متوسط جریان سیال، لوله استاتیکی پیتوت است. لوله فوق‌وسيله‌ای است که با استفاده از آن فشار استاتیکی و فشار سکون جریان سیال اندازه‌گیری می‌شود. اگر فشارهای استاتیکی و سکون اندازه‌گیری شده به دو طرف مانومتر و یا مبدل الکترونیکی فشار متصل شوند، فشاردینامیکی و در نهایت سرعت جریان سیال اندازه‌گیری می‌شوند. شکل (۲-۳) لوله استاتیکی پیتوت را نشان می‌دهد که شامل سوراخهای حس‌کننده فشارهای سکون و استاتیکی است. سوراخ حس‌کننده فشار سکون (*A*) در قسمت جلویی لوله استاتیکی پیتوت قرار گرفته و سطح مقطع آن عمود بر جهت جریان سیال است. اندازه‌گیری فشار سکون ساده و خطای اندازه‌گیری آن ناچیز است (حساسیت اندازه‌گیری فشار سکون نسبت به انحراف جریان تا زاویه 4° نیز ناچیز است). مطابق شکل (۴-۳) اندازه‌گیری فشار استاتیکی توسط سوراخهای جانبی (*B*) انجام می‌شود. برای اندازه‌گیری فشار استاتیکی نیاز است سوراخهای حس‌کننده فشار استاتیکی، موازی با جهت جریان سیال باشند. با توجه به آثار نوک و ساقه لوله استاتیکی پیتوت، خطوط جریان موازی سوراخهای جانبی نبوده و این امر سبب خطای ذاتی لوله استاتیکی پیتوت می‌شود که فاصله سوراخهای حس‌کننده فشار استاتیکی از نوک و ساقه، مقدار این خطا را مشخص می‌کند.

مبدل الکترونیکی فشار، یک وسیله اندازه‌گیری الکترومکانیکی است که فشارها را تبدیل به سیگنال‌های الکترونیکی نموده و از طریق کارت *DAQ* به رایانه ارسال می‌نماید.



شکل (۳-۴) لوله استاتیکی پیتوت

۴-۴- پراب سیم‌داغ:

یکی از اجزای دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ پراب است که شامل سنسور (*Sensor*)، پایه‌ها (*Prongs*)، بدنه، کابل و اتصالات است. پراب جریان‌سنج سیم‌داغ بر مبنای نوع سنسور به‌کاررفته و یا تعداد سنسور آن (یک، دو و سه بعدی) تقسیم‌بندی می‌شود. سنسور پراب دستگاه جریان‌سنج، از نوع سیم‌داغ و یا فیلم‌داغ می‌باشد. قطر سنسور سیم‌داغ بسیار کم و دارای پاسخ فرکانسی بالا بوده ولی شکننده است. فیلم‌داغ معمولاً لایه‌ای از نیکل و یا پلاتین است که بر روی یک زیر لایه از جنس کوارتز

قرارمی‌گیرد. استحکام سنسور فیلم‌داغ بالا بوده ولی پاسخ فرکانسی آن نسبت به پاسخ فرکانسی سنسور سیم‌داغ کمتر می‌باشد.

سنسور با جوش القایی و یا لحیم کاری به دو پایه که معمولاً از جنس فولاد ضد زنگ و یا نیکل است، متصل می‌شود. برای آن که آثار تداخلی پایه در جریان به حداقل برسد، معمولاً پایه پراب به شکل سوزن ساخته می‌شود که قطر نوک آن 0.1 mm و پایه آن حدود 0.6 mm است. پراب مورد استفاده در آزمایشهای این پایان‌نامه از نوع SN و پراب لایه‌مرزی است که جنس سنسور آن از تنگستن می‌باشد.

۴-۵- سنسور سیم‌داغ:

همان‌گونه که در فصل اول بیان شد، اساس کار جریان‌سنج سیم‌داغ، انتقال حرارت از یک سیم گرم به جریان‌سیال می‌باشد. سنسور سیم‌داغ بر روی پایه‌های پراب نصب شده و از طریق کابل‌های الکتریکی به مدار الکترونیکی دما ثابت CT (یکی از شاخه‌های پل‌وتسون) متصل می‌شود. سنسور سیم‌داغ یک سیم بسیار نازک است و برای اندازه‌گیری سرعت جریان‌هوا و سایر گازها در بازه سرعت از چند دهم متر بر ثانیه تا سرعت‌های مافوق صوت و در مایعات نارسانا با سرعت کم قابل استفاده است.

سنسور سیم‌داغ پاسخ فرکانس بالایی نسبت به تغییرات جریان‌سیال داشته اما استحکام مکانیکی آن محدود است. همچنین با توجه به قطر کم آن نسبت به ذرات موجود در جریان‌سیال، بسیار حساس بوده و نمی‌توان از آن در تونل‌بادی که بطور هم‌زمان آزمایش مرئی‌سازی (*Visualization*) انجام می‌شود، استفاده نمود.

با توجه به مشخصه‌های عنوان شده، سنسور سیم‌داغ می‌تواند از جنس تنگستن (*Tungsten*)، پلاتین (*Platinum*)، آلیاژ پلاتین - رودیم (*Platinum-Rhodium*) با نسبت ۹۰-۱۰ و یا آلیاژ پلاتین - ایردیم (*Platinum-Iridium*) با نسبت ۸۰-۲۰ ساخته شود.



شکل (۴-۴) پراب با سنسور روکش‌دار و بدون روکش

الف- پراب با سنسور بدون روکش (*DANTEC 55P11*) ب- پراب با سنسور روکش‌دار (*DANTEC 55P01*)

مقاومت نهایی تنگستن در برابر کشش $250/000 \text{ N/cm}^2$ می‌باشد که بسیار بیشتر از تنش تسلیم پلاتین $35/000 \text{ N/cm}^2$ و آلیاژهای آن است، اما دمای اکسیدشدن آن از پلاتین بسیار کمتر می‌باشد. به همین دلیل نمی‌توان از تنگستن با وجود داشتن نقطه ذوب بسیار بالا در دماهای بالا استفاده نمود و معمولاً از آن برای اندازه‌گیری سرعت در جریان‌های گاز و هوا با دمای کمتر از 150°C استفاده می‌شود. سنسور تنگستن را می‌توان به دو دسته بدون روکش (*Unplated*) و روکش‌دار (*Plated*) تقسیم‌بندی نمود.

سنسور بدون روکش که در شکل (۴-۴) الف نشان داده شده است، سیم تنگستن با قطر حدود $5 \mu\text{m}$ و طول $1/25 \text{ mm}$ است که مستقیماً به دو سر پایه‌ها جوش داده می‌شود. اثر تداخلی پایه‌ها سبب کاهش دقت اندازه‌گیری جریان سیال در شدت‌آغتشاشهای بالا برای این پرابها می‌شود، بنابراین کاربرد این سنسورها در اندازه‌گیری جریانهای یک یا دو بعدی با شدت‌آغتشاشهای سرعت جریان سیال

حدود ۱۵٪~۱۰٪ مناسب است. سنسور روکش دار شکل (۴-۴) -ب، سیم تنگستنی با قطر $5 \mu m$ و طول $3 mm$ است که دو انتهای سنسور دارای روکش مس به ضخامت ۱۵ تا ۲۰ میکرومتر می باشد. قسمت فعال سیم دارای طولی حدود $1/25 mm$ است و سنسور در وسط آن قرار دارد. این سنسورها برای اندازه گیری جریان سیالی که شدت اغتشاشهای آن بالا است، طراحی شده است. آثار تداخلی پایه ها در این سنسورها کمتر بوده و در نتیجه دقت اندازه گیری در سرعت جریان سیالی که اغتشاشهای آن بالا است، افزایش خواهد یافت. با استفاده از این پرابها می توان جریانهای سیالی که شدت اغتشاشهای آنها حدود ۳۰٪~۲۰٪ است را اندازه گیری نمود. در آزمایشهای مربوط به این پایان نامه به دلیل پایین بودن شدت اغتشاشها ما از سنسور بدون روکش استفاده می کنیم:

برای ساختن سنسوری از جنس تنگستن، سیم تنگستن را ابتدا تا حداقل قطر ممکن (حدود $12-10 \mu m$) کشیده، سپس با لایه برداری الکتریکی در یک حمام اسید، قطر سیم تنگستن را تا حدود $2 \mu m$ کاهش می دهند. روش نصب سنسور تنگستن به ساقه های پراب به دو صورت لحیم کاری و جوشکاری است. سنسورهای بدون روکش با استفاده از القای الکتریکی به پایه جوش داده می شوند ولی سنسورهای روکش دار را می توان از طریق القای الکتریکی به پایه جوش داده و یا لحیم کاری نمود. سنسورهای از جنس تنگستن معمولاً برای اندازه گیری سرعت جریان سیال به کار برده می شوند. در این آزمایشهای از تنگستن به علت وجود مشخصه های بالا استفاده می کنیم:

۴-۶- سنسور فیلم داغ:

همان طور که گفته شد، سنسور سیم داغ دارای قطر بسیار کم حدود $5 \mu m$ است. این سنسور اگر چه دارای پاسخ فرکانسی بالا بوده ولی استحکام آن کم و خیلی سریع پاره می شود. همچنین با توجه به قطر آن سطح جانبی سنسور کم می باشد، بنابراین سنسور نسبت به آلودگیهایی نظیر گرد و غبار موجود در

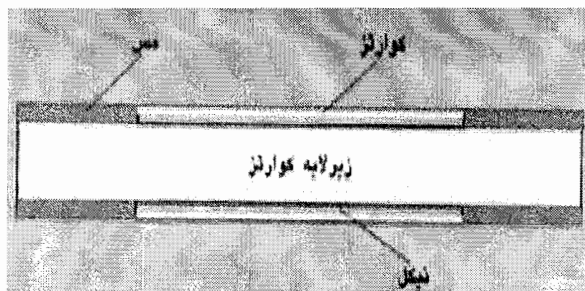
جریان هوا حساس است. هنگامی که گرد و غبار هوا به سنسور می‌چسبد، موجب تغییر میزان انتقال حرارت آن شده و نیاز است که سنسور را تمیز نموده و مجدداً به همراه دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ، کالیبره نمود. به منظور افزایش استحکام سنسور و کاهش حساسیت آن نسبت به آلودگیها، پراب با سنسور فیلم‌داغ طراحی و ساخته شده است.

این سنسور برای اندازه‌گیری سرعت در مایعات و یا گازها قابل استفاده بوده و به طور قابل توجهی مقاوم‌تر از سنسور سیم‌داغ است ولی حساسیت کمتری نسبت به تغییر سرعت لحظه‌ای جریان سیال دارد. سنسور فیلم‌داغ نسبت به وجود ناخالصیها و ذرات در جریان سیال حساسیت کمتری داشته و در اکثر کاربردهای صنعتی نظیر اسپرومتر (*Spirometer*)، خودروه‌های انژکتوری، دبی‌سنجها و غیره استفاده می‌شود.

طول سنسور حدود $1/25 \text{ mm}$ است. لایه نیکل روی زیر لایه کوارتز با استفاده از روش پاشش کاتدی ایجاد می‌شود. با استفاده از روش فوق و در یک فرایند پیوسته و یکنواخت، یک فیلم نازک همگن با خلوص و چسبندگی بالا بر روی زیر لایه کوارتز ایجاد می‌شود. فیلمها باید دارای یکنواختی مکانیکی و الکتریکی مناسب باشند. برای محافظت از فیلمها در آب و هوا از یک پوشش کوارتز به ترتیب به ضخامت $2 \mu\text{m}$ و $0/5 \mu\text{m}$ استفاده می‌شود. شکل (۴-۵) لایه‌های تشکیل دهنده سنسور فیلم‌داغ فیبری را نشان می‌دهد. وقتی از سنسور فیلم‌داغ در آب استفاده می‌شود، این پوشش مانع الکترولیز شدن هنگامی که از سنسور در گاز و هوا استفاده شود از اکسید شدن آن جلوگیری می‌کند. در پرابهایی که برای استفاده در آب طراحی می‌شوند، لازم است کلیه سطوح سنسور به جز المان سنسور با یک ماده عایق الکتریکی (لاک) پوشش داده شوند.

پس از لایه‌نشانی نیکل بر روی کوارتز، باید بر روی سنسور عملیات حرارتی انجام شود. در صورتی که دمای سنسور فیلم‌داغ در هنگام کارکرد بالاتر از دمای عملیات حرارتی شود، مقاومت سنسور فیلم‌داغ تغییر

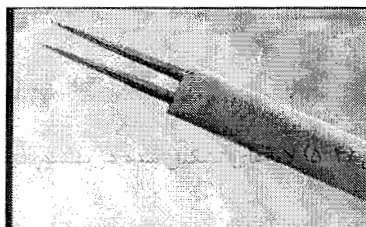
کرده و سنسور قابل استفاده نخواهد بود. به عنوان مثال سنسورهای فیلم داغ با پوشش ضخیم کوارتز که برای اندازه‌گیری در مایعات به کار می‌روند تا دمای $150^{\circ}C$ عملیات حرارتی می‌شوند و اگر از سنسور در دمایی بالاتر از $150^{\circ}C$ استفاده شود، مقاومت سنسور فیلم داغ تغییر می‌کند.



شکل (۴-۵) لایه‌های تشکیل شده در سنسور فیلم داغ فیبری

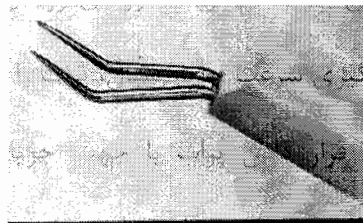
۴-۷- پراب یک‌بعدی:

پراب یک‌بعدی دارای یک سنسور بوده و قادر به اندازه‌گیری سرعت در جهت جریان سیال است. پراب یک‌بعدی را در شکل (۴-۶) که به پراب مستقیم *SN (Single Normal)* معروف است مشاهده می‌کنید. در پراب مستقیم *SN*، پایه‌ها موازی و هم اندازه بوده به طوری که سنسور عمود بر جریان سیالی که موازی ساقه است، قرار می‌گیرد.



شکل (۴-۶) پراب مستقیم *SN* (فرانسجش صبا *WP11*)

پرابهای مستقیم SN را می‌توان با استفاده از سنسورهای روکش‌دار و بدون روکش ساخت. معمولاً برای کاهش آثار پراب بر روی اندازه‌گیری سرعت جریان سیال، پراب را موازی جریان سیال قرار می‌دهند، اما برای اندازه‌گیری لایه‌مرزی، موازی قرار دادن پراب با جهت جریان سیال، موجب انسداد جریان در پایین‌دست سنسور و ایجاد خطا و اغتشاش در جریان سیال می‌شود. به همین منظور باید به پراب زاویه پیچ β داده و آن را نسبت به جریان سیال مایل نمود. در چنین حالتی باید پراب و دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ را در همان زاویه‌ای که قرار گرفته، کالیبره نمود. با استفاده از پراب لایه‌مرزی شکل (۷-۴) می‌توان لایه‌مرزی را اندازه‌گیری نمود.

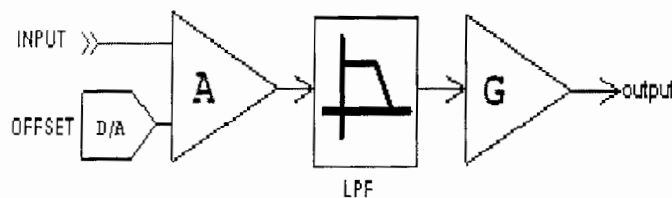


شکل (۷-۴) پراب لایه‌مرزی (فرانسجش صبا WPI3)

به‌صورتی که سنسور کاملاً نزدیک به دیواره قرار گرفته و ساقه پراب در جهت جریان سیال باشد. در این حالت بدنه پراب نسبت به سطح دیواره بالاتر خواهد بود، در نتیجه اثر راکد ماندن جریان سیال و اغتشاش ایجاد شده در جریان سیال کمتر می‌شود. در این تحقیق ما از پراب سیم‌داغ SN برای اندازه‌گیری جریان سیال و از پراب لایه‌مرزی برای اندازه‌گیری جریان سیال نزدیک دیواره و اندازه‌گیری لایه‌مرزی تشکیل شده استفاده می‌کنیم.

۸-۴ - تطبیق دهنده سیگنال (Signal Conditioner)

همان گونه که بیان شد، سیگنال خروجی مدار الکترونیکی دما ثابت CT به صورت ولتاژ است و می توان آن را از طریق کارت DAQ (Data Acquisition) به رایانه ارسال نمود. تغییرات ولتاژ نسبت به سرعت جریان سیال بویژه در سرعت های بالا کم است، به طوری که ارسال داده ها به صورت مستقیم به رایانه میسر نبوده و نمی توان در سرعت 20 m/s ، شدت اغتشاش های کمتر از 0.2% را اندازه گیری نمود. برای آن که سیگنال خروجی مدار الکترونیکی دما ثابت CT ، بدون مشکل از طریق کارت DAQ به رایانه ارسال شود.



شکل (۸-۴) مدار شماتیک تطبیق دهنده سیگنال (اردکانی ۱۳۸۳)

و همچنین نویزهای الکترونیکی سیگنال خروجی حذف و تا حد ممکن کاهش یابد، نیاز به واحد تطبیق دهنده سیگنال است.

مطابق شکل (۸-۴) واحد تطبیق دهنده سیگنال از مدارهای آفست، فیلتر پایین گذر و تقویت کننده تشکیل شده است. مدار آفست، ولتاژ منفی ایجاد نموده که با ولتاژ خروجی از مدار الکترونیکی دما ثابت CT جمع می شود. سپس ولتاژ آفست داده شده از فیلتر پایین گذر عبور کرده و با توجه به اندازه فرکانس قطع، فیلتر پایین گذر انتخاب می شود. با استفاده از فیلتر پایین گذر نویزها و سیگنال های بالاتر از فرکانس قطع حذف و یا خیلی کوچک می شوند. 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 به‌طور مناسبی تقویت شده و در بازه ولتاژ ورودی DAQ قرارگیرد. بنابراین ابتدا باید بازه تغییرات سرعت جریان سیال و یا ولتاژ خروجی از مدار الکترونیکی دما ثابت CT را مشخص کرده، سپس اندازه مناسب آفست و بهره را تعیین نمود.

۹-۴- جمع‌آوری و دریافت داده‌ها:

ولتاژ خروجی از طریق مدار الکترونیکی دما ثابت CT و یا واحد تطبیق‌دهنده ولتاژ از طریق کارت DAQ و یا درگاه سریال به رایانه ارسال می‌شود و با استفاده از نرم‌افزار، ولتاژهای مربوطه به‌صورت 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. همان‌گونه که بیان شد، دستگاه جریان سنج سیم‌داغ، قادر به اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال با دقت بالا و پاسخ فرکانسی بالاتر از 30 kHz است، بنابراین باید ولتاژ خروجی مدار الکترونیکی دما ثابت CT و یا واحد تطبیق‌دهنده ولتاژ که در حوزه زمان می‌باشند را به‌صورت دیجیتال تبدیل و به رایانه ارسال نمود. با استفاده از کارت DAQ ، ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ که به‌صورت آنالوگ می‌باشد به دیجیتال تبدیل و سپس به رایانه ارسال می‌شود. کارت DAQ که توسط شرکت‌های مختلف ساخته می‌شود، به‌سادگی قابل تهیه است. قیمت کارتهای DAQ مختلف بوده و انتخاب مناسب آن با هزینه کمتر مهم است. به‌طورکلی تعداد کانالهای ورودی و خروجی، نرخ نمونه‌برداری و دقت اندازه‌گیری در قیمت کارت DAQ تأثیرگذار است. تعداد کانالهای ورودی و خروجی: اکثر کارتهای DAQ دارای تعدادی کانال ورودی آنالوگ به دیجیتال، همچنین کانال خروجی دیجیتال به آنالوگ می‌باشند. هنگامی که سیگنالهای ورودی آنالوگ می‌باشند، نیاز به مبدل A/D (*Analog/Digital*) است تا داده‌های آنالوگ را به دیجیتال تبدیل نموده و به رایانه

ارسال کرد. در حالتی که خروجی آنالوگ مورد نیاز است باید سیگنالهای دیجیتال خروجی رایانه را به آنالوگ تبدیل نمود. دستگاه جریان سنج سیم‌داغ فقط دارای سیگنالهای ورودی آنالوگ بوده و نیاز به کارت DAQ که دارای خروجی آنالوگ باشد، نیست. کارتهای DAQ که دارای خروجی آنالوگ و یا دیجیتال نیستند به مراتب دارای قیمت پایین‌تری می‌باشند.

نرخ نمونه‌برداری: نرخ نمونه‌برداری یکی از پارامترهای مهم در انتخاب کارت DAQ است که با افزایش آن قیمت کارت DAQ نیز افزایش می‌یابد. با توجه به این که دستگاه جریان سنج سیم‌داغ قادر به اندازه‌گیری سرعت جریان لحظه‌ای با فرکانس بالاتر از 30 kHz است. طبق قانون نایکوست برای دریافت صحیح داده‌ها، حداقل نرخ نمونه‌برداری باید دو برابر فرکانس دستگاه جریان سنج سیم‌داغ باشد. این فرکانس در مدار تطبیق‌دهنده سیگنال با فیلتر پایین‌گذر، مشخص و تعیین می‌شود. با توجه به نوع جریان سیال و عدد رینولدز، فرکانس اغتشاشهای سرعت جریان سیال مشخص شده و براساس آن نرخ نمونه‌برداری تعیین می‌شود. در اکثر جریانهای آشفته فرکانس اغتشاشهای جریان سیال کمتر از 30 kHz است. برای اندازه‌گیری اغتشاشهای جریان سیالی که دارای فرکانس 30 kHz می‌باشد، نرخ نمونه‌برداری کارت DAQ نباید کمتر از 60 kHz باشد. بنابراین نرخ نمونه‌برداری کارت DAQ باید بالاتر از 100 kS/s ($k\text{ Scan/s}$) باشد. در این آزمایشها از کارت DAQ National Instrument استفاده می‌کنیم.

۴-۱۰- نرم‌افزار (Flow Ware)

نرم‌افزار (Flow Ware) برای جریان سنج سیم‌داغ مورد استفاده قرار می‌گیرد. خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ که به صورت ولتاژ می‌باشد از طریق کارت DAQ به رایانه ارسال می‌شود. داده‌های ارسال شده به رایانه دارای کمیت ولتاژ بوده و با استفاده از نرم‌افزار، داده‌های فوق به صورت مفاهیم

فیزیکی و ریاضی پردازش و تبدیل می‌شوند. یک نرم‌افزار مناسب باید دارای قابلیت‌های زیر بوده و استفاده از آن برای کاربر آسان باشد:

- مدیریت داده‌ها
- تنظیم سخت‌افزار جریان‌سنج سیم‌داغ
- کالیبراسیون دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ
- توانایی حرکت پراب
- انجام آزمایش اولیه
- انجام آزمایش دقیق

۴-۱۰-۱- مدیریت داده‌ها: برای انجام آزمایش با دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ ابتدا باید تنظیمات سخت‌افزاری و کالیبراسیون انجام شده، سپس فایل‌های مربوط به روند آزمایش، برداشت داده‌ها و تجزیه و تحلیل را ایجاد نمود. با توجه به این که داده‌های یک آزمایش می‌توانند از نوع آماری و یا لحظه‌ای باشند و تعداد آزمایشها و پارامترهای اندازه‌گیری نیز متنوع می‌باشند، بنابراین نیاز است که نرم‌افزار به‌نحو مطلوبی داده‌ها را دسته‌بندی و مدیریت نماید، به‌طوری‌که فایل مورد نظر را بتوان به‌آسانی ایجاد، ذخیره و یا استفاده نمود تا کاربر به سهولت به داده‌ها و فایل‌های مورد نظر دسترسی داشته باشد.

۴-۱۰-۲- تنظیم سخت‌افزار جریان‌سنج سیم‌داغ: همان‌گونه که بیان شد برای استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ نیاز است که سخت‌افزار آن را تنظیم نمود. این تنظیمات می‌تواند به‌صورت کاملاً خودکار انجام شود، به‌طوری‌که پس از وارد نمودن اطلاعات مورد نیاز در نرم‌افزار، داده‌های لازم از طریق درگاه سریال به قسمت میکروکنترلر دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ ارسال شده و از طریق میکروکنترلر با کنترل رله‌های مختلف مدار الکترونیکی دما ثابت CT و تطبیق دهنده سیگنال تنظیمات لازم انجام شود. این تنظیمات می‌تواند به‌صورت دستی نیز انجام شود، یعنی نرم‌افزار اطلاعات لازم را برای تنظیم سخت‌افزار مشخص

نموده و کاربر به‌طور دستی سخت‌افزار را تنظیم نماید. تنظیمات اصلی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ عبارتند از: نسبت فراگرمایی، پاسخ فرکانسی، بهره مدار تطبیق‌دهنده، آفست مدار تطبیق‌دهنده و فیلتر پایین‌گذر و بالا‌گذر.

با تنظیم نسبت فراگرمایی، مقاومت و در نتیجه درجه حرارت سنسور مشخص می‌شود. با استفاده از تنظیم بهره و فیلتر مدار الکترونیکی دما ثابت CT ، می‌توان پاسخ فرکانسی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ را بهینه نمود. برای بهینه نمودن پاسخ فرکانسی باید خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ را به‌صورت اسیلوگرام در رایانه مشاهده نموده، سپس بهره و فیلتر مدار الکترونیکی CT را طوری تنظیم نمود تا پاسخ فرکانسی جریان‌سنج سیم‌داغ بهینه شود. برای تنظیم بهره آفست و فیلتر پایین‌گذر در مدار تطبیق‌دهنده، باید بازه سرعت و ولتاژ خروجی از دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ را مشخص و سپس تنظیمات لازم را انجام داد.

توانایی حرکت پراب: به‌منظور انجام آزمایش و بررسی پدیده‌های مختلف سیالاتی نظیر لایه‌مرزی، جدایش و ... نیاز است تا اندازه‌گیری سرعت جریان‌سیال در نقاط مختلف با استفاده از مکانیزم انتقال‌دهنده پراب انجام شود. نرم‌افزار باید قادر به حرکت مکانیزم انتقال‌دهنده پراب باشد تا با تغییر مکان پراب بتوان سرعت لحظه‌ای را در نقاط مورد نظر اندازه‌گیری نمود. نرم‌افزار از طریق درگاه سریال با میکروکنترلر ارتباط برقرار کرده و از طریق میکروکنترلر و درایور موتورهای پله‌ای را فعال و مکانیزم انتقال‌دهنده پراب را حرکت می‌دهد.

انجام آزمایش اولیه: برای بررسی پدیده‌های جریان‌سیال بهتر است، ابتدا پژوهشگر آزمایش را به‌صورت سریع انجام داده و دید کلی نسبت به آزمایش مورد نظر پیدا کند، سپس نتایج آزمایش را تجزیه و تحلیل اولیه نموده و پس از آن آزمایش را به‌طور دقیق انجام دهد. در بررسی اولیه می‌توان فرکانس اغتشاش

سرعت جریان سیال و نوع آن را تشخیص داده و در نتیجه زمان و نرخ نمونه برداری آزمایش را تعیین نمود. در این حالت نرم افزار باید قادر به اخذ داده‌ها، تبدیل آنها به سرعت لحظه‌ای و نمایش آنها به صورت آماری و لحظه‌ای در بعد زمان و فرکانس باشد. سرعت لحظه‌ای در بعد زمان به صورت اسیلوگرام است که استفاده از تبدیلات فوریه می‌تواند سرعت لحظه‌ای را به صورت طیف فرکانسی نمایش داد. با تغییر مکان پراب با استفاده از مکانیزم انتقال دهنده، می‌توان پراب را تغییر مکان داده و داده‌ها را دریافت و بررسی نمود.

انجام آزمایش دقیق: پس از تنظیم نمودن دستگاه جریان سنج سیم‌داغ و انجام کالیبراسیون و آزمایش اولیه باید آزمایش دقیق انجام شود. در این حالت ابتدا باید موقعیت پراب را نسبت به مبدأ مختصات تونل باد و یا مدل مشخص نمود. سپس مکانهای مورد نظر برای اخذ داده و نحوه حرکت مکانیزم انتقال دهنده پراب را تعیین نمود، همچنین مقادیر آماری و یا لحظه‌ای، زمان اندازه‌گیری سرعت جریان سیال و دیگر پارامترها نظیر تنش برشی را برای ذخیره نمودن و زمان مکث بین حرکت پراب و اخذ داده‌ها را مشخص نمود. در این حالت آزمایش به‌طور خودکار انجام می‌شود.

نرم افزار دستگاه جریان سنج سیم‌داغ می‌تواند با استفاده از زبانهای برنامه‌نویسی پایه نظیر C^{++} و *Basic* توسط کاربر نوشته شود. با توجه به حجم بالای برنامه‌نویسی این امر مستلزم صرف وقت و تجربه می‌باشد. شرکتهای سازنده دستگاه جریان سنج سیم‌داغ چنین نرم افزارهایی را با کیفیت مناسب طراحی نموده و نوشته‌اند. این شرکتهای بیشتر از زبان برنامه‌نویسی *Labview* که نرم افزاری مناسب برای دستگاههای آزمایشگاهی است، استفاده می‌کنند. نرم افزار (*Flow Ware*) به زبان برنامه‌نویسی *Labview* نوشته شده است.

۴-۱۱- کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم‌داغ:

با توجه به این که دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ دارای دقت بالایی بوده و کوچکترین تغییری در شرایط جریان، نحوه قرارگیری پراب، آلودگی جریان‌سیال و ... می‌تواند بر روی مقدار ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ تأثیرگذار، بنابراین قبل از انجام هر آزمایش دقیق کالیبره نمودن آن ضروری به نظر می‌رسد.

هدف از انجام فرایند کالیبراسیون در دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ، تعیین رابطه بین سرعت و ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ به صورت $E = f(U)$ و یا $U = f^{-1}(E)$ می‌باشد. برای کالیبره نمودن دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ، نیاز به سرعت‌های معلوم است تا ولتاژهای خروجی متناظر با این سرعت‌ها اندازه‌گیری شوند. این سرعت‌های معلوم و معین را سرعت مرجع (U_R) می‌نامند و باید شدت‌آغتشاش سرعت‌های مرجع کمتر از ۰/۵٪ باشد.

برای ایجاد سرعت‌های مشخص و کالیبره نمودن دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ در جریان‌هوا نیاز به دستگاه کالیبراتور است که معمولاً از تونل‌باد با ابعاد مختلف و یا مخزن هوای فشرده به همراه نازل استفاده می‌شود. علاوه بر دستگاه کالیبراتور نیاز به وسیله اندازه‌گیر سرعت جریان‌سیال می‌باشد که معمولاً از لوله استاتیکی پیتوت استفاده می‌شود. پس از مشخص نمودن سرعت‌های مرجع $U_R(n)$ و ولتاژهای خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ $E(n)$ ، لازم است تا رابطه $E = f(U)$ مشخص شود که از روابط مختلف می‌توان استفاده نمود.

۴-۱۱-۱- روشهای کالیبراسیون:

همانطور که در بخش پیش ذکر شد، هدف از انجام کالیبراسیون تعیین رابطه میان سرعت U و ولتاژ خروجی دستگاه بادسنج سیم‌داغ، E ، به صورت $E = F(U)$ می‌باشد. جهت انجام فرآیند کالیبراسیون روشهای مرسوم وجود دارند که می‌توان آنها را بر اساس تغییر بازه سرعت دستگاه کالیبراسیون متناسب با آن سرعت، طبقه‌بندی کرد. این دسته‌بندی بدین‌منظور است که با تغییر مقادیر سرعت، شرایط جریان تغییر کرده و به همراه آن فاکتورهای تأثیرگذار بر ولتاژ خروجی نظیر عدد رینولدز، عدد گرافش و ... تغییر می‌کند.

در کالیبراسیون، جهت بدست‌آوردن سرعت مرجع U_R ، از دستگاه‌های اندازه‌گیر مختلف، استفاده می‌شوند. این دستگاه‌های اندازه‌گیر برای شرایط عادی (جریان با سرعت متوسط و تراکم‌ناپذیر)، دو نوع می‌باشند. یکی لوله پیتوت استاتیکی و دیگری نازل می‌باشد. در نازل، پراب در خروجی مخزنی که فشار آن قابل تنظیم است قرار دارد. با اندازه‌گیری فشار اتمسفر P_{atm} و فشار داخل مخزن، P_0 ، مقدار سرعت را هنگام خروج از مخزن، طبق رابطه $P_0 - P_{atm} = \frac{1}{2} \rho U^2$ محاسبه کرده و از این سرعت در کالیبراسیون استفاده می‌کنیم. در رابطه فوق، چگالی هوا، در دمای اتمسفر می‌باشد.

قطر خروجی نازل در حدود 12 mm و دارای ابعاد کوچکی بوده و حمل و نقل آن راحت‌تر از تونل‌باد کوچک می‌باشد اما از طرفی ابعاد کوچک آن سبب می‌شود که هنگام قرارگیری پراب مسئله انسداد (*blockage*) پیش آمده و ضریب انسداد آن افزایش می‌یابد اما در تونل‌باد کوچک با توجه به ابعاد بزرگتری که دارد ($50-60 \text{ mm}$) این مسئله اتفاق نمی‌افتد. به طور کلی، کالیبراسیون بادسنج سیم‌داغ بدین صورت انجام می‌شود که در ابتدا بازه تغییرات سرعت مرجع یا مقادیر حداکثر و حداقل سرعت

مرجع، $(U_{R \min}, U_{R \max})$ را مشخص می‌کنیم. بهتر است که نسبت $\frac{U_{R \max}}{U_{R \min}}$ از ۱۰ تجاوز نکند، سپس بین دو مقدار $(U_{R \min}, U_{R \max})$ ، در حدود ۱۰ تا ۳۰ نقطه را مشخص کرده و مقادیر U_R در این نقاط و \dot{m} متناظر با آن را اندازه‌گیری می‌کنیم. با توجه به برخی از اغتشاشاتی که ممکن است در داخل جریان سیال وجود داشته‌باشد، لذا جهت کالیبراسیون باید مقادیر سرعت U_R را در یک بازه زمانی مناسب در حدود ۳۰-۱۰ ثانیه اندازه‌گیری نموده و میانگین این داده‌های اندازه‌گیری شده در این بازه زمانی را به عنوان سرعت U معرفی می‌نمائیم.

کالیبراسیون برای سرعت‌های پایین:

یکی از کاربردهای اصلی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ، استفاده از آن برای اندازه‌گیری سرعت جریان‌های کمتر از 5 m/s است. با توجه به این‌که دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ در سرعت‌های پایین حساسیت بسیار بالایی داشته و سایر دستگاه‌های اندازه‌گیر چنین توانایی را ندارند، بنابراین استفاده از دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ و به دنبال آن کالیبراسیون در سرعت‌های پایین اهمیت ویژه‌ای دارد.

برای کالیبراسیون در سرعت‌های کم، اندازه‌گیری سرعت مرجع U_R توسط لوله‌پیتوت دارای خطا بوده و شاید غیر ممکن باشد. برای مثال برای کالیبراسیون در بازه سرعت $(5 \text{ m/s} - 0)$ اگر این بازه به ۱۰ قسمت تقسیم شود، مشاهده می‌شود که مقدار فشار دینامیکی $\rho U_R^2 / 2$ ، برای سرعت‌های کم نظیر $U_R = 0.5 \text{ m/s}$ ، بسیار پایین و حدود 0.105 mm.Wg یا (0.15 Pa) است که اندازه‌گیری آن با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت بسیار مشکل است، بنابراین برای کالیبراسیون دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ در سرعت‌های پایین باید از روش‌های زیر استفاده نمود.

۴-۱۱-۱-۱- استفاده از اتاق آرامش تونل باد:

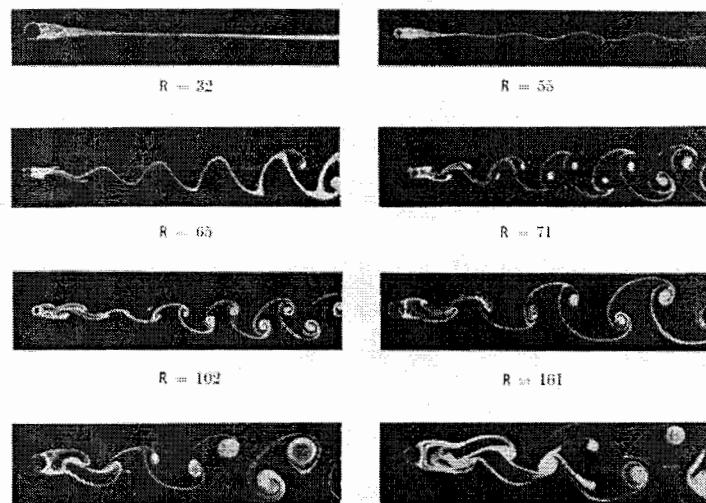
یکی از روشهای معمول، قرار دادن لوله پیتوت در اتاق آزمایش و قرار دادن پرآب دستگاه جریان سنج سیم‌داغ در اتاق آرامش (Settling Chamber) می‌باشد. با توجه به مشخص بودن نسبت سطح مقطع اتاق آرامش به اتاق آزمایش (برای مثال $A_1/A_0=10$) و اندازه‌گیری سرعت جریان سیال در اتاق آزمایش با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت، می‌توان سرعت جریان سیال در اتاق آرامش را با استفاده از قانون پیوستگی به صورت زیر به دست آورد:

$$V_1 = \frac{A_0}{A_1} V_0 \quad (۱-۴)$$

سرعت جریان سیال با نسبت A_1/A_0 و فشاردینامیکی با نسبت $(A_1/A_0)^2$ بیشتر از سرعت جریان سیال و فشاردینامیکی در اتاق آرامش است، بنابراین اندازه‌گیری فشاردینامیکی با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت در اتاق آزمایش به سادگی قابل انجام است.

۴-۱۱-۱-۲- استفاده از گردابه‌های منظم:

این روش بر مبنای ایجاد گردابه‌های منظم ناشی از استوانه‌ای نازک (کارمن ورتکس) در داخل جریان سیال است. شکل (۴-۹) جریان اطراف یک استوانه را در اعداد رینولدز Ud/ν بر مبنای قطر استوانه d نمایش می‌دهد. هنگامی که عدد رینولدز Re خیلی کم است، جریان در پایین دست و بالادست استوانه



شکل (۴-۹) جریان اطراف استوانه در اعداد رینولدز مختلف (Schlichting 1990)

مشابه می‌باشد. با افزایش عدد رینولدز Re ، لایه مرزی بر روی استوانه ایجاد شده و تا هنگامی که عدد رینولدز حدود ۳۰-۴۰ می‌باشد، دنباله جریان پایین دست استوانه به صورت رژیم آرام است. هنگامی که عدد رینولدز حدود ۴۰-۵۰ است، جریان سیال در پایین دست استوانه شروع به ایجاد یک حرکت موجی شکل می‌نماید و تشکیل گردابه آغاز می‌شود.

هنگامی که این عدد به ۱۴۰ می‌رسد، گردابه‌های جریان سیال به وضوح مشاهده می‌شوند و اندازه گردابه‌ها نیز افزایش می‌یابد. این گردابه‌ها تا عدد رینولدز ۲۰۰۰ نیز مشاهده می‌شوند. بنابراین در اعداد رینولدز حدود (۵۰-۲۰۰۰)، جریان سیال پایین دست استوانه به صورت گردابه می‌باشد. این گردابه‌ها به صورت موج سینوسی توسط دستگاه جریان سنج سیم‌داغ دریافت می‌شوند. فرکانس گردابه‌ها متناسب با عدد رینولدز Re بوده و با استفاده از معادله دو ضابطه‌ای زیر به دست می‌آید:

$$\begin{cases} F = 0.212 Re^{-4.5} & (50 < Re < 150) \\ F = 0.212 Re^{-2.7} & (300 < Re < 2000) \end{cases} \quad (۲-۴)$$

در معادله (۲-۴) F فرکانس بی‌بعد بوده و برابر با $F = fd^2 / \nu$ است، d قطر استوانه، f فرکانس گردابه و ν لزجت سینماتیکی سیال می‌باشند. فرکانس گردابه ناشی از استوانه را نیز می‌توان به صورت عدد استروهال (*Strouhal*) بیان نمود:

$$\begin{cases} S_N = 0.212(1 - 21.2 / Re) & (50 < Re < 150) \\ S_N = 0.212(1 - 12.7 / Re) & (300 < Re < 2000) \end{cases} \quad (۳-۴)$$

S_N عدد استروهال بوده و برابر با $S_N = fd / U$ است.

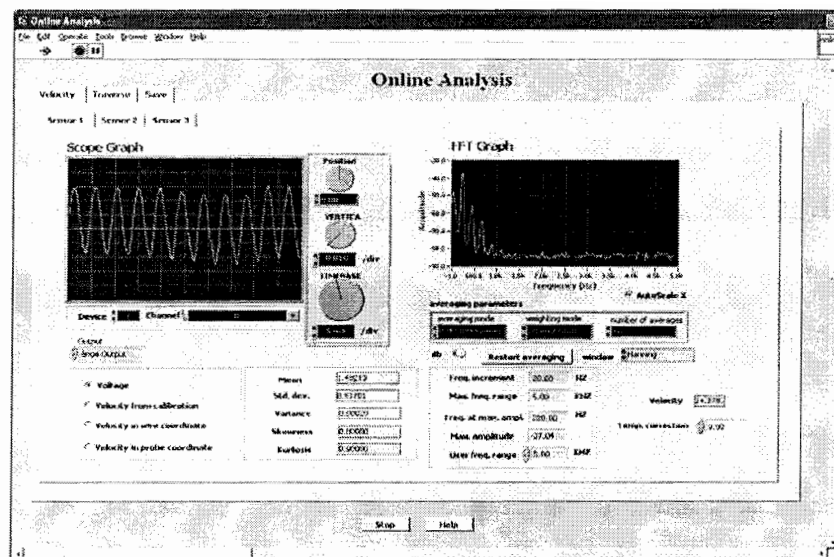
با استفاده از دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ، فرکانس گردابه‌های پایین‌دست استوانه اندازه‌گیری شده و با توجه به قطر استوانه و لزجت سینماتیکی سیال، فرکانس بی‌بعد شده محاسبه می‌شود. با استفاده از معادله (۲-۴)، عدد Re و در نهایت سرعت جریان سیال به دست می‌آید. سرعت جریان سیال به عنوان سرعت مرجع U_R است و باید مقدار متوسط خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ $E(t)$ را که به صورت سینوسی است به عنوان E_R در نظر گرفته و معادله کالیبراسیون $E = f(u)$ را به دست آورد. با استفاده از این روش، دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ کالیبره می‌شود. همچنین با اندازه‌گیری فرکانس گردابه و در نتیجه عدد استروهال و با استفاده از معادله (۳-۴) نیز می‌توان عدد رینولدز و در نتیجه سرعت جریان سیال را اندازه‌گیری نمود.

برای اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌ها باید از دستگاه طیف‌سنج استفاده نمود و یا آن‌که با استفاده از کارت *DAQ*، داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ را به رایانه ارسال و با استفاده از

نرم‌افزار و انجام تبدیلات فوریه، داده‌های اخذ شده در حوزه زمان را به حوزه فرکانس تبدیل نموده و فرکانس گردابه پایین‌دست استوانه را مشخص نمود. با توجه به این‌که فرکانس گردابه‌های ایجادشده بستگی به قطر استوانه مورد نظر و سرعت جریان سیال دارد، برای کالیبراسیون ابتدا باید بازه سرعت جریان سیال را مشخص نمود و با استفاده از معادله (۲-۴) استوانه‌ای با قطر مناسب انتخاب نمود. با کاهش قطر استوانه برای بازه مشخص سرعت (U_{Rmin}, U_{Rmax}) ، فرکانس گردابه‌هایی که توسط دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ اندازه‌گیری می‌شود، افزایش می‌یابد.

به‌عنوان مثال برای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال 0.5 m/s ، با در نظر گرفتن $\nu = 1/5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ، حداقل قطر استوانه باید $1/5 \text{ mm}$ باشد که در این حالت فرکانس گردابه‌ها حدود 67 Hz است. با استفاده از این استوانه می‌توان حداکثر سرعت جریان سیال حدود 20 m/s را اندازه‌گیری و دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ را کالیبره نمود. اگر قطر استوانه 0.6 mm انتخاب شود، می‌توان سرعت جریان سیال را با استفاده از این روش تا حدود 50 m/s اندازه‌گیری نمود. در این حالت فرکانس گردابه‌ها حدود 17 kHz است. در استفاده از این روش برای کالیبراسیون دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ، فرکانس نمونه‌برداری بسیار مهم است و باید اصل نایکویست نیز رعایت شود.

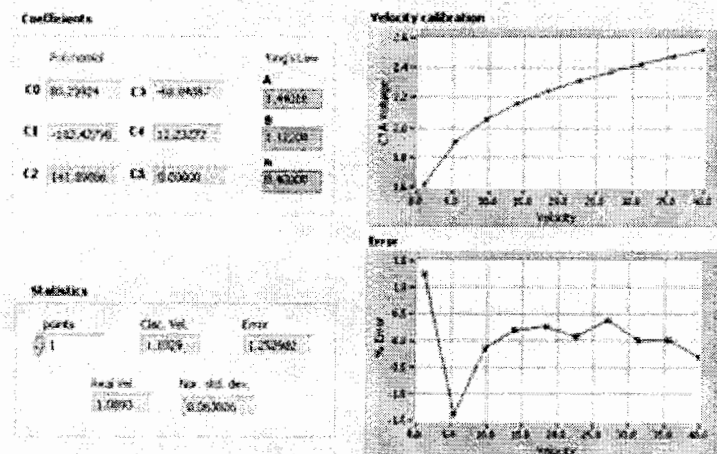
در روش فوق برای این‌که گردابه‌ها با وضوح بهتری اخذ شوند، باید پراب را در فاصله مناسبی از استوانه قرار داد. شکل (۴-۱۰) ولتاژ خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ را برای دو نقطه در پایین‌دست استوانه نشان می‌دهد. در صورتی‌که پراب در مکان مناسبی نسبت به استوانه قرار نداشته باشد، گردابه‌ها توسط دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ به صورت موج سینوسی اندازه‌گیری نمی‌شوند. با تغییر مکان پراب به آسانی و با تجربه مختصری، محلی که گردابه‌ها به وضوح قابل اخذ باشند، مشخص می‌شوند.



شکل (۱۰-۴) بررسی سرعت لحظه‌ای جریان در ناحیه پایین دست یک مفتول به قطر 0.16 mm .

کالیبراسیون سرعت‌های تراکم‌ناپذیر ($5 \text{ m/s} \sim 100 \text{ m/s}$):

کالیبراسیون جریان سنج سیم‌داغ برای بازه سرعت ($5 \text{ m/s} \sim 100 \text{ m/s}$) آسان بوده و می‌توان با استفاده از تونل باد و یا مخزن هوای فشرده به همراه نازل، جریانی با سرعت فوق را ایجاد نمود. با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت و مانومتر (یا مبدل الکترونیکی فشار) می‌توان سرعت جریان سیال را اندازه‌گیری کرده و دستگاه جریان سنج سیم‌داغ را کالیبره نمود.



شکل (۱۱-۴) منحنی کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم‌داغ برای بازه سرعت $5-4.0 \text{ m/s}$

شکل (۱۱-۴) منحنی کالیبراسیون سیم‌داغ را در بازه $5-4.0 \text{ m/s}$ نشان می‌دهد. منحنی کالیبراسیون غیر خطی بوده به طوری که تغییرات ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ در سرعت‌های کم بیشتر بوده و با افزایش سرعت جریان سیال کاهش می‌یابد.

معادله کالیبراسیون سیم‌داغ:

همان‌طور که بیان شد برای کالیبره نمودن بادسنج سیم‌داغ نیاز است که رابطه $U=F(E)$ را بدست آورد. لذا تعداد (10 ~ 30) نقطه (E_R, U_R) را با استفاده از دستگاه کالیبراسیون محاسبه، همچنین رابطه $U=F(E)$ را با فیت نمودن منحنی طبق معادلات مختلف بدست آورد. در انتخاب معادله کالیبراسیون سیم‌داغ باید میزان دقت و همچنین سادگی استفاده از معادله را در نظر گرفت به طوری که خطای فیت نمودن منحنی کاهش یافته و همچنین در زمان بسیار کوتاهی بتوان سرعت جریان را با استفاده از ولتاژ خروجی بادسنج بدست آورد. البته با توجه به رشد سریع کامپیوترها از نظر سرعت و حافظه نوع

محاسبات از اهمیت خاصی برخوردار نبوده و بهتر است از معادلاتی استفاده کرد تا منحنی (E_R, U_R) را به دقت بالا فیت نمایند.

قانون توان:

همان‌طور که قبلاً گفته شد، معادله King را می‌توان به عنوان معادله کالیبراسیون استفاده نمود:

$$E^2 = A + BU^n \quad (4-4)$$

برخی از محققان پیشنهاد داده‌اند که $n = 0.5$ باشد. البته توسط محققان بسیاری، بررسیها برای رسیدن به مقدار n مناسبی که بهترین دقت را به ما بدهد؛ انجام گردیده است. در سرعت‌های متوسط، برای سنسور سیم‌داغ تنگستنی با قطر $5 \mu m$ مقدار n معمولاً بین $0.45 - 0.4$ است.

تقریب نمودن با روش معادله توانی (King):

معادله توانی (King) را می‌توان به عنوان معادله کالیبراسیون استفاده نمود:

$$E^2 = A + BU^n \quad (5-4)$$

مقادیر A ، B و n ضرایب ثابتی می‌باشند که با استفاده از کالیبراسیون سرعت به دست می‌آیند. (Collis & Williams 1959) برای بازه $0.02 < R_e < 44$ ، (عدد رینولدز R_e بر پایه قطر سنسور است) مقدار $n = 0.45$ را بهترین نتیجه برای تقریب نمودن معادله کالیبراسیون به صورت توانی بیان نمودند. در سرعت‌های متوسط، بهترین مقدار n برای یک پراب سیم‌داغ با قطر $5 \mu m$ حدود $0.4 - 0.45$ است. شکل (9-1) نشان می‌دهد که دقت منحنی تقریب شده بستگی به n دارد. زمانی که n از مقدار بهینه خود تغییر می‌کند مقدار ϵ_u به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. برای به دست آوردن ضرایب ثابت معادله توانی از روشهای

مختلفی می‌توان استفاده نمود، یکی از روشها، حل نمودن معادله‌ها به‌طور همزمان و به‌دست آوردن مقادیر A ، B و n است.

در روش دیگر که توسط (Ardekani 1383) انجام شد، ابتدا مقادیر ولتاژ E اندازه‌گیری شده از دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ به توان ۲ رسیده، سپس مقادیر سرعت جریان سیال U به توان $(0.1+0.01(I))$ می‌رسد. هنگامی که $I=0$ است، بهترین خطی را که با رابطه $(E^2, U^{0.1})$ تقریب زده می‌شود، به‌دست آورده و مقادیر $A(0)$ ، $B(0)$ و $\varepsilon_{ii}(0)$ مشخص می‌شوند، سپس برای $I=1$ بهترین خطی که با رابطه $(E^2, U^{0.11})$ تقریب زده می‌شود، همچنین مقادیر $A(1)$ ، $B(1)$ و $\varepsilon_{ii}(1)$ را تعیین نموده و این عمل تا $I=80$ تکرار می‌شود. سپس با توجه به کمترین مقدار $\varepsilon_{ii}(I)$ ، می‌توان بهترین معادله کالیبراسیون $E^2 = A + BU^n$ را به‌دست‌آورد. در این حالت A و B متناظر با کمترین مقدار $\varepsilon(I)$ و $n = 0.1 + 0.01(I)$ است. با استفاده از رایانه‌های امروزی زمان بسیار کمی برای انجام محاسبات فوق صرف می‌شود. طبق رابطه توانی، هنگامی که $U=0$ است، $E^2_{(U=0)} = A$ خواهد بود. اما با روش ارایه‌شده مقدار A برابر $E^2_{(U=0)}$ نخواهد بود، بویژه برای حالتی که بازه کالیبراسیون شامل نقطه $U=0$ نباشد. هنگامی که کالیبراسیون در سرعت‌های پایین انجام می‌شود، مقدار n کاهش می‌یابد (Ardekani 1383).

فصل پنجم

روش آزمایش و بررسی و تجزیه تحلیل

نتایج آزمایشها

روش آزمایش و بررسی و تجزیه تحلیل نتایج آزمایشها

۵-۱- روش آزمایش:

همانگونه که در مقدمه و همچنین فصل سوم در مورد روشهای اندازه گیری جریان معکوس در این تحقیق بیان شد برای طراحی و ساخت اسپرومتر از نوع جریان سنج سیم داغ نیاز است که مسائل مختلفی بصورت دقیق بررسی و آزمایش شود. به دلیل اینکه دستگاه جریان سنج سیم داغ نمی تواند به تنهایی جریان معکوس را اندازه گیری کند، بنابراین با توجه به روشهای ذکر شده، مبنای کار آن اثر دنباله (Wake) می باشد. بدین صورت که بر اثر وجود دنباله و تاثیر آن بر روی سنسور، در سنسور انتقال-حرارت کمتری صورت گرفته و ولتاژ کمتری را به عنوان خروجی دستگاه خواهیم داشت و بدین صورت جهت جریان تعیین می شود. در این آزمایشها اثر دنباله به دو صورت حرارتی و سیالاتی می باشد.

اثر دنباله حرارتی بوسیله آزمایش دو سنسور فیلم داغ و بررسی اثر متقابل آنها بر روی یکدیگر انجام شده است. اثر دنباله سیالاتی بوسیله دنباله بوجود آمده در پایین دست مفتول با قطرهای مختلف و صفحه نازک و انجام آزمایش و بررسی جریان پایین دست آنها صورت می گیرد. همچنین به دلیل اینکه در اسپرومتر ما دبی حجمی را اندازه گیری می کنیم و دستگاه جریان سنج سیم داغ سرعت لحظه ای را اندازه گیری می کند به همین دلیل برای اینکه در یک سطح مقطع مشخص ما جریان یکنواختی را داشته باشیم از توری با مشهای مختلف و نازل استفاده می کنیم که در این آزمایشها بررسی جریان پایین دست توری و نازل نیز انجام شده است.

در این پایان نامه آزمایشات مختلفی انجام گرفت که می توان به شرح زیر بیان نمود:

۱. بررسی جریان پایین دست مفتول با قطرهای مختلف و صفحه نازک

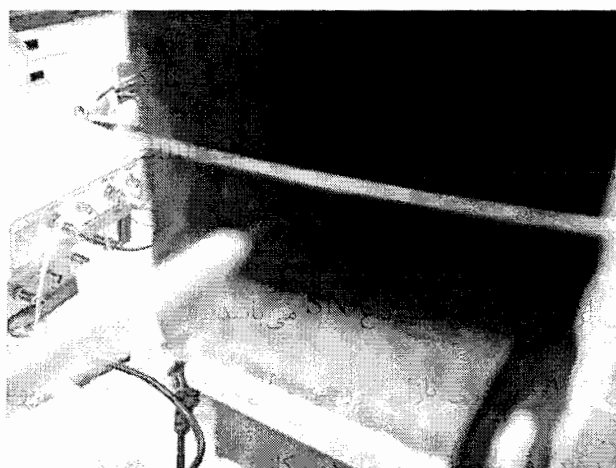
۲. اثر دو سنسور فیلم داغ

۵-۱-۱- اندازه‌گیری جریان پایین‌دست مفتول با قطرهای مختلف و صفحه‌نازک:

به‌منظور بررسی توزیع سرعت در ناحیه دنباله مفتول و صفحه نازک این آزمایش انجام شده‌است. مفتول‌های بکاررفته در این آزمایش دارای قطرهای $D=0.6\text{mm}, 1\text{mm}, 1.5\text{mm}, 2\text{mm}, 2.2\text{mm}$ است.

پرآب بکار رفته در این آزمایش از نوع سیم‌داغ SN می‌باشد.

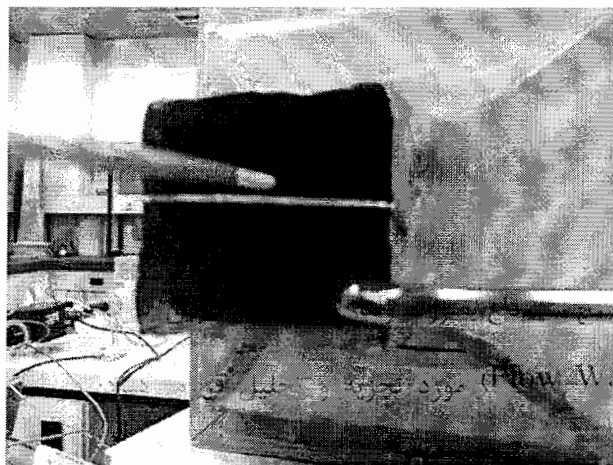
مفتول‌ها مطابق شکل (۵-۱) بر روی نازل خروجی تونل‌باد نصب شده‌است. تونل‌باد بکاررفته از نوع مدار باز دمنده، ذکر شده در قسمت قبل می‌باشد. مکانیزم انتقال‌دهنده مطابق شکل (۴-۲) ذکر شده در قسمت قبل می‌باشد. برای کالیبراسیون سرعت آنها، از لوله استاتیکی پیتوت استفاده می‌شود.



شکل (۵-۱) نصب مفتول بر روی تونل‌باد

خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ بصورت ولتاژ بوده که از طریق کارت DAQ به کامپیوتر ارسال شده و توسط نرم افزار (Flow Ware) مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. در این آزمایش ما نیاز به دو جریان سنج سیم داغ داریم:

پرآب مطابق شکل (۲-۵) در مقابل مفتول و جریان قرار می گیرد.



شکل (۲-۵) نحوه قرارگیری پرآب در مقابل مفتول و جریان

سنسور را در جهت های مختلف X (پایین دست جریان) و Y (عمود بر جهت جریان) با استفاده از مکانیزم انتقال دهنده پرآب حرکت داده جریان هوا را با استفاده از جریان سنج سیم داغ اندازه گیری می کنیم. در این آزمایشات نقطه $y=0$ مرکز مفتول برای ما مهم می باشد. بدین منظور در ابتدا توزیع سرعت را در جهت عمود بر جهت جریان Y رسم کرده و با استفاده از آن می توان مرکز مفتول را تشخیص داد (جایی که در جهت Y کمترین سرعت را داریم)، بنابراین نیاز است که با دقت 0.1 میلیمتر مکانیزم انتقال دهنده را حرکت داد.

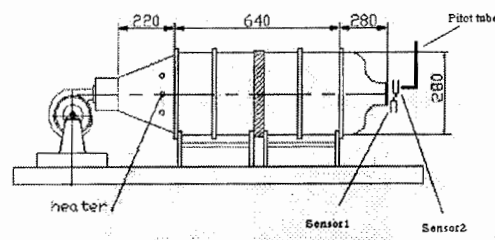
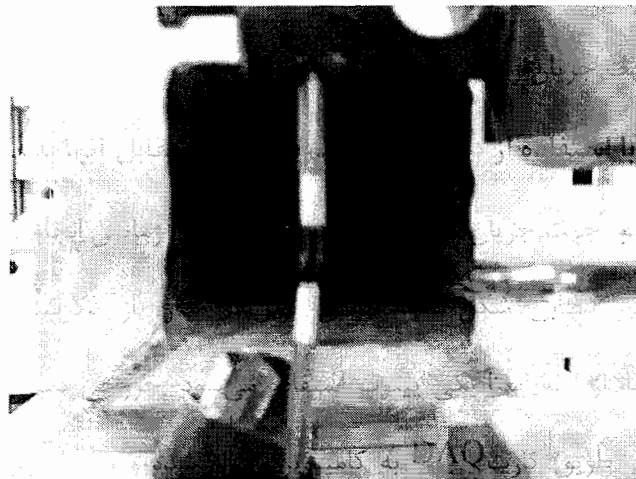
با استفاده از نتایج بدست آمده از این آزمایش می توان کاهش سرعت در ناحیه دنباله را مشخص نمود. و بدین ترتیب جهت جریان را تشخیص داد. هنگامیکه جریان از بالا دست به سمت پایین دست است،

سنسور بالادست مفتول قرار دارد و اندازه‌گیری سرعت بوسیله آن مشکلی نخواهد بود ولی هنگامیکه سنسور پایین‌دست مفتول قرار می‌گیرد سنسور در ناحیه دنباله بوده و سرعت کمتری را نشان می‌دهد و بدین ترتیب می‌توان جهت جریان را اندازه‌گیری کرد.

۵-۱-۲- اندازه‌گیری با استفاده از دو سنسور فیلم‌داغ و اثر متقابل آنها به یکدیگر:

به منظور بررسی تشخیص جهت جریان با استفاده از دو سنسور این آزمایش انجام شده است.

در این آزمایش سنسور مطابق شکل (۳-۵) مقابل تونل‌باد مدار باز ذکر شده قرار می‌دهیم و برای کالیبراسیون سرعت آنها، از لوله استاتیکی پیتوت استفاده می‌شود. خروجی دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ بصورت ولتاژ بوده که از طریق کارت DAQ به کامپیوتر ارسال شده و توسط نرم افزار (Flow Ware) مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در این آزمایش ما نیاز به دو جریان‌سنج سیم‌داغ داریم.



شکل (۳-۵) دو سنسور مقابل تونل‌باد

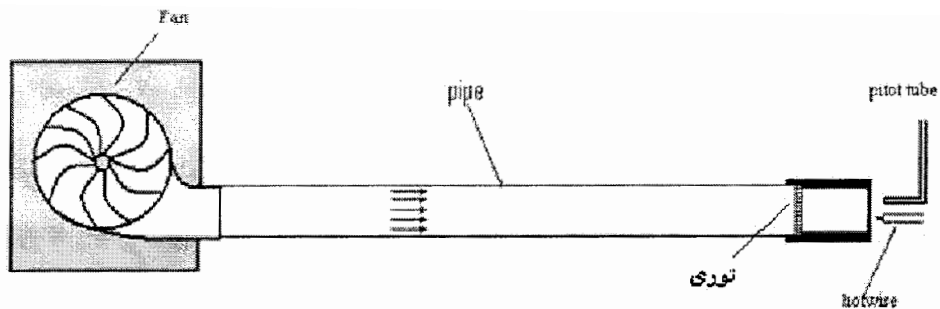
مطابق شکل (۳-۵) دو سنسور را به صورت عمود در راستای جریان قرارمی‌دهیم شاخکهای سنسور جلویی (پایین‌دست) رو به بالا و شاخکهای سنسور پشتی (بالادست) رو به پایین و نزدیک سنسور جلویی می‌باشد. بطوریکه دو سنسور در راستای یکدیگر در جریان قرارگیرند. در این آزمایش سنسور اول ثابت و سنسور دوم را نسبت به اول در جهت‌های مختلف، X (جهت پایین دست جریان) و Y (عمود بر جریان و در راستای پراب) با استفاده از مکانیزم انتقال‌دهنده دقیق، حرکت داده و جریان‌ها را با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ، بوسیله سنسور دوم اندازه‌گیری نموده و در نهایت از طریق کارت DAQ به کامپیوتر ارسال و با استفاده از نرم افزار مورد تجزیه و تحلیل قرارمی‌گیرد. همچنین این آزمایش را در دو موضوع طبقه‌بندی می‌کنیم. لازم به‌ذکر است در این آزمایشها نقطه $y=0$ جایی که مرکز دو سنسور با یکدیگر برابرند مهم می‌باشد. بدین منظور در ابتدا توزیع سرعت را در جهت عمود بر جهت جریان Y رسم کرده و با استفاده از آن می‌توان مرکز سنسور را تشخیص داد (جایی که در جهت Y کمترین سرعت را داریم)، بنابراین نیاز است که با دقت 0.1 میلی‌متر مکانیزم انتقال‌دهنده را حرکت داد.

۵-۱-۳- کاهش غیر یکنواختی جریان هوا با استفاده از توری با مش‌های مختلف :

برای بررسی و تحقیق و انجام آزمایشها، باید بستر آزمایش را آماده‌کنیم. این بستر شامل فن و تونل‌بادی است که باید جریانی با اغتشاشهای کم فراهم‌کنیم. اندازه اغتشاشهای جریان‌ها تاثیر مهمی بر روی نقطه گذرا در روی مدلها دارد. همچنین برای بررسی پدیده‌های فیزیکی از قبیل لایه‌های مرزی آرام، گذرا، پدیده ناپایداری لایه‌های مرزی و ارتباط آن با مشخصات آیرودینامیکی جسم، نیاز به استفاده از تونل‌باد با اغتشاشهای کم است. برای این کار آزمایشی را برای بدست‌آوردن محفظه آرامش مورد نظر انجام دادیم. محفظه آرامش مکانی است که در آن سرعت جریان‌ها به حداقل رسیده و با استفاده از لانه‌زنبوری و توریها انحراف و شدت اغتشاش جریان‌ها کاهش می‌یابد. محفظه آرامش جریان خروجی را از فن دریافت و

شدت اغتشاشهای آنرا کم نموده، سپس تحویل نازل و مقطع آزمون می‌دهد. طول محفظه آرامش حدود ۱/۵ تا ۲ برابر پهنای آن می‌باشد. شبکه لانه‌زنبوری از ورقهای بسیار نازک با مقطع شش ضلعی تشکیل شده‌است. شبکه لانه‌زنبوری جریان را به حالت یک بعدی در آورده و اغتشاشهای جانبی Lateral turbulence را در جریان کاهش می‌دهد. در ضمن لانه‌زنبوریه‌ها اغتشاشهای هوا (ناشی از wake دیواره سلول) را افزایش می‌دهد که در این صورت مکان لانه‌زنبوریه‌ها در محفظه آرامش باید طوری باشد که این اغتشاشها قبل از ورود به نازل کم شود. پهنای متوسط حفره لانه‌زنبوری معمولاً ۱ تا ۲٪ طول محفظه آرامش می‌باشد و طول آنها برابر ۵ تا ۱۰ برابر پهنای سوراخ لانه‌زنبوری میباشد. توریه‌ها معمولاً گردابه‌های بزرگ را به گردابه‌های کوچکتر خرد نموده که در نهایت سبب محو شدن آنها می‌گردد. توری‌ها اغتشاشهای محوری Axial turbulence را در جریان کاهش می‌دهد. معمولاً نوع توری‌ها را با اندازه mesh آن مشخص می‌گردد. (تعداد منافذ در هر اینچ) توری‌ها را معمولاً پس از لانه‌زنبوری قرار می‌دهند. در این قسمت در مورد اثر توری بر کاهش شدت اغتشاشها، کاهش لایه مرزی بحث و بررسی می‌شود. همچنین مکان مناسب قرارگیری سنسور نسبت به توری نیز مشخص می‌شود.

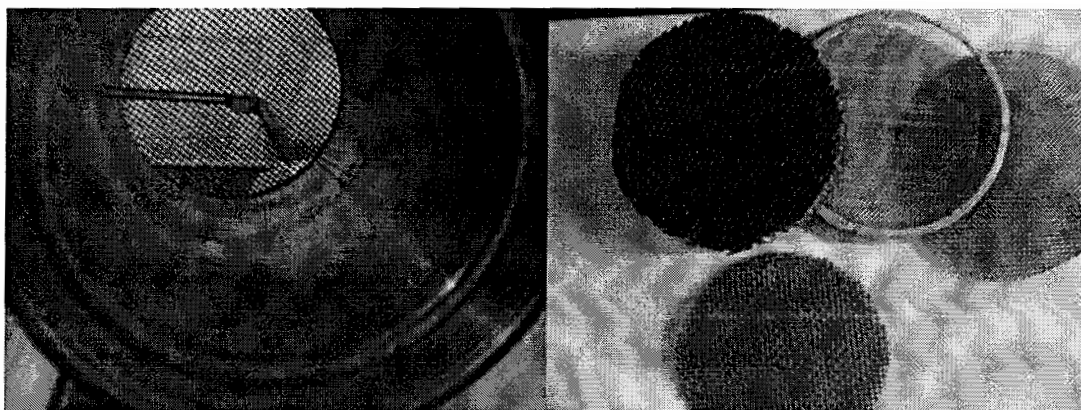
برای انجام آزمایشها مطابق شکل (۴-۵) بستر آزمایش را ایجاد نموده‌ایم. این بستر شامل فن سانتریفیوژ و تونل باد کوچک مدار باز که به فن متصل شده است. با استفاده از یک کنترل دور موتور، سرعت جریان هوا در بستر آزمایش کنترل می‌شود و یک لوله به قطر داخلی ۱۰۰ میلی‌متر؛ لوله طوری طراحی شده است که در داخل آن می‌توان توری با مش‌های مختلف ولانه‌زنبوری نصب نمود. توزیع سرعت جریان هوا و اغتشاشهای آن در داخل لوله را با استفاده از دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ (FlowField) اندازه‌گیری می‌شود.



شکل (۴-۵) بستر آزمایش توری

پراب مورد استفاده در دستگاه جریان سنج سیم‌داغ از نوع لایه‌مرزی یک بعدی است، که سنسور آن از جنس تنگستن است. این پراب به همراه دستگاه جریان سنج سیم‌داغ قبل از انجام آزمایش با استفاده از یک جریان هوای مشخص و لوله استاتیکی پیتوت کالیبره می‌شود. با استفاده از مکانیزم انتقال دهنده، پراب را در نقاط مختلف قرار داده و جریان هوا را اندازه‌گیری می‌کنیم. با اندازه‌گیری جریان هوا، توزیع سرعت و شدت اغتشاشهای آن تعیین می‌شود. داده‌های خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ با استفاده از کارت DAQ به رایانه ارسال و با استفاده از نرم‌افزار (Flow Ware) داده‌ها تبدیل به سرعت و شدت اغتشاشهای جریان هوا می‌شود.

آزمایشها در سرعت‌های 10 m/s و 20 m/s و 30 m/s انجام می‌شود. همچنین در این آزمایشها توری‌هایی با مش‌هایی با ضرایب $\beta = 0.43, 0.46, 0.51$ مورد استفاده قرار می‌گیرد (β نسبت سطح باز به سطح کل).



شکل (۵-۵) توریها با مشهای مختلف بکاررفته در آزمایش

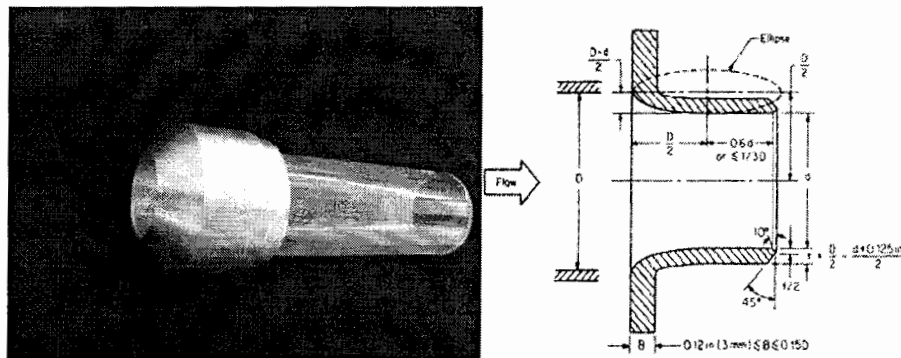
همانطور که بیان شد هدف از این مقاله کاهش شدت اغتشاشها و ضخامت لایه مرزی در تونل باد می باشد. به این علت که اگر جریان مغشوش باشد نمی توان جریان معکوس پشت مفتول را اندازه گیری کرد و جریان مغشوش، اندازه گیری جریان پشت دنباله مفتول و یا صفحه نازک را با مشکل مواجه می کند. همچنین این آزمایش را برای اینکه در دبی سنجها جریان هوا یکنواخت باشد که بتوانیم دبی را اندازه گیری کنیم نیز انجام دادیم.

به همین خاطر آزمایش را در شرایط مختلف نظیر وجود و عدم وجود توری در فواصل مشخص انجام داده و در سرعت های مختلف توزیع سرعت و شدت اغتشاشهای جریان هوا مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

۵-۱-۴- اندازه گیری در داخل نازل:

به منظور بررسی توزیع سرعت در داخل نازل این آزمایش انجام شده است. با توجه به اینکه جریان سنج سیم داغ سرعت لحظه ای را در مکان مشخصی اندازه گیری می کند، در صورتیکه توزیع سرعت یکنواخت باشد با حاصل ضرب سرعت لحظه ای در سطح مقطع در آن مکان دبی

جریان بدست می‌آید. بدین منظور سعی بر آن شده‌است که با استفاده از نازل توزیع سرعت جریان‌ها را یکنواخت کنیم. به همین علت علاوه بر توری سعی بر آن شده است که با استفاده از نازل توزیع سرعت را تا حد مطلوب یکنواخت نمود. بدین منظور نازلی طبق استاندارد ASME طراحی و مطابق شکل (۶-۵) ساخته شد.



شکل (۶-۵) نازل مورد استفاده در این آزمایش

نازل فوق را در مسیر جریان سیال ایجاد شده توسط تونل باد ذکر شده در قسمتهای قبل قرار می‌دهیم. شکل (۷-۵) نحوه نصب نازل را در مقابل تونل باد نشان می‌دهد. مکانیزم انتقال‌دهنده مطابق شکل (۴-۲) می‌باشد و برای کالیبراسیون سرعت آنها، از لوله استاتیکی پیتوت استفاده میشود.

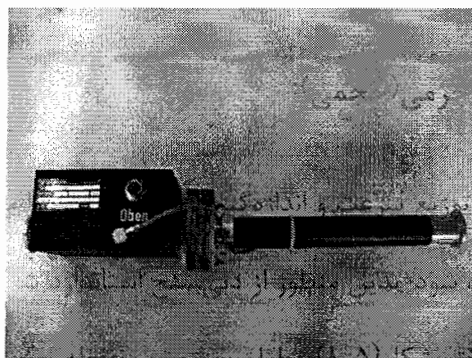


شکل (۷-۵) نحوه نصب نازل را در مقابل تونل باد

سنسور را در جهت Y (عمود بر جهت جریان) در داخل نازل با استفاده از مکانیزم انتقال دهند. پراب حرکت داده و در راستای Y داخل نازل را با استفاده از جریان سنج سیم داغ اندازه‌گیری می‌کنیم:

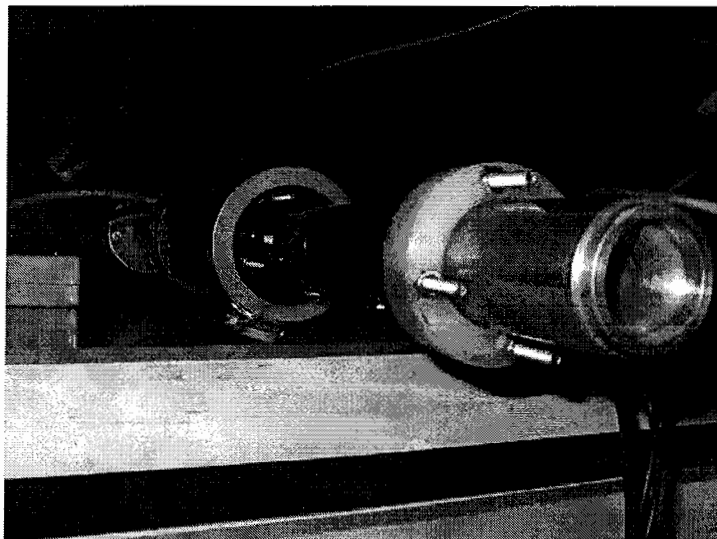
۵-۱-۵- اندازه‌گیری دبی جرمی (جرمی):

به منظور تایید کردن نتایج توزیع سرعت و اندازه‌گیری دبی جریان هوا بهتر است که دبی جریان هوا با استفاده از دبی‌سنج کالیبره شود. بدین منظور از دبی‌سنج استاندارد شرکت (Sensycon) استفاده می‌شود. این دبی‌سنج مطابق شکل (۸-۵) شامل سنسور، محفظه سنسور، لوله و مدار الکترونیکی می‌باشد. در این حالت مطابق شکل (۹-۵) دبی‌سنج را با اسپرومتر و یا دبی‌سنج فوق شرکت (Sensycon) بصورت سری قرارداده و کالیبراسیون انجام می‌گیرد.



شکل (۸-۵) دبی‌سنج

با توجه به خروجی دستگاه فوق که بصورت ولتاژ بوده و بر مبنای دبی جرمی می‌باشد می‌توان دستگاه دبی‌سنج را کالیبره نمود



شکل (۵-۹) دبی سنج را با اسپرومتر بصورت سری

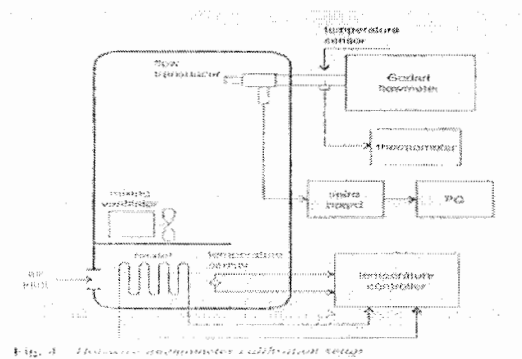
و همچنین توزیع سرعت را نیز تایید نماییم و یا به عبارت دیگر دبی حجمی (جرمی) را بطور دقیق کالیبره نمود.

۵-۱-۶- کالیبره نمودن اسپرومتر:

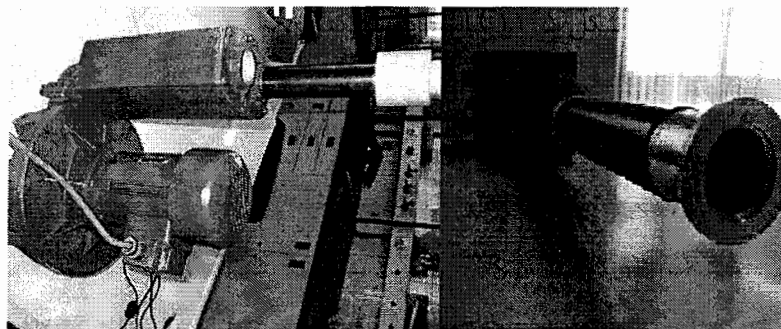
به منظور کالیبره نمودن اسپرومتر با توجه به اینکه دبی جریان دم و بازدم دارای دمای مختلفی است (دمای دم دمای محیط می باشد و دمای بازدم دمای ۳۷ سانتیگراد دمای بدن است) بنابراین نیاز به دستگاه کالیبراتور می باشد که با استفاده از آن بتوان اسپرومتر را در دماهای مختلف کالیبره کرد.

شکل (۵-۱۰) دستگاه کالیبراتور اسپرومتر را نشان می دهد. این دستگاه کالیبراتور دارای ابعاد ۱۲۰×۵۰×۵۰ سانتیمتر می باشد. جریان هوا از قسمت پایین آن وارد مخزن شده و با استفاده از گرمکن دمای جریان هوا بطور کنترل شده ای گرم می شود. جریان هوا از قسمت فوقانی مخزن خارج شده و از آنجا وارد دبی سنج می شود و از طریق دبی سنج وارد اسپرومتر از نوع سیم داغ می شود.

استفاده از دبی سنج می توان دبی حجمی جریانها را اندازه گیری و در نتیجه اسپرومتر را کالیبره نمود. همچنین به علت افت زیادی که در مخزن، اسپرومتر و دبی سنج که بطور سری به هم متصل هستند وجود دارد برای تامین جریان هوا نمی توانیم از فن سانتریفیوژ استفاده کنیم. به همین علت ما از فن فشار (Blower) مطابق شکل (۱۱-۵) استفاده می کنیم.



شکل (۱۰-۵) دستگاه کالیبراتور اسپرومتر



شکل (۱۱-۵) فن فشار (Blower)

۵-۲- بررسی و تجزیه تحلیل آزمایشها

۵-۲-۱- جریان پایین دست مفتول:

برای بررسی اثر مفتول در پایین دست جریان هوا و به منظور مشخص نمودن ناحیه دنباله و جدایش و گردابه‌های ایجاد شده آزمایشهای زیر انجام شده است. ناحیه دنباله هرچه قدر بزرگتر و دارای شدت اغتشاشهای کمتر باشد برای اندازه‌گیری جریان معکوس بهتر خواهد بود. همچنین اگر فرکانس شدت اغتشاشها معلوم باشد می‌توان در آن ناحیه کالیبراسیون جریان سنج سیم‌داغ را با روش گردابه‌های کارمن (Karman Vortex) انجام داد. بنابراین مفتول‌ها با قطرهای مختلف مورد استفاده در آزمایش طبق جدول زیر و سرعتها و اعداد رینولدز مشخص شده است.

جدول (۱-۵) اعداد رینولدز مورد استفاده در آزمایش

| D(mm) \ U(m/s) | 0.6 | 1 | 1.5 | 2 | 2.2 |
|----------------|-----|------|------|------|------|
| 5 | 200 | 333 | 500 | 666 | 733 |
| 10 | 400 | 666 | 1000 | 1333 | 1466 |
| 15 | 600 | 1000 | 1500 | 2000 | 2200 |
| 20 | 800 | 1333 | 2000 | 2666 | 2933 |

با توجه به مرجع (Sumer1997) در جریان پایین دست مفتول، دنباله ایجاد می شود و این دنباله سرعت جریان هوا به مقدار قابل توجهی کمتر از سرعت جریان آزاد می باشد. به منظور بررسی جریان پایین دست مفتول سرعت لحظه ای جریان با استفاده از جریان سنج سیم داغ اندازه گیری شده و با متوسط گیری سرعت لحظه ای می توان سرعت متوسط جریان و با مشخص نمودن اختلاف سرعت لحظه ای از سرعت متوسط می توان شدت اغتشاشات جریان هوا را اندازه گیری نمود. همچنین با استفاده از تبدیلات فوریه از سرعت لحظه ای فرکانس گردابه های جریان مشخص می شود.

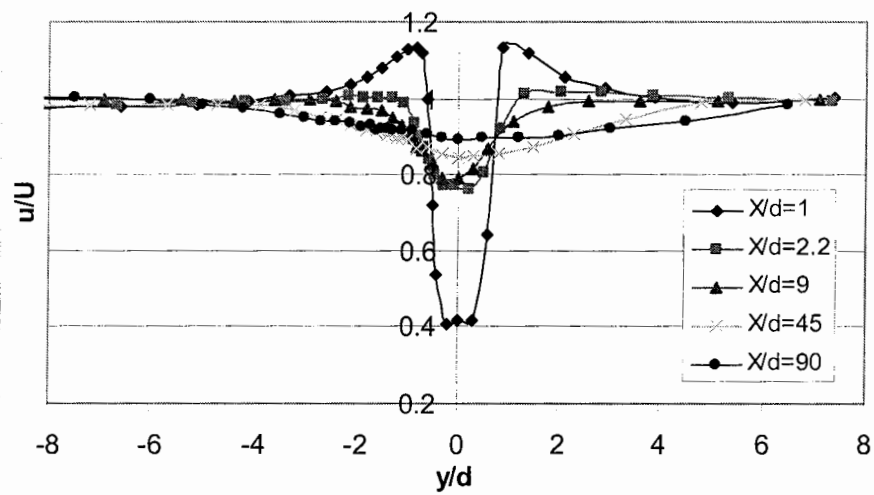
۵-۲-۱-۱- سرعت متوسط:

شکل (۱۲-۵) سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=1 \text{ mm}$ در سرعت $U=5 \text{ m/s}$ را نشان می دهد. محور افقی در جهت عمود بر جریان هوا می باشد که با استفاده از قطر مفتول بی بعد شده است.

همانطور که در شکل نشان داده شده است در نقاط نزدیک به مفتول ناحیه دنباله بزرگتر و با افزایش فاصله از مفتول این ناحیه کوچکتر می‌شود.

همانطور که در شکل (۵-۱۲) نشان داده شده در نزدیکی مفتول $X/D = 1$ در ناحیه دنباله سرعت به میزان $u/U = 0.4$ کاهش می‌یابد و با افزایش X/D این کاهش کمتر شده بطوریکه در فاصله $X/D = 90$ این کاهش به مقدار $u/U = 0.9$ می‌رسد.

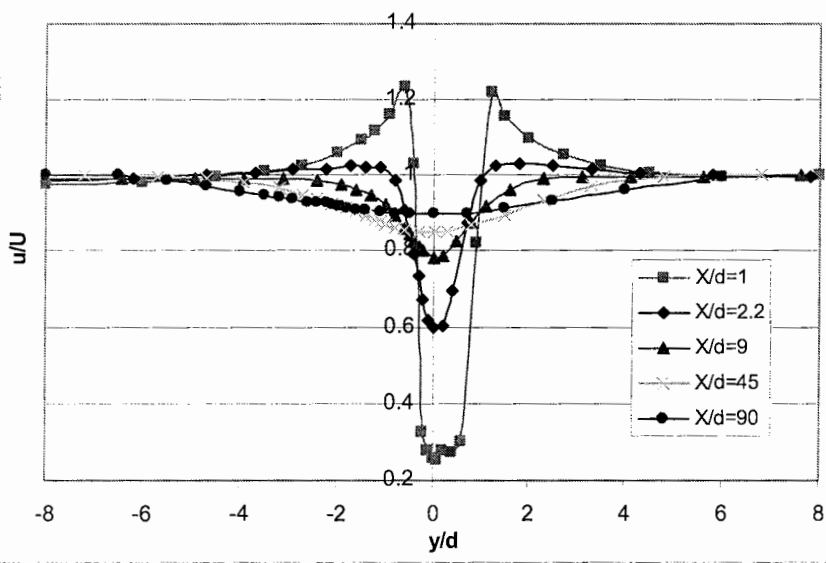
همانطور که در شکل نشان داده شده است، در نزدیکی مفتول تغییرات سرعت با افزایش پایین دست شدید می‌باشد. بطوریکه در $X/D = 1$ مقدار $u/U = 0.4$ و در پایین دست $X/D = 2/2$ این مقدار به $u/U = 0.76$ افزایش یافته است. هنگامیکه X/D بزرگتر از $2/2$ می‌شود تغییرات u/U در ناحیه دنباله کمتر می‌شود. همچنین شکل فوق نشان می‌دهد که سرعت متوسط جریان در $X/D = 1$ به اندازه 11% در نزدیکی دنباله افزایش یافته است و یا به عبارت دیگر جریان هوا بیشتر از جریان آزاد می‌باشد. این مساله را می‌توان با در نظر گرفتن حجم کنترل در اطراف مفتول و نوشتن قانون پیوستگی توجیه نمود. با توجه به شکل می‌توان تشخیص داد که برای کالیبراسیون جریان سنج سیم‌داغ از روش گردابه‌های کارمن (Karman Vortex) (رجوع شود به فصل ۴) نمی‌توان پر اب را در نزدیکی $X/D = 1$ قرارداد زیرا در آن نقطه افزایش سرعت (over flow) وجود دارد و باید در فاصله بیشتر از $X/D = 2/2$ قراردسیم.



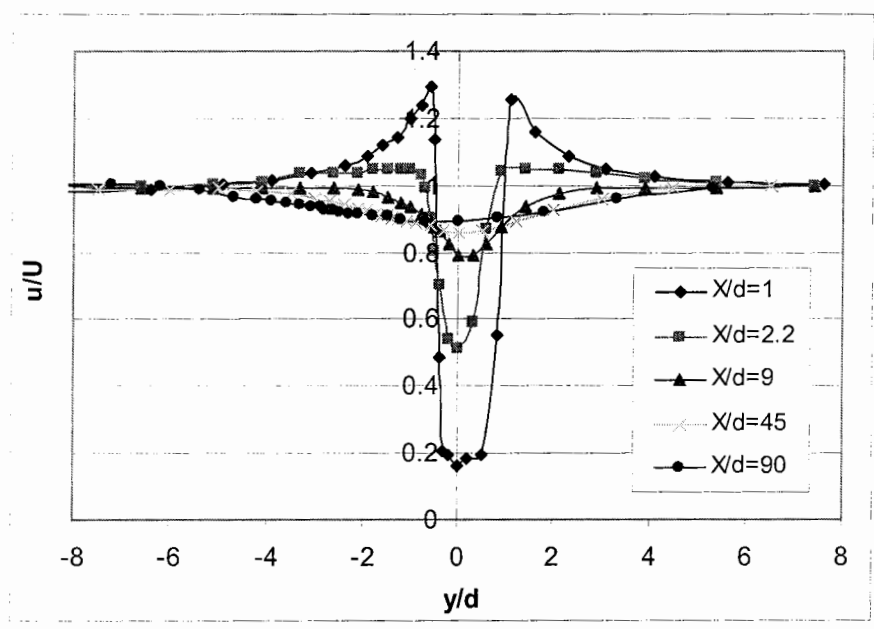
شکل (۱۲-۵) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=1\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$

شکل‌های (۱۳-۵) و (۱۴-۵) و (۱۵-۵) سرعت متوسط جریان هوا را پایین دست مفتول با قطر $D=1\text{mm}$ به ترتیب در سرعت‌های $U=10\text{m/s}$ و $U=15\text{m/s}$ و $U=20\text{m/s}$ نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل‌ها نشان داده شده است جریان پایین دست مفتول مشابه شکل (۱۲-۵) می‌باشد. همانطور که شکل‌ها نشان می‌دهد جریان پایین دست مفتول دارای ناحیه دنباله و (over flow) می‌باشد.

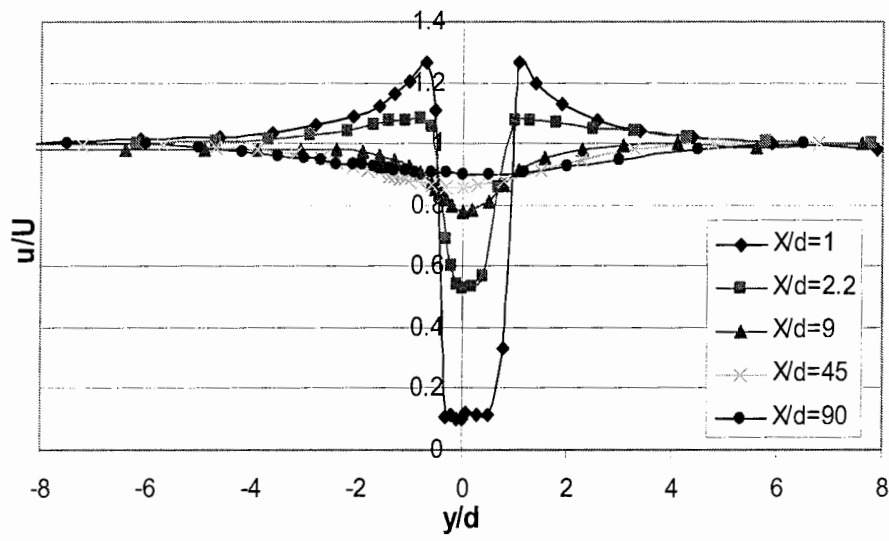
مقدار سرعت $\frac{u}{U}$ در ناحیه دنباله با افزایش سرعت جریان آزاد U کاهش می‌یابد و همچنین مقدار (over flow) نیز با افزایش سرعت جریان آزاد U افزایش می‌یابد.



شکل (۵-۱۳) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=1\text{mm}$ در سرعت $U=10\text{m/s}$

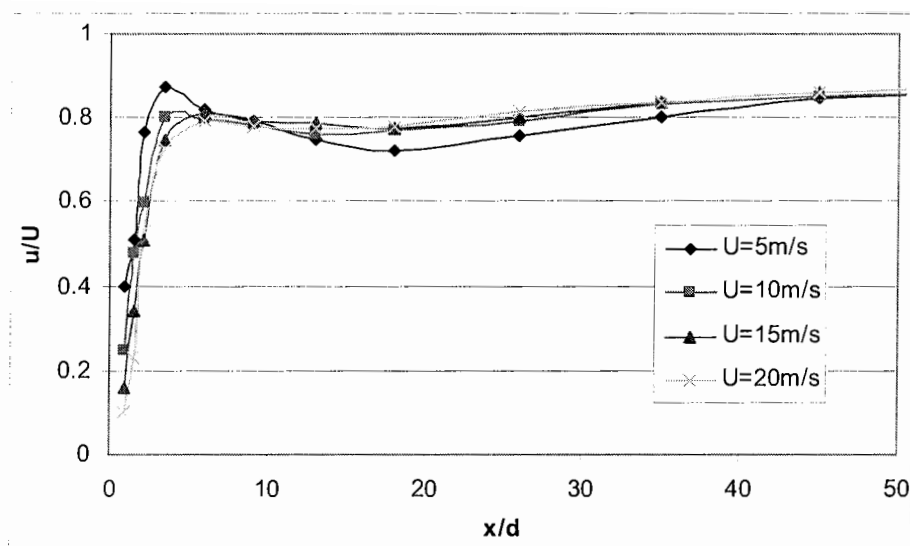


شکل (۵-۱۴) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=1\text{mm}$ در سرعت $U=15\text{m/s}$



شکل (۵-۱۵) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=1\text{mm}$ در سرعت $U=20\text{m/s}$

به منظور بررسی بهتر در ناحیه دنباله شکل (۵-۱۶) کمترین سرعت در ناحیه دنباله را بر حسب X/D نشان داده شده است. تغییرات سرعت در ناحیه دنباله نزدیک مفتول بسیار شدید بوده، بطوریکه این تغییرات در حد فاصل خط $1.5 < X/D < 3.5$ در ناحیه دنباله u/U از 0.4 به 0.8 می‌رسد.



شکل (۱۶-۵) توزیع کمترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول به قطر $D=1\text{mm}$

بنابراین برای استفاده از ناحیه دنباله برای تشخیص جریان معکوس بهتر است که سنسورها در حد فاصل

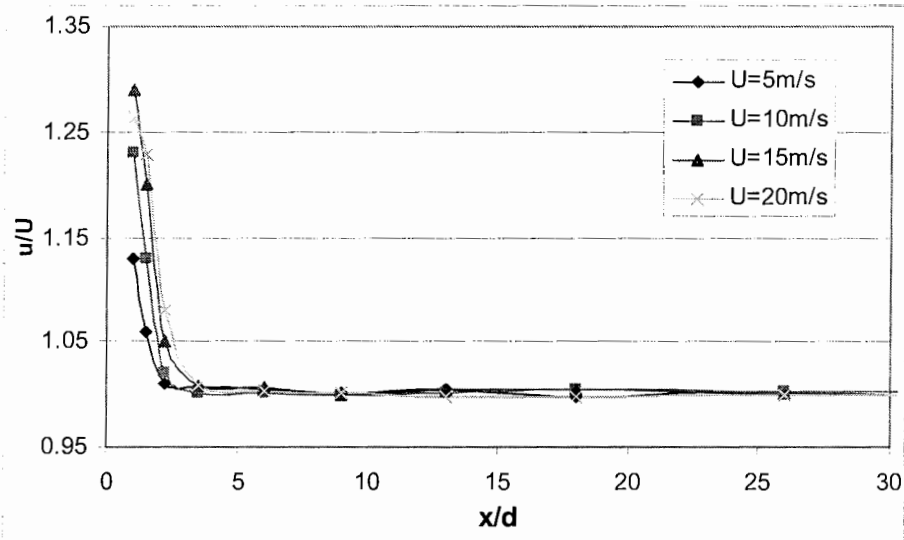
کمتر از $3 < X/D$ قرار گیرند تا تشخیص جهت جریان به راحتی انجام گیرد.

در شکل فوق همچنین نشان می‌دهد که سرعت u/U در ناحیه $3.5 < X/D < 13.3$ ، مقداری کاهش می‌یابد

که علت آن دقیق معلوم نیست که موضوع مناسبی برای برای تحقیق می‌باشد.

همچنین تحذب موجود در منحنی با افزایش سرعت کاهش یافته است.

شکل (۱۷-۵) مقدار سرعت (over flow) و نقاطی که دارای بیشترین سرعت هستند را بررسی می‌کند.



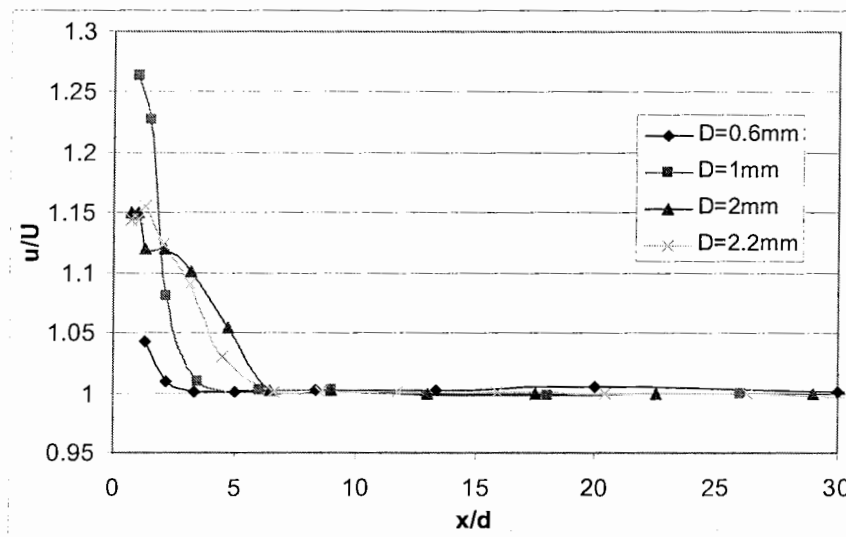
شکل (۵-۱۷) توزیع بیشترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول به قطر $D=1\text{mm}$ در سرعت‌های مختلف

همانطور که در شکل نشان داده شده است در $X/D < 3.5$ ما دارای over flow هستیم و با افزایش X/D ، در سرعت‌های مختلف مشاهده نمی‌شود. بنابراین با توجه به منحنی فوق می‌توان نتیجه گرفت برای کالیبراسیون از روش گردابه‌های کارمن (Karman Vortex) نباید سنسور را در $X/D < 3.5$ قرار داد بنابراین سرعت اندازه‌گیری شده حدود ۲۰٪ بیشتر می‌باشد. با توجه به شکل‌های فوق می‌توان دریافت که مقدار (over flow) با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. بطوریکه در $U=5\text{m/s}$ برای مفتول $D=1\text{mm}$ حدود مقدار (over flow) ۱۳٪ سرعت جریان آزاد می‌باشد و این مقدار برای سرعت $U=10\text{m/s}$ حدود ۲۴٪ سرعت جریان آزاد و برای سرعت $U=15\text{m/s}$ حدود ۳۰٪ سرعت جریان آزاد می‌باشد.

شکل‌های (۱) تا (۱۴) پیوست سرعت متوسط جریان هوا را در اطراف مفتول به قطرهای $D=0.1, 0.6, 2, 5, 20 \text{ mm}$ در سرعت‌های $U=5 \text{ m/s}$ و $U=10 \text{ m/s}$ و $U=15 \text{ m/s}$ و $U=20 \text{ m/s}$ نشان می‌دهد. روند کلی داده‌ها در کلیه اشکال شبیه هم می‌باشد.

شکل (۵-۱۸) بیشترین سرعت (over flow) پایین دست مفتول را بر حسب X/D برای سرعت $U=20 \text{ m/s}$ و مفتول‌هایی با قطرهای 0.6 و 1 و 1.5 و 2 و 2.2 میلی‌متر نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است این (over flow) با افزایش قطر افزایش می‌یابد.

این افزایش خیلی قابل توجه نمی‌باشد، هنگامیکه $X/D > 5$ می‌باشد overflow تقریباً ناچیزی باشد. بنابراین برای کالیبراسیون جریان سنج سیم‌داغ با استفاده از گردابه‌های کارمن (Karman Vortex) مقدار $X/D > 7$ باشد.



شکل (۵-۱۸) توزیع بیشترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=20 \text{ m/s}$

شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) پیوست مقدار جریان هوا (over flow) را برای مفتول با قطرهای ذکر شده در سرعت‌های $U=5 \text{ m/s}$ و $U=10 \text{ m/s}$ و $U=15 \text{ m/s}$ و $U=20 \text{ m/s}$ را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های فوق تاثیر سرعت در مکانی که **over flow** ناچیز می‌باشد خیلی زیاد نمی‌باشد بنابراین با توجه به قطر مفتول هنگامیکه $X/D > 5$ باشد می‌توان پراب جریان‌سنج سیم‌داغ را برای کالیبراسیون با استفاده از گردابه‌های کارمن (Karman Vortex) بکار برد.

شکل (۵-۱۹) تغییرات کمترین سرعت در ناحیه دنباله پایین‌دست مفتول‌های ذکر شده که بر حسب جریان آزاد بی‌بعد شده است در سرعت $U = 15 \text{ m/s}$ نشان می‌دهد. در نزدیکی مفتول مقدار سرعت محلی

$\frac{u}{U}$ خیلی کم می‌باشد که این مقدار بستگی به قطر مفتول دارد که با افزایش قطر مفتول مقدار $\frac{u}{U}$ کمتر

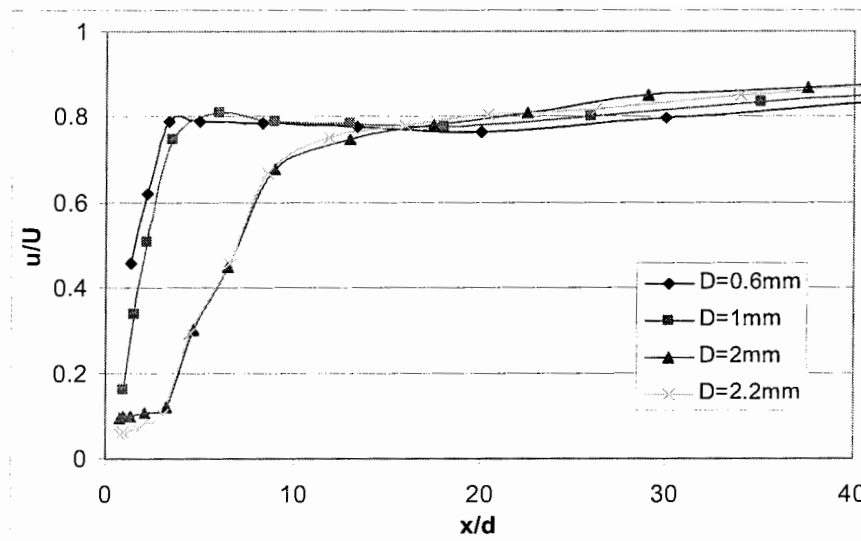
شده بطوریکه برای مفتول به قطر $D = 2 \text{ mm}$ حدود $\frac{u}{U} = 0.1$ می‌باشد. این در حالی است که برای قطر

$D = 0.6 \text{ mm}$ این مقدار $\frac{u}{U} = 0.45$ می‌باشد. با افزایش X/D ، سرعت $\frac{u}{U}$ سریعاً با شیب تندتری

افزایش می‌یابد بنابراین برای اندازه‌گیری جریان معکوس بهتر است که از مفتولی با قطر بالاتر استفاده شود

و همچنین سنسور را در نزدیکی مفتول در $X/D < 4$ قرار دارد.

منحنی فوق نشان می‌دهد که همخوانی خوبی بین داده‌های مختلف برای قطرهای مختلف وجود دارد.



شکل (۱۹-۵) توزیع کمترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=15\text{m/s}$

شکل (۱۸) و (۱۹) و (۲۰) پیوست کمترین سرعت در ناحیه دنباله در پایین دست مفتول برای قطرهای

مختلف به ترتیب در سرعتهای $U=5\text{m/s}$ و $U=10\text{m/s}$ و $U=15\text{m/s}$ و $U=20\text{m/s}$ را نشان می‌دهد.

با توجه به شکلهای فوق می‌توان دریافت که شیب افزایش کمترین سرعت محلی در ناحیه دنباله با

افزایش X/D برای مفتولهای با قطر کمتر بیشتر می‌باشد. بطوری که برای سرعت $U=10\text{m/s}$ برای مفتول

به قطر $D=0.6\text{mm}$ سرعت در ناحیه دنباله در فاصله $X/D=5$ به مقدار $\frac{u}{U}=0.18$ افزایش یافته این در

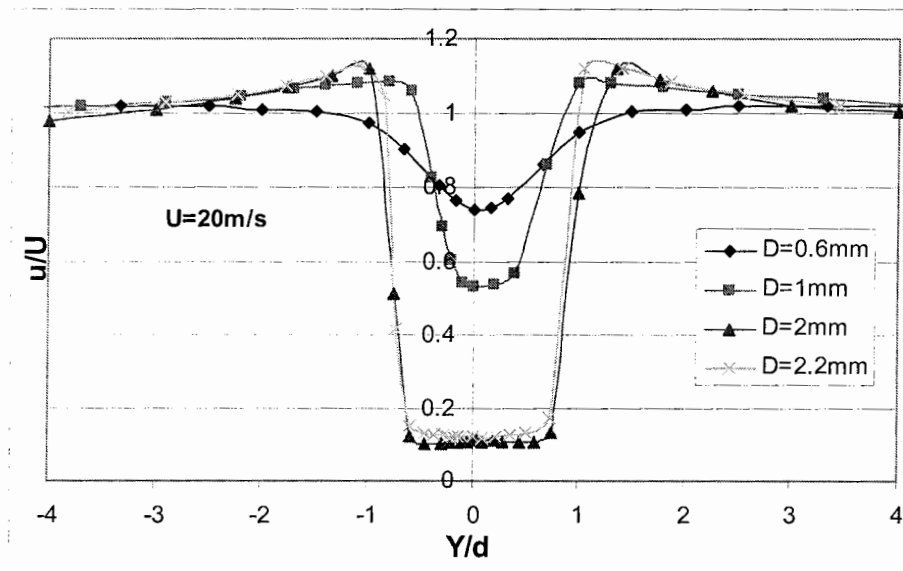
حالی است که برای مفتول به قطر $D=2\text{mm}$ در ناحیه $X/D=20$ می‌باشد. همچنین در سرعتهای

$U=15\text{m/s}$ و $U=20\text{m/s}$ این پدیده مشاهده می‌شود، بنابراین هر چه قطر بزرگتر باشد برای

جریان معکوس مناسب خواهد بود. ولی برای افزایش قطر نیز ما دارای محدودیت هستیم چون افزایش قطر

سبب انسداد جریان می‌شود.

شکل (۲۰-۵) تغییرات سرعت بر حسب Y/D پایین دست مفتول را در فاصله $X/D=2$ در سرعت $U=20\text{ m/s}$ برای مفتولهایی با قطرهای ذکر شده را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل نشان داده شد، ناحیه دنباله با افزایش قطر مفتول افزایش می‌یابد و همچنین سرعت محلی در ناحیه دنباله $Y/D=0$ نیز با افزایش قطر کاهش می‌یابد.



شکل (۲۰-۵) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D=2$ پایین دست مفتولهایی با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=20\text{ m/s}$

شکل‌های (۲۱) تا (۳۵) پیوست سرعت پایین دست مفتول را بر حسب Y/D در $X/D=1$ و $X/D=1.3$ و $X/D=2$ و $X/D=3.3$ سرعت‌های $U=5\text{ m/s}$ و $U=10\text{ m/s}$ و $U=15\text{ m/s}$ و $U=20\text{ m/s}$ را نشان می‌دهد. شکل‌های فوق نیز مشابه شکل (۹-۵) پدیده فیزیکی فوق بیان می‌کند.

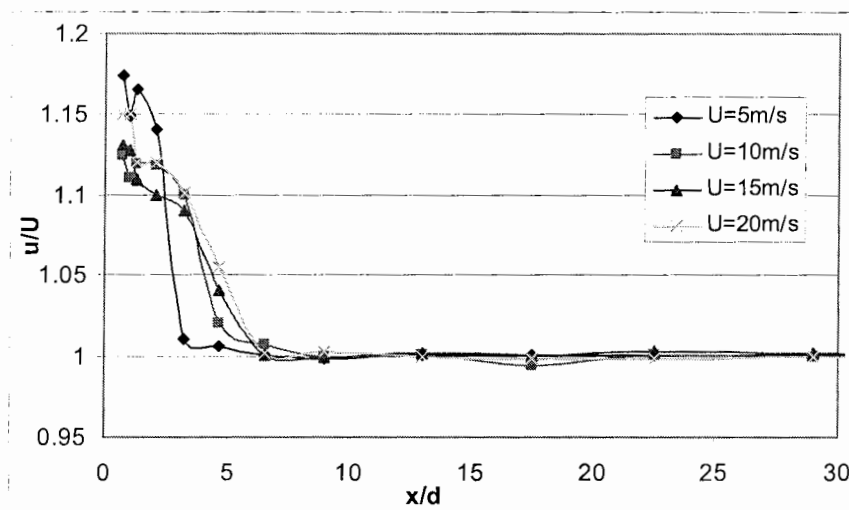
در $X/D=1$ با افزایش سرعت از $U=15\text{ m/s}$ به $U=20\text{ m/s}$ این ناحیه آنچنان تغییری ندارد.

با توجه به شکلهای فوق می‌توان دریافت که در فاصله $X/D = 1/3$ سرعت $\frac{u}{U}$ در ناحیه دنباله برای مفتولهایی با قطر کمتر، بیشتر می‌باشد.

لازم به ذکر است گرچه منحنی‌های فوق بر مبنای X/D و Y/D بی‌بعد شده‌اند ولی دارای اعداد رینولدز مختلف می‌باشند بطوریکه برای سرعت $U = 10 \text{ m/s}$ عدد رینولدز برای قطر $D = 2.2 \text{ mm}$ ، برابر $Re = 1466$ و برای قطر $D = 0.6 \text{ mm}$ برابر $Re = 400$ می‌باشد.

با توجه به شکلهای قبل مفتول با قطر $D = 2 \text{ mm}$ برای اندازه‌گیری جریان معکوس به علت دنباله قوی آن مناسب می‌باشد.

شکل (۵-۲۱) مقدار بیشترین سرعت (over flow) را در پایین دست مفتول برای قطر $D = 2 \text{ mm}$ به ترتیب برای سرعتهای $U = 5 \text{ m/s}$ و $U = 10 \text{ m/s}$ و $U = 15 \text{ m/s}$ و $U = 20 \text{ m/s}$ نشان می‌دهد.



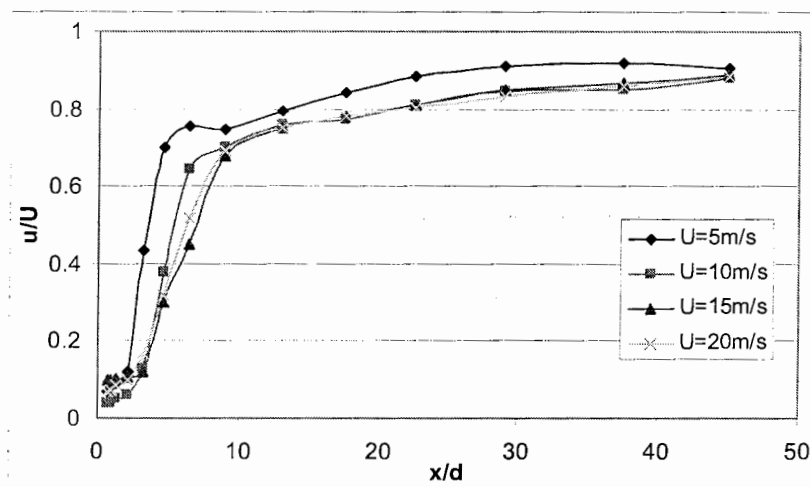
شکل (۵-۲۱) توزیع بیشترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول به قطر $D = 2 \text{ mm}$ در سرعتهای مختلف

شکل‌های (۳۶) تا (۳۸) پیوست مقدار بیشترین سرعت (over flow) را در پایین دست مفتولها با قطرهای مختلف در سرعت‌های ذکر شده را نشان می‌دهد.

هنگامیکه قطر مفتول $D=0.6\text{mm}$ می‌باشد over flow تقریباً در یک X/D ثابت به پایان می‌رسد، سرعت و فواصل X/D تأثیری بر مقدار over flow ندارد.

در مفتول با قطر $D=1/5\text{mm}$ نیز چنین چیزی مشاهده می‌شود ولی وقتی $D=2\text{mm}$ می‌باشد مقدار over flow و فاصله آن از مفتول X/D بستگی به سرعت داشته که با افزایش سرعت مقدار over flow در فاصله X/D های بالاتر از مفتول از بین می‌رود. بنابراین هنگام استفاده از مفتول به قطر $D=2\text{mm}$ به بالا برای کالیبراسیون جریان سنج سیم‌داغ به روش گردابه‌های کارمن (Karman Vortex) نیاز است که $X/D > 8$ انتخاب نماییم تا اینکه over flow در آن ناحیه اتفاق نیفتد و همچنین افزایش سرعت برای کالیبراسیون نداشته باشیم.

شکل‌های (۵-۲۲) مقدار کمترین سرعت در ناحیه دنباله پایین دست مفتول با قطر $D=2\text{mm}$ به ترتیب در ۴ سرعت $U=5\text{m/s}$ و $U=10\text{m/s}$ و $U=15\text{m/s}$ و $U=20\text{m/s}$ نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲۲) توزیع کمترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول به قطر $D=2\text{mm}$ در سرعت‌های مختلف

شکل‌های (۳۹) تا (۴۱) مقدار کمترین سرعت در ناحیه دنباله پایین دست مفتول با قطرهای ذکر شده به

ترتیب در ۴ سرعت $U=5\text{ m/s}$ و $U=10\text{ m/s}$ و $U=15\text{ m/s}$ و $U=20\text{ m/s}$ نشان می‌دهد.

هنگامیکه قطر مفتول $D=2\text{ mm}$ می‌باشد در نزدیکی مفتول مقدار سرعت محلی $\frac{u}{U}$ خیلی کم است،

بطوریکه در شکلها مشاهده می‌کنید این مقدار در نزدیکی مفتولها با افزایش قطر کم می‌شود بطوریکه

مفتول به قطر $D=2\text{ mm}$ در سرعت $U=10\text{ m/s}$ ، $\frac{u}{U} = 0.04$ می‌باشد در حالی که برای مفتول با قطر

$D=0.6\text{ mm}$ این مقدار حدود $\frac{u}{U} = 0.4$ می‌باشد با افزایش X/D ، مقدار $\frac{u}{U}$ سریعاً با شیب تندی افزایش

می‌یابد، بنابراین برای اندازه‌گیری جریان معکوس بهتر است از مفتولی با قطر بالاتر استفاده شود.

همچنین سنسور را در نزدیکی مفتول قرار می‌دهیم. فاصله آن از مفتول تقریباً بستگی به قطر مفتول و

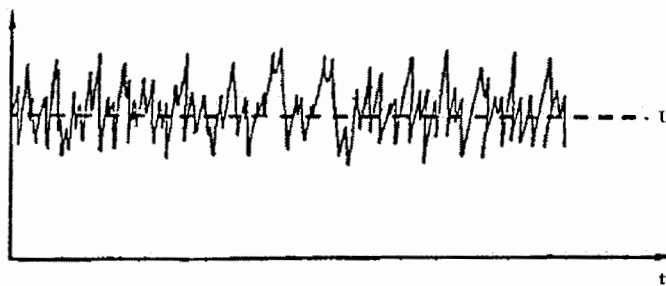
سرعت جریان هوا دارد. بطور مثال برای مفتول به قطر $D=0.6\text{ mm}$ باید $X/D < 1/33$ باشد که برای

سرعت‌های مختلف این فاصله صادق است. ولی برای مفتول به قطر $D=2\text{ mm}$ این فاصله تا $X/D < 6$

می‌تواند باشد.

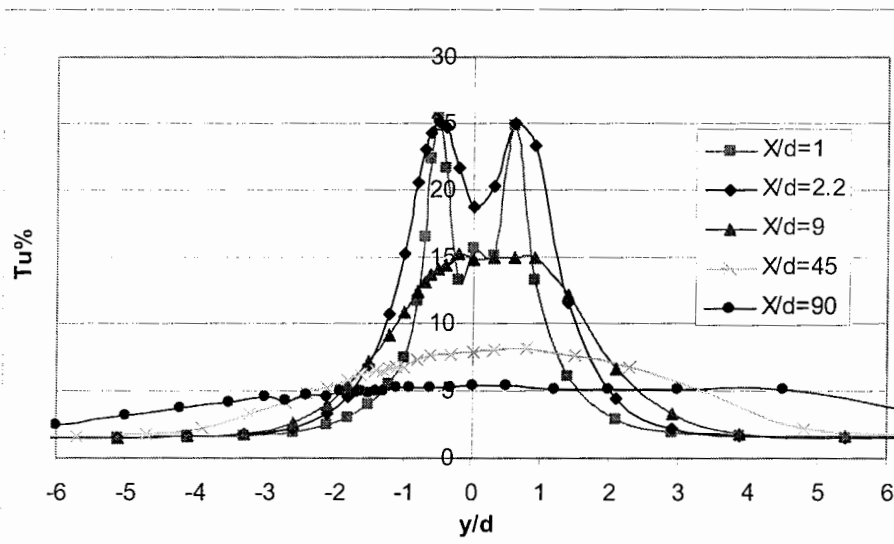
۵-۲-۱-۲-۲- شدت اغتشاشها:

با توجه به مرجع (H.H.Bruun) در صورتیکه شدت اغتشاشهای جریان هوا بالا باشد اندازه‌گیری جریان معکوس با استفاده از روش دو سنسور فیلم‌داغ امکان پذیر نمی‌باشد و دارای مشکلاتی است. در صورتیکه شدت اغتشاشها بیشتر از $Tu > 10\%$ باشد در اندازه‌گیری سرعت جریان هوا خطا خواهیم داشت. همچنین اگر فرکانس این اغتشاشها نیز بالا باشد نیاز است که دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ در فرکانسهای بالا کار کند که خود دارای مشکلاتی می‌باشد. به همین علت در اغتشاشها در پایین دست مفتول مورد بررسی قرار می‌گیرد. شدت اغتشاشها $Tu\%$ می‌باشد که مقدار انحراف معیار سرعت لحظه‌ای از سرعت متوسط بوده که با توجه به سرعت جریان آزاد بی‌بعد کرده‌ایم و بصورت درصد بیان می‌شود.



$$Tu = \frac{(\overline{u^2})^{1/2}}{\overline{U}} * 100$$

شکل (۵-۲۳) توزیع شدت اغتشاشهای پایین دست مفتولی به قطر $D=1\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$ نشان می‌دهد. محور Xها در شکل، فاصل از مرکز مفتول در جهت عمود بر جریان هوا می‌باشد که با استفاده از قطر مفتول آن را بی‌بعد کرده‌ایم. محور Yها همان درصد اغتشاشها $Tu\%$ می‌باشد.



شکل (۵-۲۳) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=1\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$

در شکل (۵-۲۳) تغییرات این شدت اغتشاشها را در پایین دست مفتول در فاصله‌های $X/D=1$ ، $X/D=2/2$ ، $X/D=9$ ، $X/D=45$ و $X/D=90$ نشان می‌دهد. در فاصله $X/D=1$ و $X/D=2/2$ یعنی در نزدیکی مفتول شدت اغتشاشها بالا بوده و حدود ۲۵٪ می‌باشد. لازم به ذکر است اغتشاشها در این ناحیه دارای دو نقطه ماکزیمم و این نقاط در فاصله $0.6 < Y/D < 0.6$ می‌باشد و تقریباً همان نقاطی است که ما دارای over flow هستیم و هنگامیکه $Y/D=0$ می‌شود این مقدار از ۲۵٪ به ۱۸٪ کاهش می‌یابد. با افزایش پایین دست این مقدار در دنباله از بین رفته و شدت اغتشاشها بصورت یک تک قله درمی‌آید و مقدار آن نیز کاهش می‌یابد.

هنگامیکه $X/D=45$ می‌شود این مقدار به کمتر از ۸٪ $Tu=8\%$ رسید و در $X/D=90$ برابر $Tu=5\%$ خواهد بود به عبارت دیگر اغتشاشها در پایین دست مفتول دمپ (میرا) می‌شود.

شکل (۴۲) تا (۴۴) پیوست نیز توزیع شدت اغتشاشهای پایین دست مفتول به قطر $D=1\text{mm}$ در سرعتهای

$$U=10\text{ m/s} \text{ و } U=15\text{ m/s} \text{ و } U=20\text{ m/s} \text{ نشان می دهد.}$$

میزان شدت اغتشاشها هنگامیکه $U=10\text{ m/s}$ در $X/D = 2/2$ بیشترین مقدار اغتشاشها حدود $Tu=25\%$

است و این مقدار با افزایش سرعت از $U=10\text{ m/s}$ به $U=20\text{ m/s}$ حدود 15% افزایش پیدا می کند.

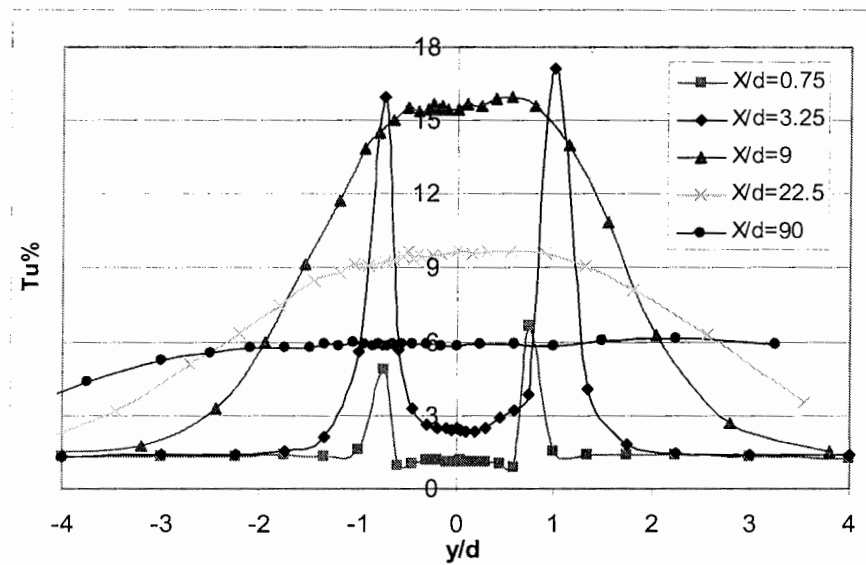
شکلهای فوق نشان می دهد که در نزدیکی مفتول $X/D = 1$ با افزایش سرعت مقدار شدت اغتشاشها

کاهش می یابد. در شکلهای (۴۲) تا (۴۴) پیوست نشان می دهد که در $X/D = 9$ قله از بین رفته و بصورت

یک نقطه ماکزیمم در می آید. روند نمودارهای فوق علیرغم تغییرات آن مشابه می باشد.

شکل (۲۴-۵) توزیع شدت اغتشاشهای جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=2\text{mm}$ در سرعتهای

$$U=15\text{ m/s} \text{ را نشان می دهد.}$$



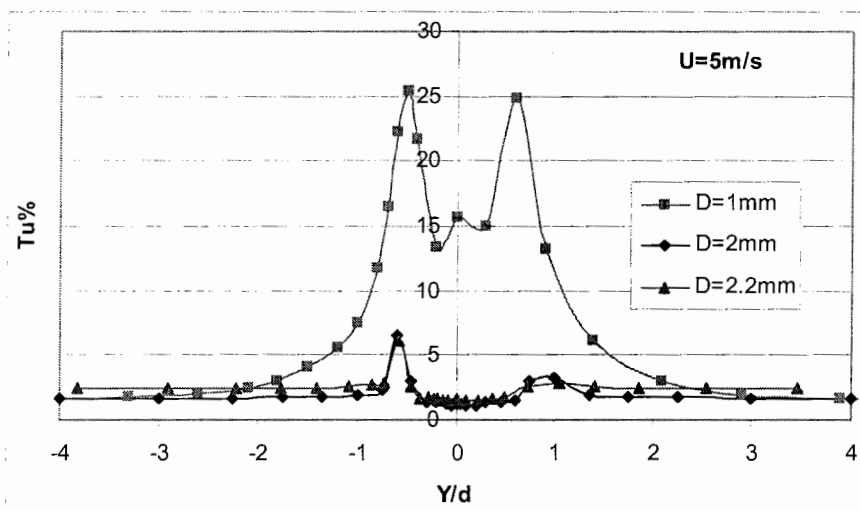
شکل (۲۴-۵) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=2\text{mm}$ در سرعت $U=15\text{m/s}$

با توجه به شکل (۵-۲۴) در $X/D = 3/25$ ما دارای دو نقطه ماکزیمم هستیم و با افزایش پایین دست از بین می‌رود. در سرعت $U = 10 \text{ m/s}$ در $X/D = 9$ این نقطه‌ها بزرگتر می‌شود در سرعت $U = 15 \text{ m/s}$ در فاصله $X/D = 9$ این دو نقطه ماکزیمم از بین می‌رود و به یک نقطه ماکزیمم تبدیل می‌شود.

شکل (۴۲) تا (۵۷) پیوست توزیع شدت اغتشاشهای جریان هوا پایین دست مفتول به قطرهای مختلف در سرعت‌های $U = 5 \text{ m/s}$ و $U = 10 \text{ m/s}$ و $U = 15 \text{ m/s}$ و $U = 20 \text{ m/s}$ را نشان می‌دهد.

روند شکل‌های فوق و پیوست نیز مانند شکل‌های قبل می‌باشد. در نزدیکی مفتول در کلیه سرعتها مقدار شدت اغتشاشها کم می‌باشد. در $2 < X/D < 4.5$ ما در کلیه سرعتها دارای دو نقطه ماکزیمم هستیم و با افزایش سرعت شدت اغتشاشهای این دو نقطه کاهش پیدا می‌کند.

شکل‌های (۵-۲۵) تغییرات شدت اغتشاشهای پایین دست مفتولها را در فاصله $X/D = 1$ از مرکز مفتول در $U = 5 \text{ m/s}$ نشان می‌دهد. فاصله با استفاده از قطر مفتول بی‌بعد شده است.



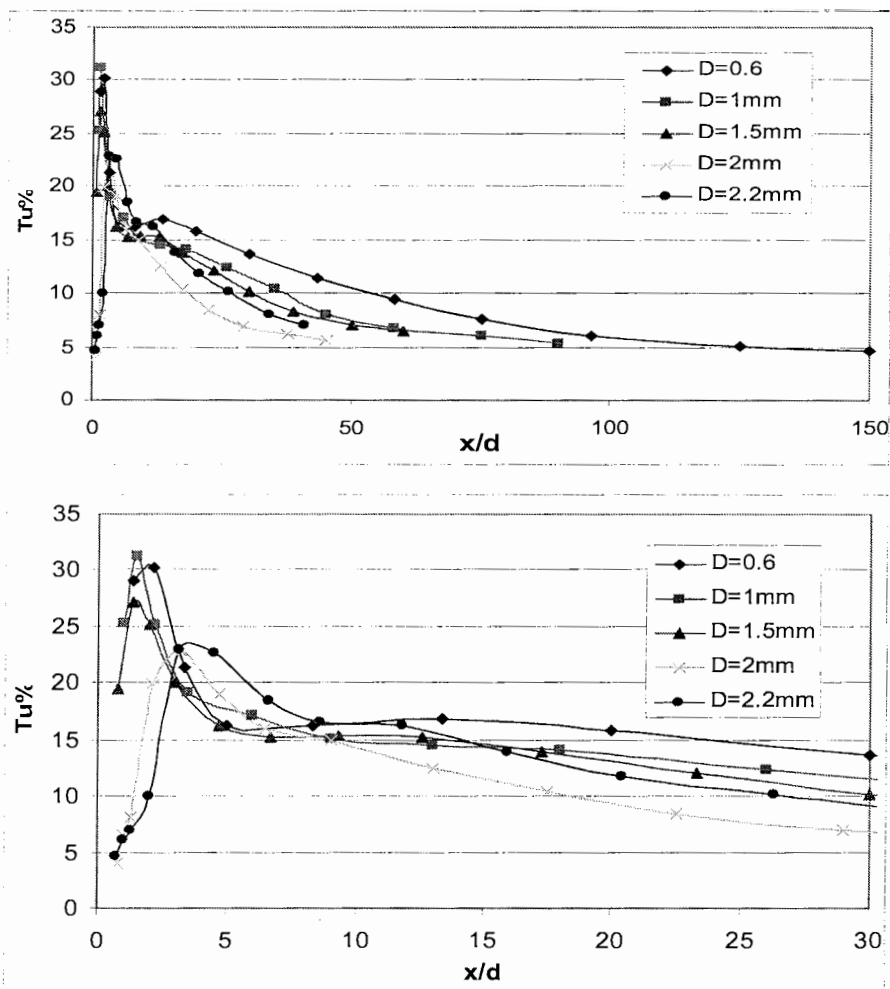
شکل (۵-۲۵) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/d در فاصله $X/D = 1$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در

سرعت $U = 5 \text{ m/s}$

همانگونه که در شکل (۵-۲۵) نشان داده شده است قطر مفتول $D = 1\text{mm}$ و سرعت $U = 5\text{m/s}$ و $(Re = 333)$ بوده و فاصله از مرکز قطر مفتول $X/D = 1$ می باشد. در این حالت شدت اغتشاشها بالا بوده و دارای دو نقطه ماکزیمم در حدود ۲۰٪ تا ۲۵٪ می باشد. با افزایش قطر و یا به عبارت دیگر عدد رینولدز این اغتشاشها کاهش می یابد.

شکل‌های (۵۸) تا (۷۲) پیوست توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D پایین دست مفتول با قطرهای مختلف در فاصله $X/D = 1$ و $X/D = 1/33$ و $X/D = 2$ و $X/D = 3.3$ به ترتیب در سرعت‌های $U = 5\text{m/s}$ و $U = 10\text{m/s}$ و $U = 15\text{m/s}$ و $U = 20\text{m/s}$ را نشان می دهد. در همه قطرهای $X/D = 1/33$ ما دارای دو نقطه ماکزیمم (دو قله) داریم که در نواحی که over flow این قله‌ها وجود دارد.

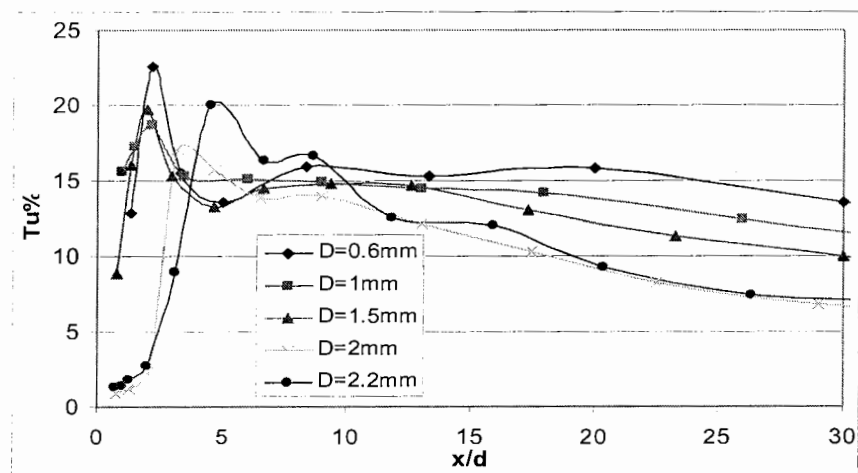
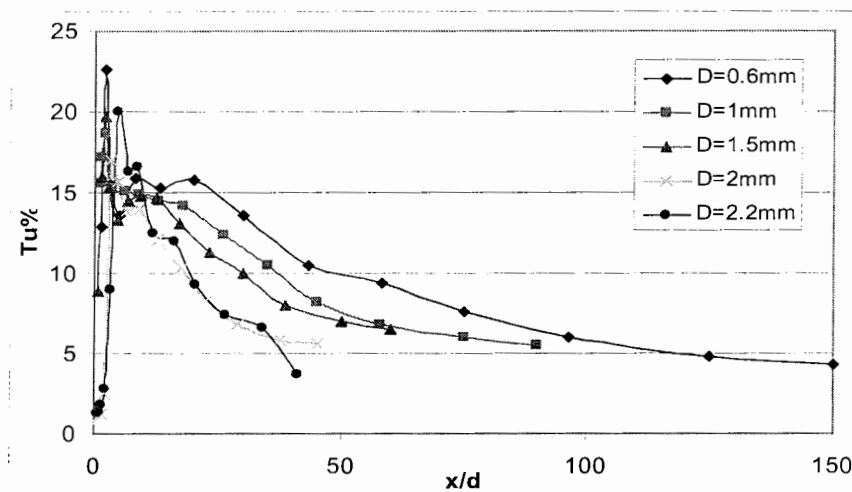
شکل (۵-۲۶) تغییرات ماکزیمم شدت اغتشاشهای پایین دست مفتول بر حسب X/D برای $U = 5\text{m/s}$ برای مفتولهایی با قطرهای مختلف را نشان می دهد. همانگونه که در شکل دیده می شود این ماکزیمم شدت اغتشاشها با افزایش X/D کاهش می یابد. در قطرهای پایین تر ماکزیمم اغتشاشها طبق شکل (۵-۲۶) در نزدیکی مفتول می باشد. همانگونه که در شکل نشان داده شده در نزدیکی مفتول اغتشاش کم می باشد و این اغتشاشها تا $X/D = 1$ با شیب زیاد افزایش یافته و از آنجا به بعد با شیب تندی کاهش یافته و از $X/D = 13$ با شیب ثابت کاهش می یابد. همانطور که مشاهده می کنید در قطرهای بالاتر در X/D های کم ما دارای کمترین اغتشاش هستیم مثلا در $1 < X/D < 2$ در قطرهای $D = 2\text{mm}$ و $D = 2/2\text{mm}$ ما دارای اغتشاش حدود ۵٪ می باشیم که بهترین نقطه برای قرارگیری سنسور برای اندازه گیری جریان معکوس می باشد.



شکل (۵-۲۶) توزیع بیشترین شدت اغتشاشها در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=5\text{m/s}$

شکل‌های (۷۳) تا (۷۵) پیوست تغییرات ماکزیمم شدت اغتشاشهای پایین دست مفتول بر حسب X/D به ترتیب برای سرعت‌های $U=10\text{ m/s}$ و $U=15\text{ m/s}$ و $U=20\text{ m/s}$ را برای قطرهای مختلف نشان می‌دهد. روند این شکلها نیز مانند شکل (۵-۲۶) می‌باشد.

شکل (۲۷-۵) تغییرات شدت اغتشاشهای پایین دست مفتول در نقطه $Y/D=0$ وسط مفتول بر حسب X/D برای سرعت $U=5\text{ m/s}$ را در قطرهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌کنید از $X/D=5$ با افزایش X/D پایین دست مفتول شدت اغتشاشها کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل (۱۶-۵) مشخص است در $1 < X/D < 2$ در قطرهای $D=2\text{ mm}$ و $D=2/2\text{ mm}$ کمترین شدت اغتشاش را داریم که نقطه مناسبی برای قراردادن سنسور برای اندازه‌گیری جریان معکوس می‌باشد.



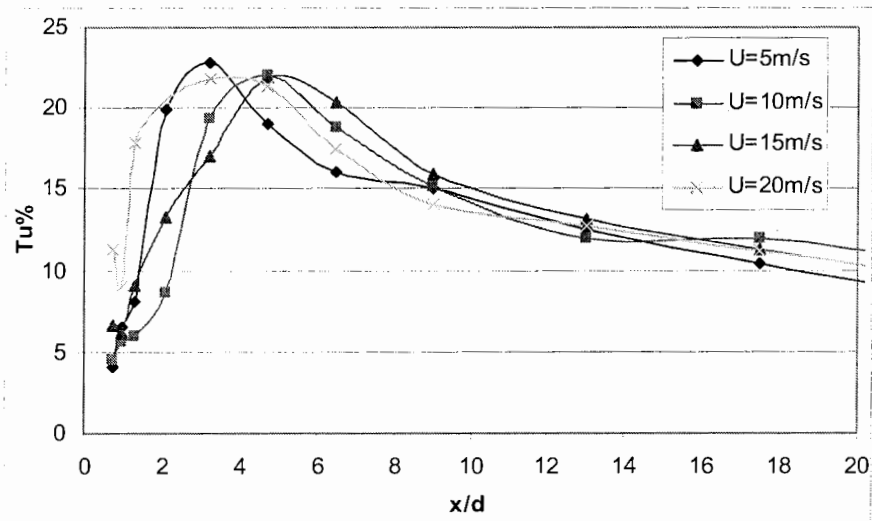
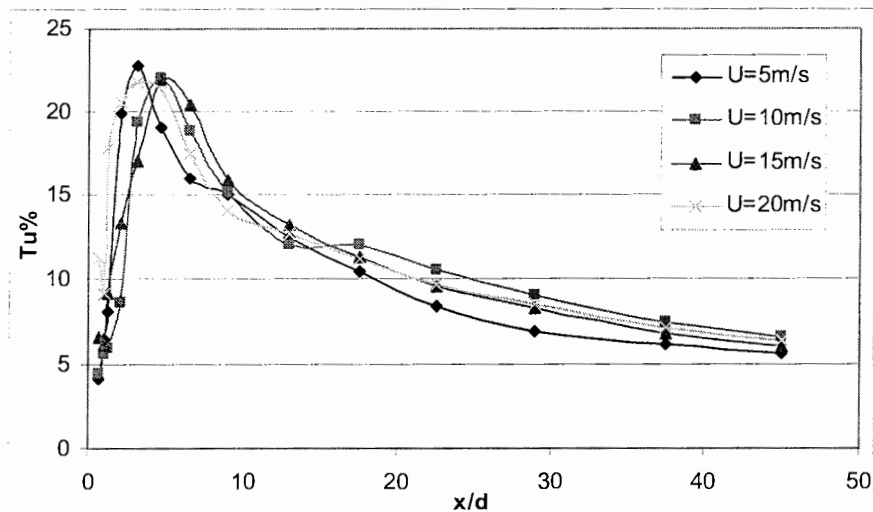
شکل (۲۷-۵) تغییرات شدت اغتشاشهای پایین دست مفتول در نقطه $Y/D=0$ وسط مفتول بر حسب X/D برای سرعت $U=5\text{ m/s}$ را در قطرهای مختلف

شکل‌های (۷۶) تا (۷۸) نیز تغییرات شدت‌اغتشاش‌های پایین‌دست مفتول در نقطه $Y/D=0$ وسط مفتول بر حسب X/D برای سرعت‌های $U=10\text{ m/s}$ و $U=15\text{ m/s}$ و $U=20\text{ m/s}$ را برای قطرهای مختلف نشان می‌دهد.

پس با توجه به شکل (۵-۲۷) و شکل‌های (۷۶) تا (۷۸) پیوست بهترین نقطه برای قرارگیری سنسور که کمترین شدت‌اغتشاش را داشته باشد در $Y/D=0$ و $1 < X/D < 2$ می‌باشد.

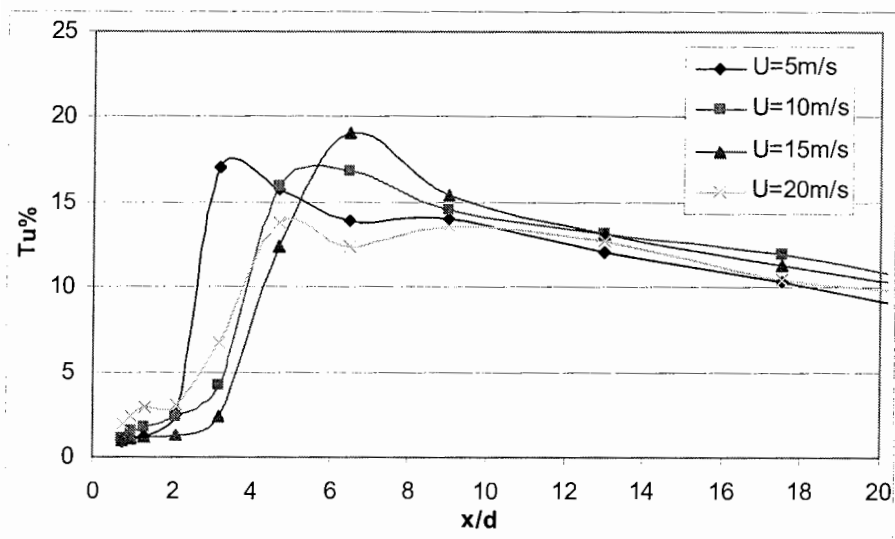
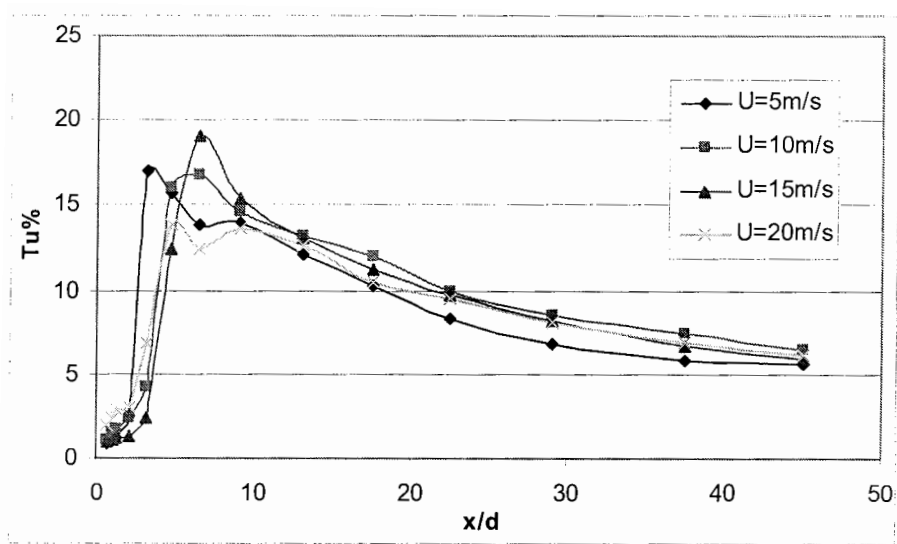
حال با توجه به شکل‌ها که مفتول با قطر $D=2\text{ mm}$ دارای قطر مناسبی برای اندازه‌گیری جریان معکوس می‌باشد، پس توزیع شدت‌اغتشاش‌ها در پایین دست مفتول با قطر $D=2\text{ mm}$ در سرعت‌های مختلف بررسی شده‌است.

شکل (۵-۲۸) توزیع ماکزیمم شدت‌اغتشاش‌ها پایین‌دست مفتول به قطر $D=2\text{ mm}$ را در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. روند کلی تغییرات شدت‌اغتشاش‌ها مانند شکل‌های قبل می‌باشد. نکته حائز اهمیت در این قسمت در همان فاصله $1 < X/D < 2$ در سرعت‌های مختلف نیز دارای کمترین شدت‌اغتشاش هستیم.



شکل (۵-۲۸) توزیع ماکزیمم شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=۲\text{mm}$ در سرعت‌های مختلف

شکل (۵-۲۹) نیز توزیع شدت اغتشاشها در $Y/D=0$ پایین دست مفتول به قطر $D=۲\text{mm}$ در سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. این شکل نیز مانند قسمت قبل ما در این فاصله دارای کمترین اغتشاش هستیم پس بهترین نقطه برای قرارگیری سنسور همانطور که قبلا ذکر شد در $Y/D=0$ و $۱ < X/D < ۲$ می‌باشد.



شکل (۵-۲۹) نیز توزیع شدت اغتشاشها در $Y/D=0$ پایین دست مفتول به قطر $D=2\text{mm}$ در سرعت‌های مختلف

۵-۲-۱-۳- بررسی گردابه‌های پایین دست مفتول:

همانگونه که در فصل (۳) مطرح شد یکی از روشهای اندازه‌گیری جریان معکوس استفاده از گردابه‌های بوجود آمده در پایین دست مفتول می‌باشد. در این روش سنسور پایین دست جریان فرکانس گردابه‌های ناشی از مفتول در بالا دست جریان را اندازه‌گیری کرد و طبق رابطه (۴-۱) و (۴-۲) ذکر شده در فصل (۴) سرعت جریان هوا اندازه‌گیری می‌شود. اگر جریان از بالادست به پایین دست باشد در سنسور پایین دست مفتول گردابه‌ها مشاهده شود و با توجه به فرکانس سرعت آن تشخیص داده می‌شود و اگر از پایین دست به بالادست باشد سرعت جریان بوسیله سنسور به تنهایی اندازه‌گیری شده و جهت جریان نیز مشخص می‌شود.

همچنین برای کالیبراسیون جریان سنج سیم‌داغ برای سرعت‌های کم از روش استفاده از فرکانس گردابه‌های پایین دست مفتول استفاده می‌کنیم. این گردابه‌ها در تمام نقاط پایین دست مفتول مشهود نبوده و در بعضی نقاط با ترکیب فرکانسهای دیگر دیده می‌شود.

شکل (۵-۳۰) فرکانس گردابه‌های کارمن (Karman Vortex) را در مکان $\frac{X}{D}=4$ و $\frac{Y}{D}=1/5$ نشان می‌دهد،

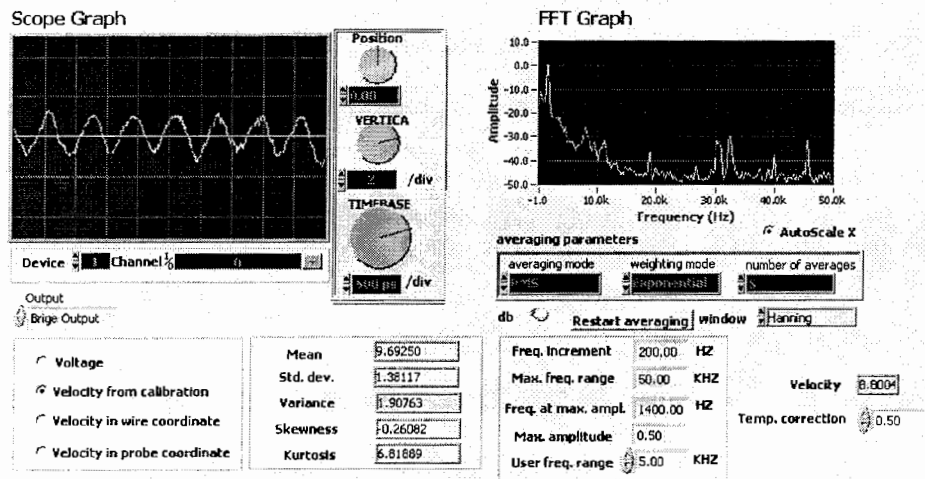
که این فرکانس کاملاً بصورت سینوسی می‌باشد. ولی هنگامیکه پراب سیم‌داغ به نقطه $\frac{X}{D}=4$ و $\frac{Y}{D}=5$

می‌رسد. اگرچه گردابه‌های کارمن مشاهده می‌شود ولی فرکانس گردابه‌های کارمن با پدیده‌های دیگر سیالاتی ترکیب شده و موج مناسبی به عنوان خروجی نخواهیم داشت شکل (۵-۳۱) بنابراین مکان پایین دست مفتول مهم بوده و در آنجا می‌توان به راحتی گردابه‌های کارمن را دیده و در آن نقطه سنسور را برای کالیبراسیون دستگاه جریان سنج سیم‌داغ و اندازه‌گیری جریان معکوس استفاده می‌کنیم.

شکل (۵-۳۲) فرکانس گردابه‌های پایین دست مفتول را بصورت عدد استروهل $St = \frac{nD}{U}$ ، برحسب عدد

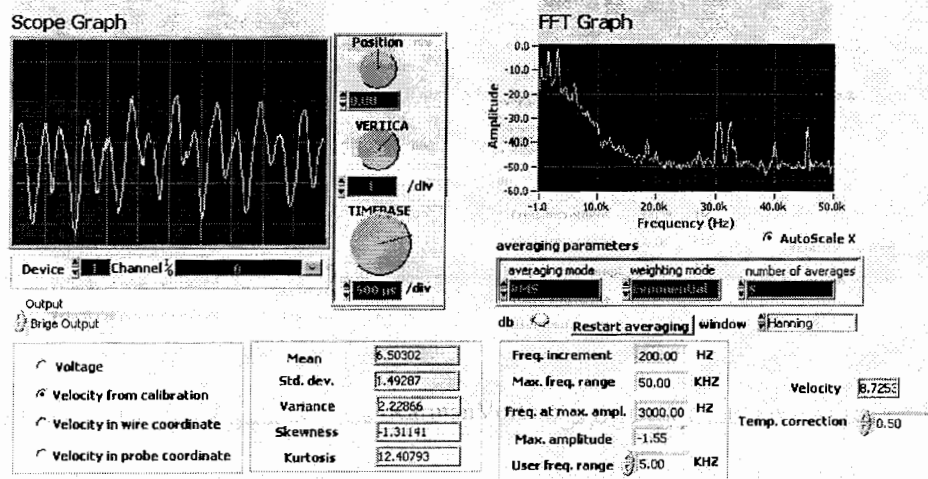
رینولدز نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌کنید برای رینولدزهای $5000 < Re < 600$ عدد

Sensor 1 | Sensor 2 | Sensor 3



شکل (۵-۳۰) فرکانس گردابه‌های کارمن (Karman Vortex) هنگامی که سنسور در مکان مناسبی قرار دارد

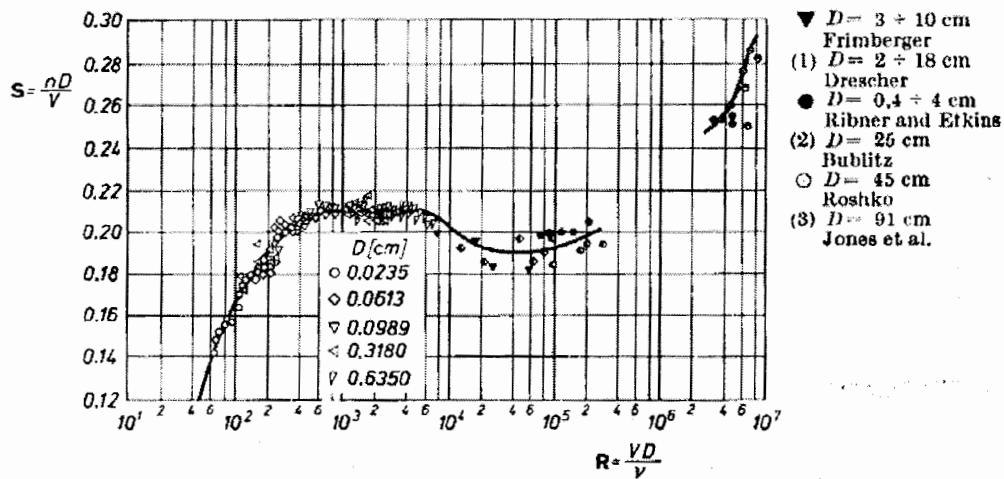
Sensor 1 | Sensor 2 | Sensor 3



شکل (۵-۳۱) فرکانس گردابه‌های کارمن با پدیده‌های دیگر سیالاتی ترکیب شده و موج مناسبی به عنوان خروجی نخواهیم داشت

استروهل حدود $St = 0.21$ می‌باشد. برای اعداد رینولدز کمتر با کاهش عدد رینولدز عدد استروهل کاهش

می‌یابد.



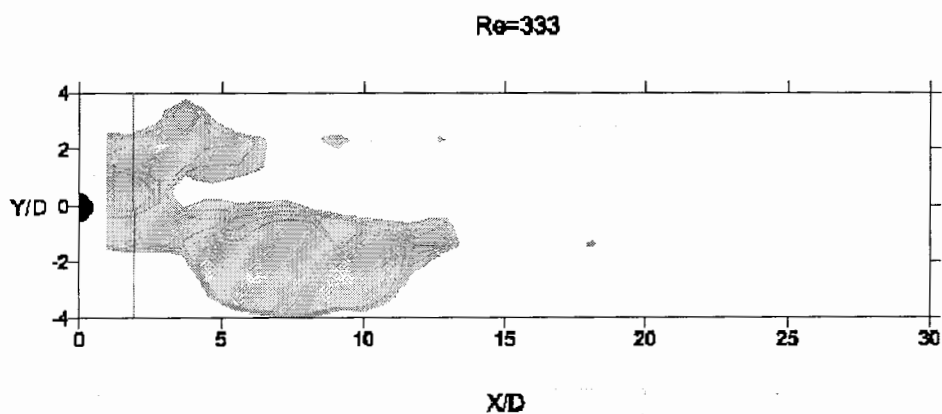
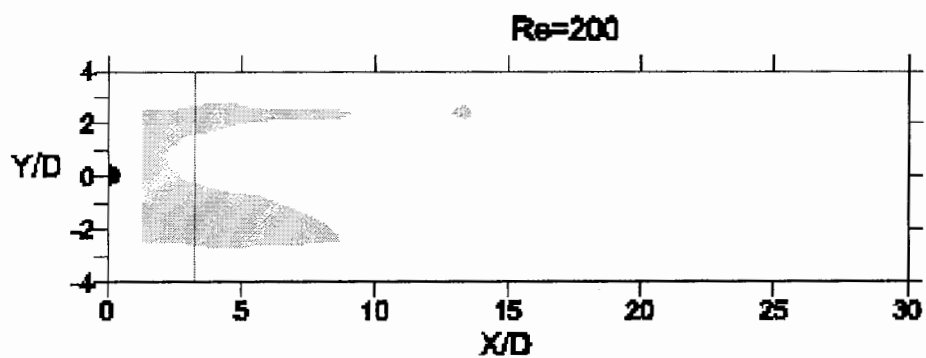
شکل (۵-۳۲) فرکانس گردابه‌های پایین دست مفتول را بصورت عدد استروهل $St = \frac{nD}{U}$ ، برحسب عدد رینولدز

آزمایشها برای مفتول با قطرهای مختلف و سرعت‌های مختلف انجام شده و در شکل‌های زیر نشان داده شده‌است. شکل‌های زیر بصورت contour بوده و ناحیه‌هایی که در آن عدد استروهل $St = 0.21$ دیده شده نشان داده شده‌است. محور Xها فاصله پایین دست مفتول را بصورت بی‌بعد شده و محور عمودی (در

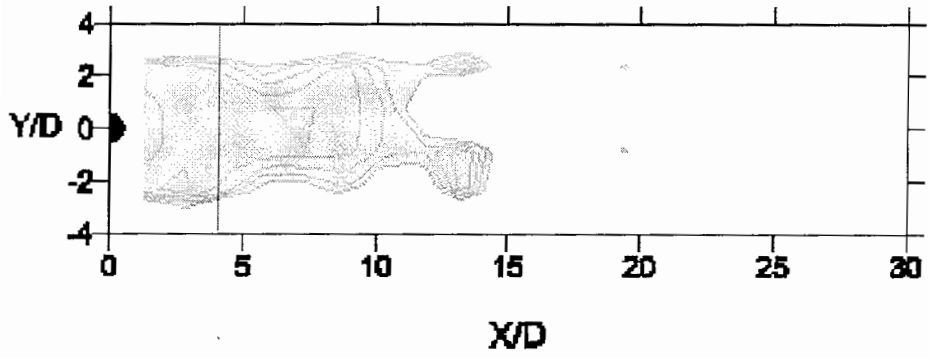
راستای عمود بر جریان) بصورت بی‌بعد شده $\frac{Y}{D}$ نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های فوق ناحیه‌هایی که گردابه‌های کارمن پشت مفتول دیده شده نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری جریان معکوس بهتر است که سنسور دوم در این ناحیه‌ها قرارگیرد. برای کالیبراسیون به روش گردابه‌های کارمن نیز سنسور باید در این محدوده‌ها قرارگیرد.

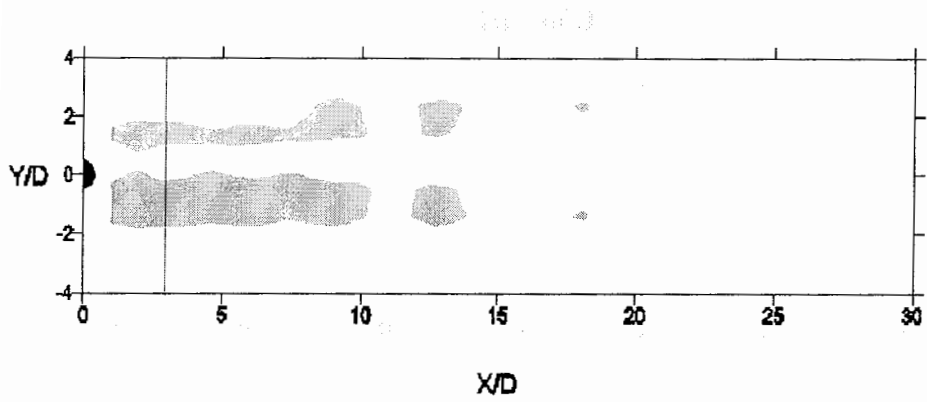
لازم به ذکر است با توجه به توزیع سرعت پایین دست مفتول برای کالیبره کردن جریان سنج سیم‌داغ و اندازه‌گیری جریان معکوس نمی‌توان سنسور را در ناحیه‌ای که جریان آن دارای **over flow** بوده و بنابراین ناحیه‌ای که در آن **over flow** وجود دارد با خط چین نشان داده شده و نزدیکتر از آن فاصله نمی‌توان مفتول را قرار داد.



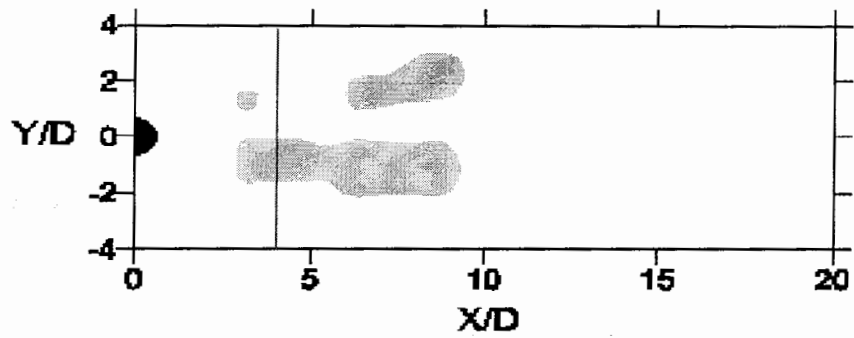
Re=400

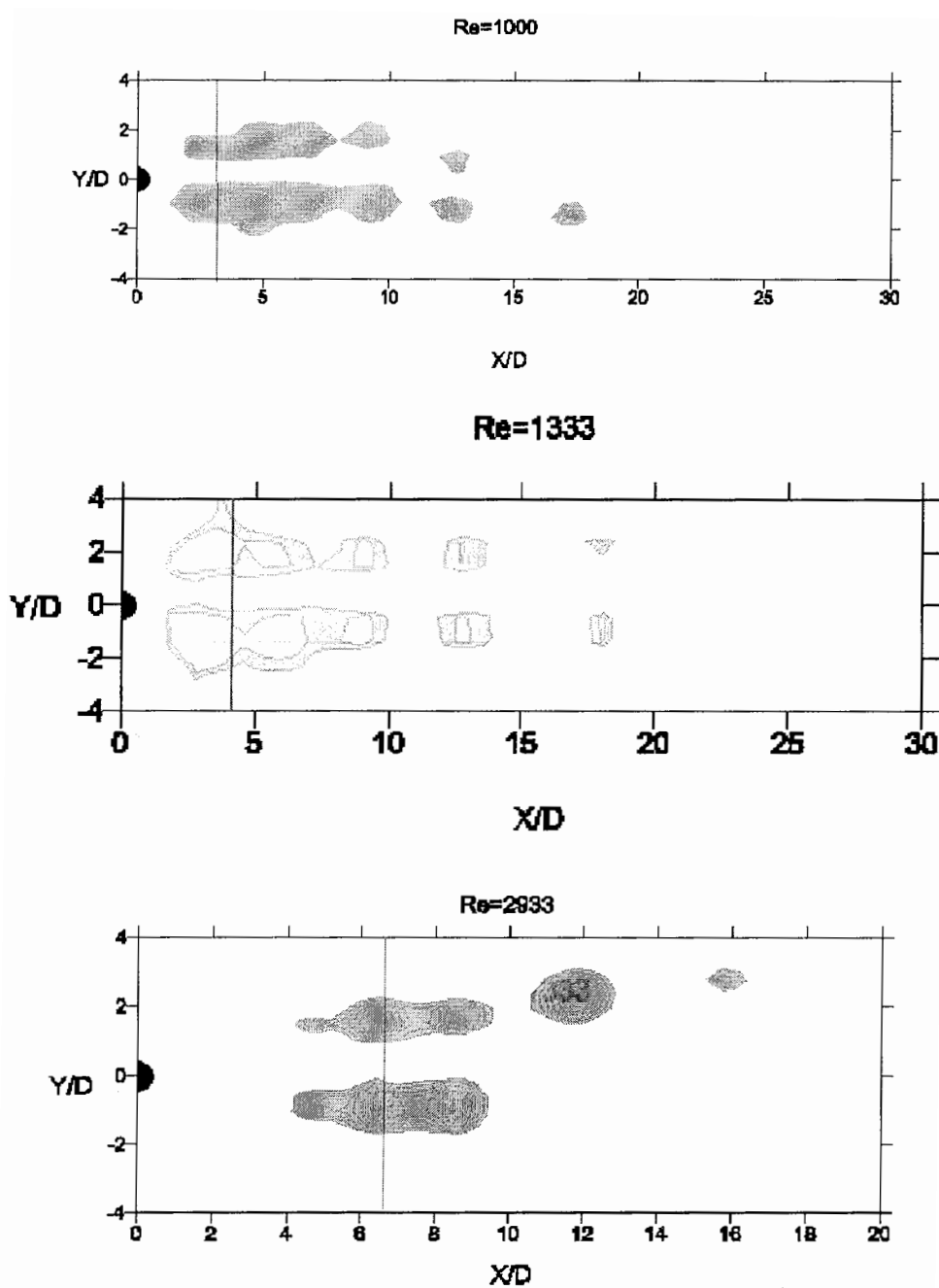


Re=666



Re=733





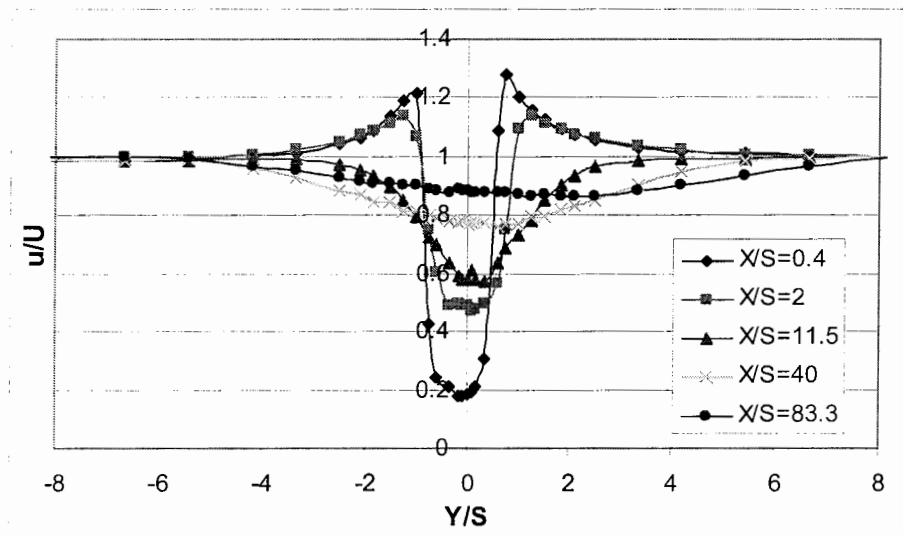
شکل (۳۳-۵) ناحیه گردابه‌های کارمن پشت مفتول در رینولدزهای مختلف

۵-۲-۲- جریان پایین دست صفحه نازک (plate):

۵-۲-۲-۱- سرعت متوسط

همانگونه که بیان شد به منظور اندازه گیری جریان معکوس می توان از دو سنسور که در بالادست و پایین دست مفتول قرار گرفته استفاده نمود و جهت جریان و مقدار آن را تشخیص داد. علاوه بر مفتول می توان از اجسام دیگری نظیر صفحه (plate) استفاده نمود. در این قسمت از دو صفحه نازک که دارای پهنای $S=1/2\text{mm}$ و $S=1/5\text{mm}$ مورد بررسی قرار گرفت.

شکل (۵-۳۴) توزیع سرعت پایین دست صفحه به پهنای $S=1/2\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$ نشان می دهد. سرعت محلی با استفاده از جریان آزاد بی بعد شده است و همچنین فواصل با استفاده از پهنای صفحه بی بعد می گردد.



شکل (۵-۳۴) توزیع سرعت پایین دست صفحه به پهنای $S=1/2\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$

مشابه توزیع سرعت پایین دست مفتول توزیع سرعت در نزدیکی صفحه نازک دارای نقاط ماکزیمم (Overflow) بوده و با افزایش پایین دست مقدار (Over flow) کم شده به صفر می رسد. همچنین

توزیع سرعت در ناحیه دنباله مشاهده می‌شود و سرعت در ناحیه دنباله نزدیک به صفحه بسیار کم می‌باشد و با افزایش پایین دست ، سرعت در ناحیه دنباله افزایش می‌یابد .

شکل‌های (۷۹) تا (۸۱) پیوست نیز توزیع سرعت محلی پایین دست صفحه به پهنای $S=1/2\text{mm}$ به ترتیب در سرعت‌های $U=1.0\text{m/s}$ و $U=1.5\text{m/s}$ و $U=2.0\text{m/s}$ نشان می‌دهد.

در این شکل‌ها مشابه شکل (۵-۳۴) سرعت در نزدیکی صفحه دارای ناحیه دنباله قوی و همچنین Over flow بوده که با افزایش پایین دست مقدار Over flow صفر می‌شود و مقدار سرعت در ناحیه دنباله افزایش می‌یابد.

شکل‌های (۸۲) تا (۸۵) پیوست توزیع سرعت پایین دست صفحه نازک به پهنای $S=1/5\text{mm}$ به ترتیب در سرعت‌های $S=5\text{m/s}$ و $U=1.0\text{m/s}$ و $U=1.5\text{m/s}$ و $U=2.0\text{m/s}$ نشان می‌دهد.

روند تغییرات در شکل‌های فوق مانند شکل‌های قبل می‌باشد. جریان در نزدیکی صفحه دارای Over flow و دارای ناحیه دنباله قوی می‌باشد که با افزایش پایین دست مقدار Over flow از بین رفته و سرعت در ناحیه دنباله افزایش می‌یابد.

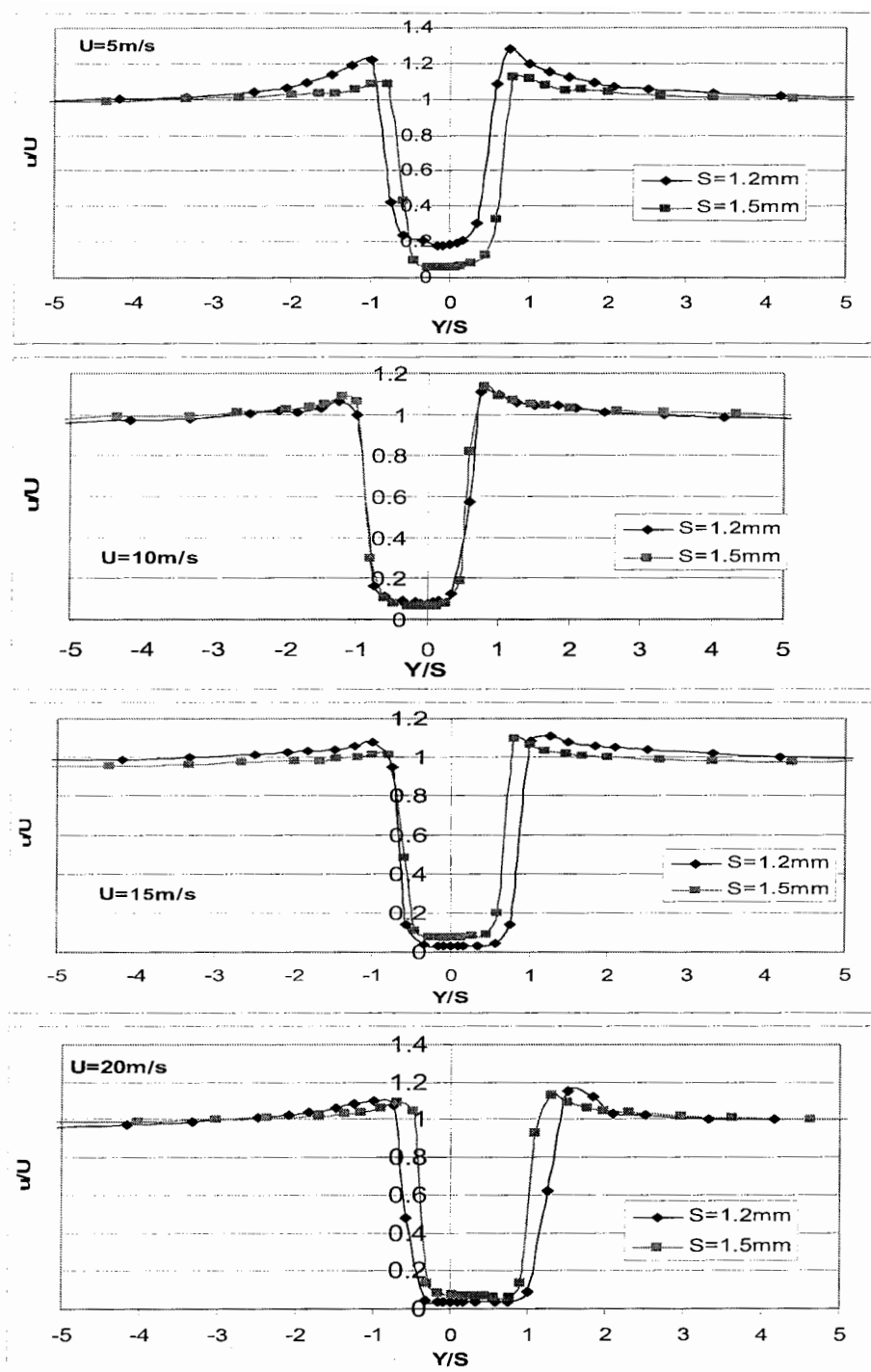
به منظور بررسی و مقایسه توزیع سرعت پایین دست صفحه برای دو صفحه با پهنای $S=1/2\text{mm}$ و

$S=1/5\text{mm}$ شکل‌های (۵-۳۵) و (۵-۳۶) در فاصله‌های $\frac{X}{S}=0.35$ و $\frac{X}{S}=24$ مورد بررسی قرار گرفت.

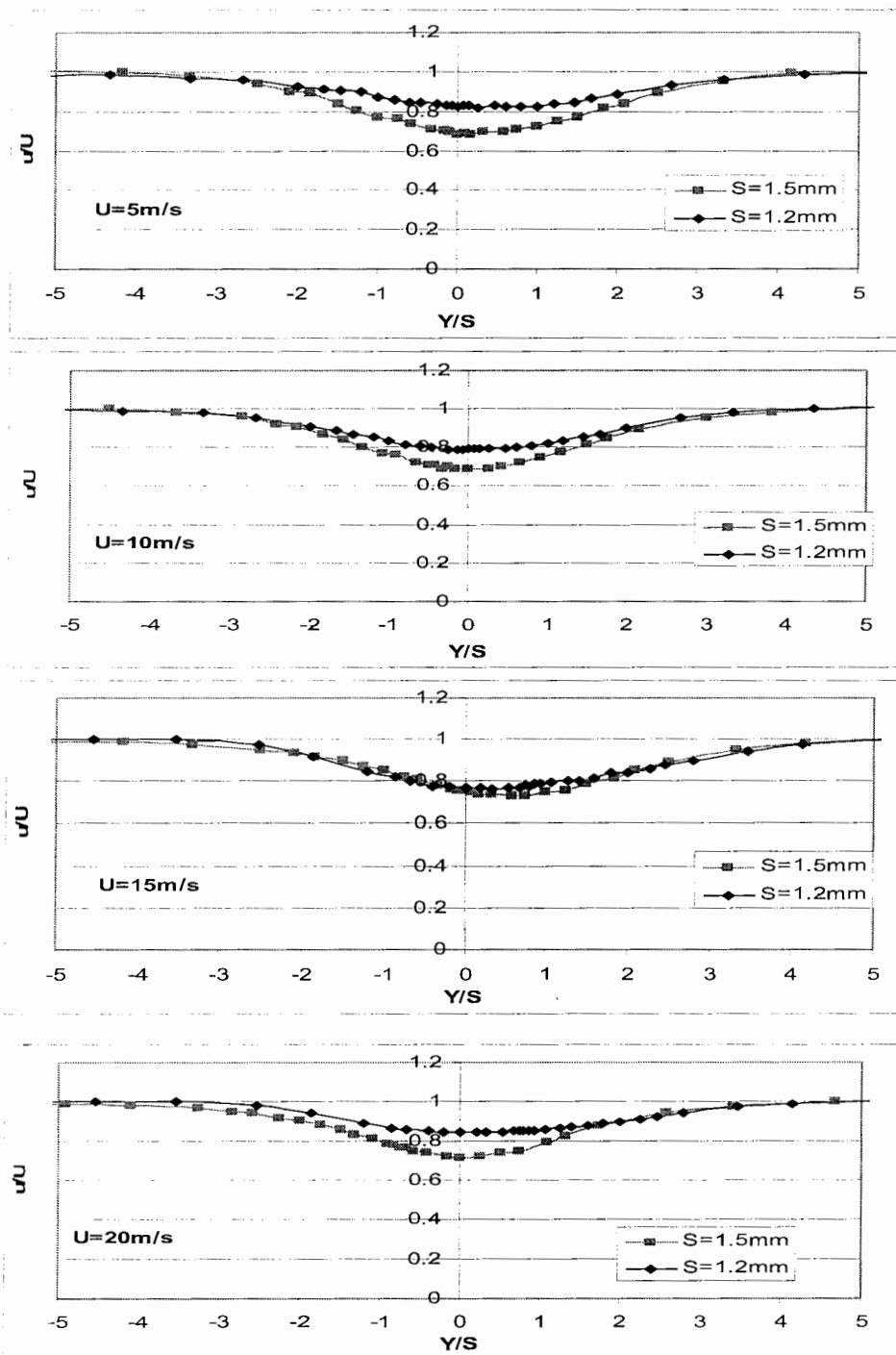
توزیع سرعت که بصورت بی بعد شده می‌باشد برای هر دو صفحه با ابعاد ذکر شده مشابه می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌کنید توزیع سرعت برای صفحه با پهنای $S=1/5\text{mm}$ دارای ناحیه دنباله قویتری نسبت به صفحه با پهنای کمتر می‌باشد، که این پدیده بدیهی است. با افزایش پایین دست هنگامی که

$\frac{X}{S}=24$ می‌باشد ناحیه دنباله نسبت به حالتی که $\frac{X}{S}=1$ می‌باشد ضعیف تر شده و سرعت محلی از حدود

$\frac{u}{U}=0.1$ شکل (۵-۳۵) به مقدار $\frac{u}{U}=0.7$ شکل (۵-۳۶) افزایش می‌یابد.



شکل (۵-۳۵) مقایسه توزیع سرعت پایین دست صفحه برای دو صفحه با پهنای $S=1/5\text{mm}$ و $S=1/2\text{mm}$ در فاصله $X/S = 0.35$



شکل (۵-۲۶) مقایسه توزیع سرعت پایین دست صفحه برای دو صفحه با پهنای $S=1/2\text{mm}$ و $S=1/5\text{mm}$ در فاصله $X/S=24$

همچنین مقایسه توزیع سرعت پایین دست صفحه برای دو صفحه با پهنای $S=1/2\text{mm}$ و $S=1/5\text{mm}$

شکل‌های (۸۶) و (۸۷) پیوست در فاصله‌های $\frac{X}{S}=1$ و $\frac{X}{S}=50$ نشان داده شده است.

در شکل (۳۶-۵) در فاصله $\frac{X}{S}=24$ ، اختلاف ناحیه دنباله صفحه با پهنای $S=1/5\text{mm}$ به مراتب بیشتر از صفحه به ضخامت $S=1/2\text{mm}$ می‌باشد.

در فاصله $\frac{X}{S}=50$ به بعد ناحیه دنباله ضعیف شده و جریان نزدیک به سرعت جریان آزاد می‌باشد.

شکل (۳۷-۵) تغییرات ماکزیمم سرعت در ناحیه Over flow برای صفحه‌هایی به پهنای $S=1/2\text{mm}$ و $S=1/5\text{mm}$ در سرعت‌های $U=5\text{m/s}$ و $U=10\text{m/s}$ و $U=15\text{m/s}$ و $U=20\text{m/s}$ را نشان می‌دهد.

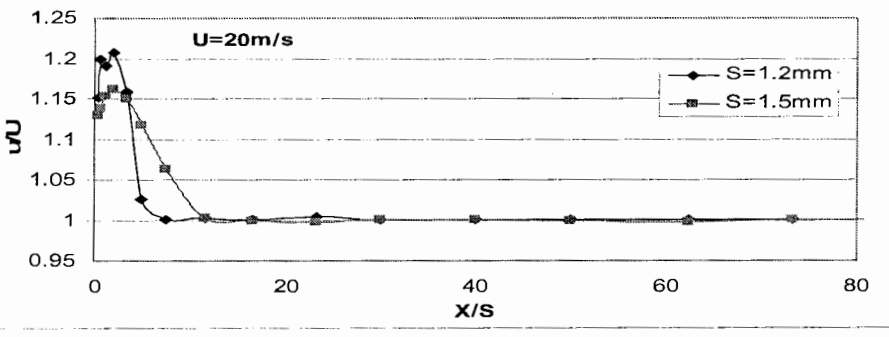
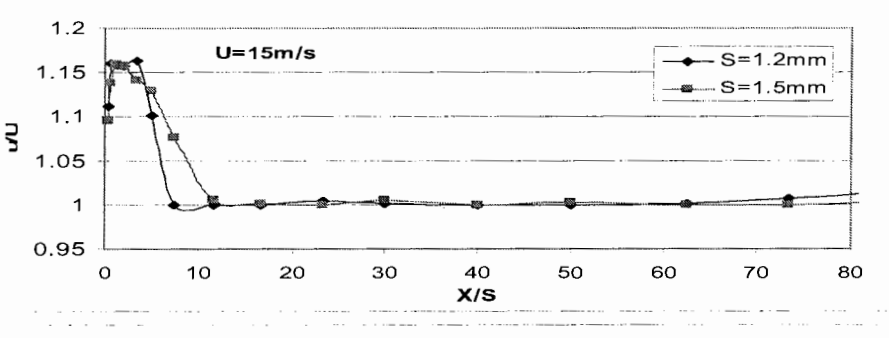
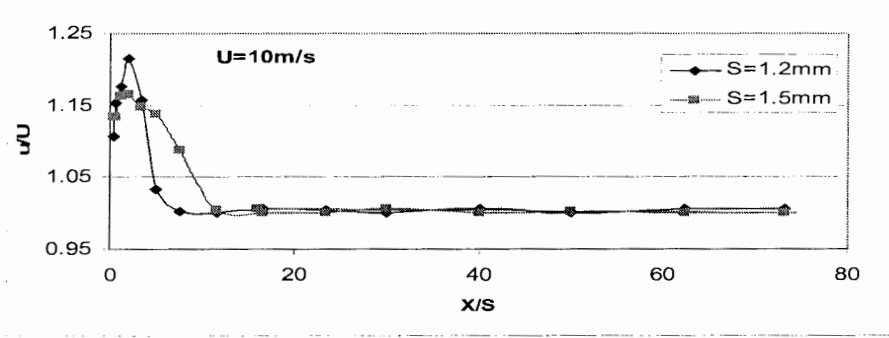
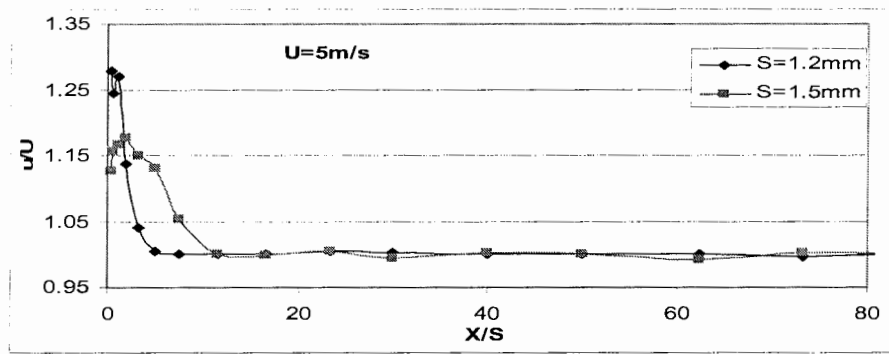
مقدار Over flow برای هر دو صفحه مشابه بوده و بیشترین Over flow حدود ۲۰٪ تا ۲۵٪ سرعت

جریان آزاد می‌باشد که در سرعت‌های مختلف در $2 < \frac{X}{S} < 4$ اتفاق می‌افتد. با افزایش پایین دست جریان

مقدار $\left(\frac{X}{S}\right)$ Over flow کاهش یافته و برای صفحه به پهنای $S=1/2\text{mm}$ در فاصله تقریبی $\frac{X}{S}=8$ و

برای صفحه با پهنای $S=1/5\text{mm}$ در فاصله تقریبی مقدار Over flow صفحه می‌گردد. این اختلاف

ناشی از قدرت دنباله در پایین دست صفحه می‌باشد که با افزایش پهنای صفحه این دنباله قویتر می‌باشد.

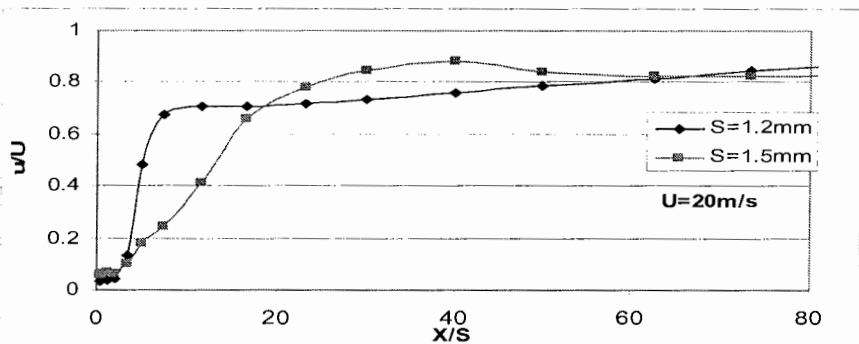
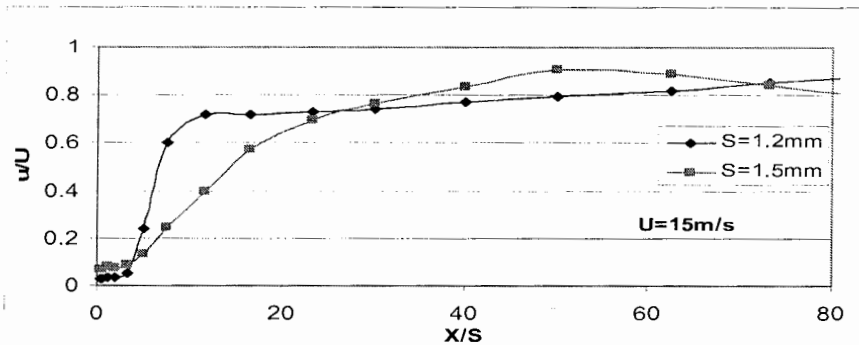
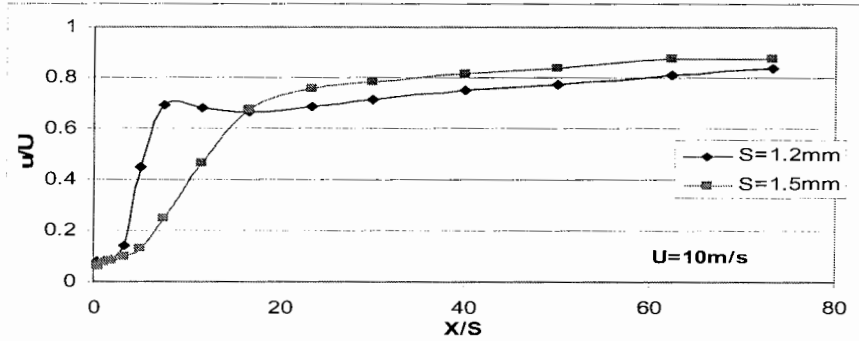
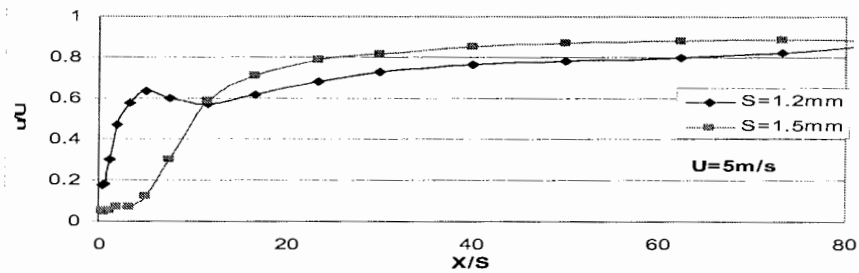


شکل (۳۷-۵) تغییرات ماکزیمم سرعت در ناحیه Over flow برای صفحه‌هایی به پهنای $S=1/5\text{mm}$ و $S=1/2\text{mm}$ در

سرعت‌های مختلف

به منظور بررسی بهتر شکل (۵-۳۸) مقدار مینیمم سرعت محلی در $Y/S=0$ در ناحیه دنباله را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۵-۳۸) نشان داده شده است با افزایش پایین دست ناحیه دنباله ضعیف تر شده و به عبارت دیگر سرعت با افزایش پایین دست در ناحیه دنباله افزایش می‌یابد. در سرعت بالاتر از $U=10\text{ m/s}$ برای هر دو صفحه در فاصله $0 < \frac{X}{D} < 2$ کمترین سرعت و قویترین دنباله را داریم که محل خوبی برای قرارگیری سنسور برای اندازه‌گیری جریان معکوس می‌باشد. در صورتیکه برای صفحه با پهنای $S=1/2\text{ mm}$ در سرعت $U=5\text{ m/s}$ مکان خوبی نیست ولی برای صفحه با پهنای $S=1/5\text{ mm}$ مناسب است پس صفحه با پهنای بیشتر اگر باعث انسداد جریان نشود مناسبتر می‌باشد.

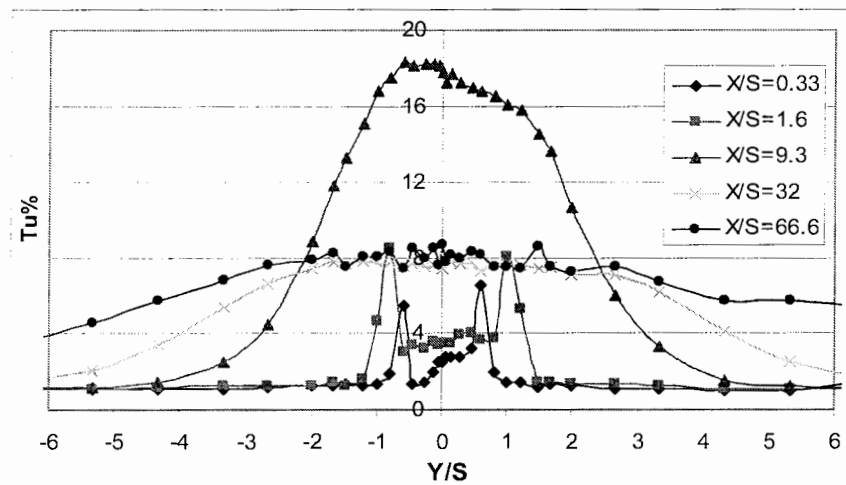
همچنین در سرعت بیشتر از $U=10\text{ m/s}$ ، سرعت در $0 < \frac{X}{S} < 3$ حدود ۲۰٪ سرعت جریان آزاد می‌باشد. برای صفحه $S=1/2\text{ mm}$ در فاصله $\frac{X}{S} = 10$ به یکباره به ۷۰٪ سرعت جریان آزاد می‌رسیم در حالیکه برای صفحه به پهنای $S=1/5\text{ mm}$ در فاصله $\frac{X}{S} = 20$ به این مقدار می‌رسیم. این نشان می‌دهد که دنباله صفحه پهن تر، قویتر می‌باشد.



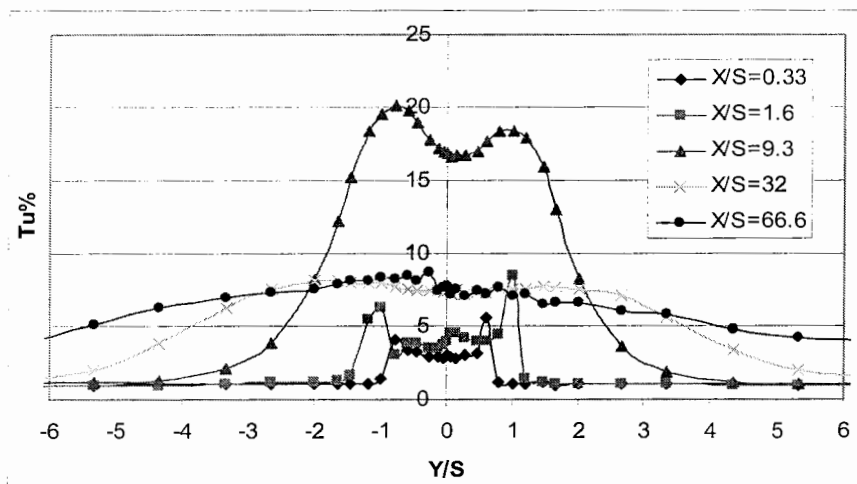
شکل (۳۸-۵) مقدار مینیمم سرعت محلی در $Y/S = 0$ در ناحیه دنباله برای صفحه‌هایی به پهنای $S = 1/2$ mm و $S = 1/5$ mm در سرعت‌های مختلف

۵-۲-۲-۲- شدت اغتشاش

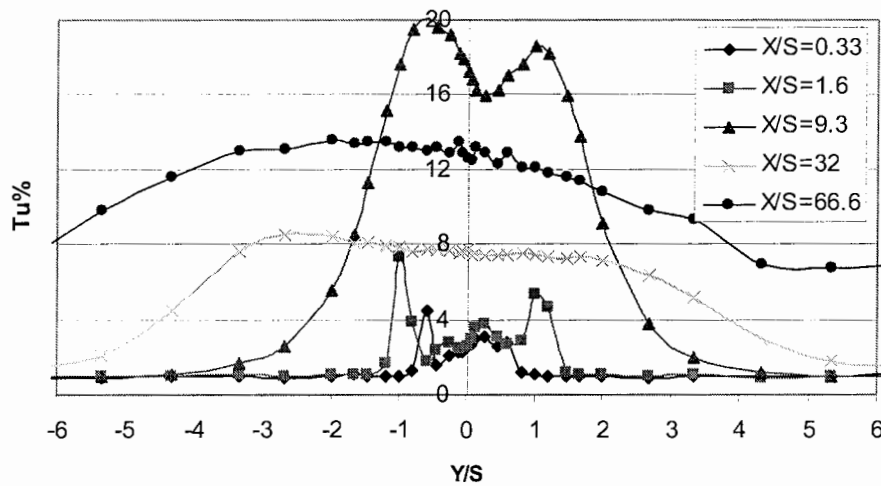
به منظور بررسی شدت اغتشاش، پایین دست صفحه $S=1/5\text{mm}$ شکل‌های (۵-۳۹)، (۵-۴۰)، (۵-۴۱) و (۵-۴۲) مورد بررسی قرار می‌گیرد. این شکل‌ها شدت اغتشاشها را به ترتیب در سرعت‌های $U=5\text{m/s}$ و $U=10\text{m/s}$ و $U=15\text{m/s}$ و $U=20\text{m/s}$ نشان می‌دهد.



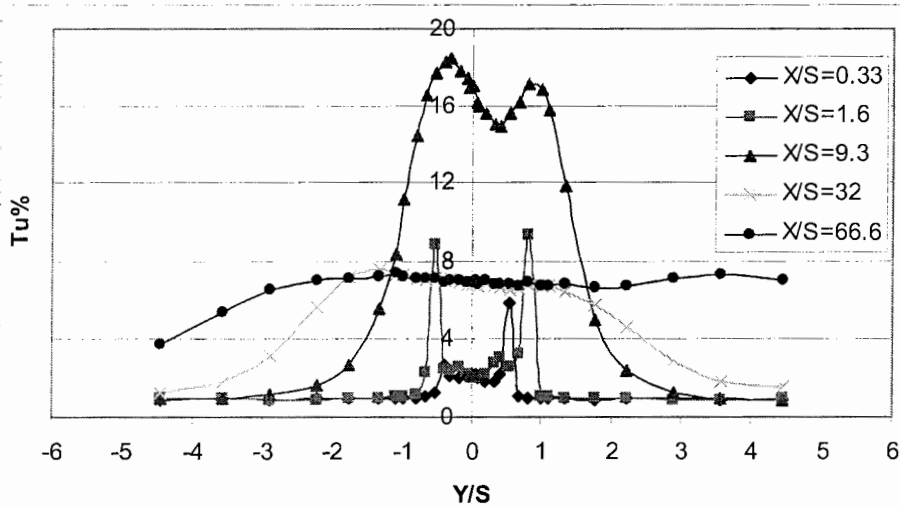
شکل (۵-۳۹) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست صفحه به پهنای $S=1/5\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$



شکل (۵-۴۰) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست صفحه به پهنای $S=1/5\text{mm}$ در سرعت $U=10\text{m/s}$



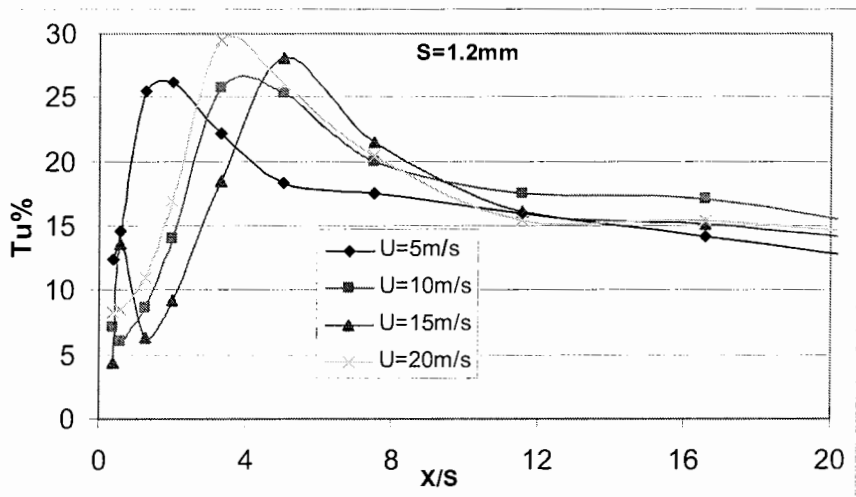
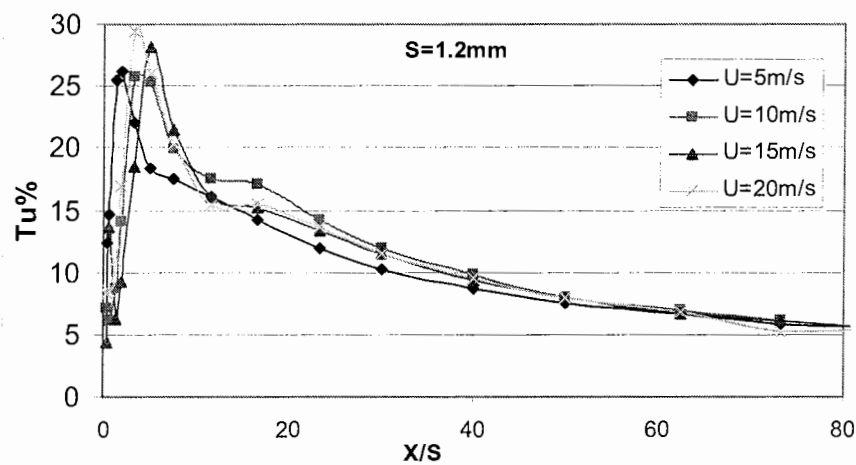
شکل (۴۱-۵) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست صفحه به پهنای $S=1/5\text{mm}$ در سرعت $U=1.5\text{m/s}$



شکل (۴۲-۵) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست صفحه به پهنای $S=1/5\text{mm}$ در سرعت $U=2.0\text{m/s}$

نقاط ماکزیمم (قله) در نزدیکی صفحه ایجاد می‌شود که با افزایش پایین دست آن $\left(\frac{X}{S}\right)$ نقاط ماکزیمم Over flow از بین رفته و توزیع شدت اغتشاشها یکنواخت تر شده و دارای اغتشاش حدود $Tu=15\%$ می‌باشد. به علت افزایش پهنای صفحه تا $\frac{X}{S}=9/3$ که دارای بیشترین شدت اغتشاش می‌باشد، توزیع شدت اغتشاشها دارای دو قله مختصر می‌باشد. که در صفحه کوچکتر این پدیده در این فاصله از بین رفته است که این ناشی از قدرت دنباله می‌باشد. در $\frac{X}{S}$ های بالاتر شدت اغتشاشها تقریباً ثابت هستند و با افزایش سرعت به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابند. شکلها دارای تشابهی خوبی هستند که به شرایط موجود در بالادست (تونل باد) ارتباطی ندارد.

شکلهای (۸۸) تا (۹۱) پیوست تغییرات شدت اغتشاشها، پایین دست صفحه $S=1/2\text{mm}$ به ترتیب در سرعتهای $U=5\text{m/s}$ و $U=10\text{m/s}$ و $U=15\text{m/s}$ و $U=20\text{m/s}$ نشان می‌دهد. به منظور بررسی دقیقتر تغییرات شدت اغتشاشها جریان هوا، توزیع شدت اغتشاشها در نقاط ماکزیمم (قله) در پایین دست صفحه با پهنای $S=1/2\text{mm}$ بدست آمده است.

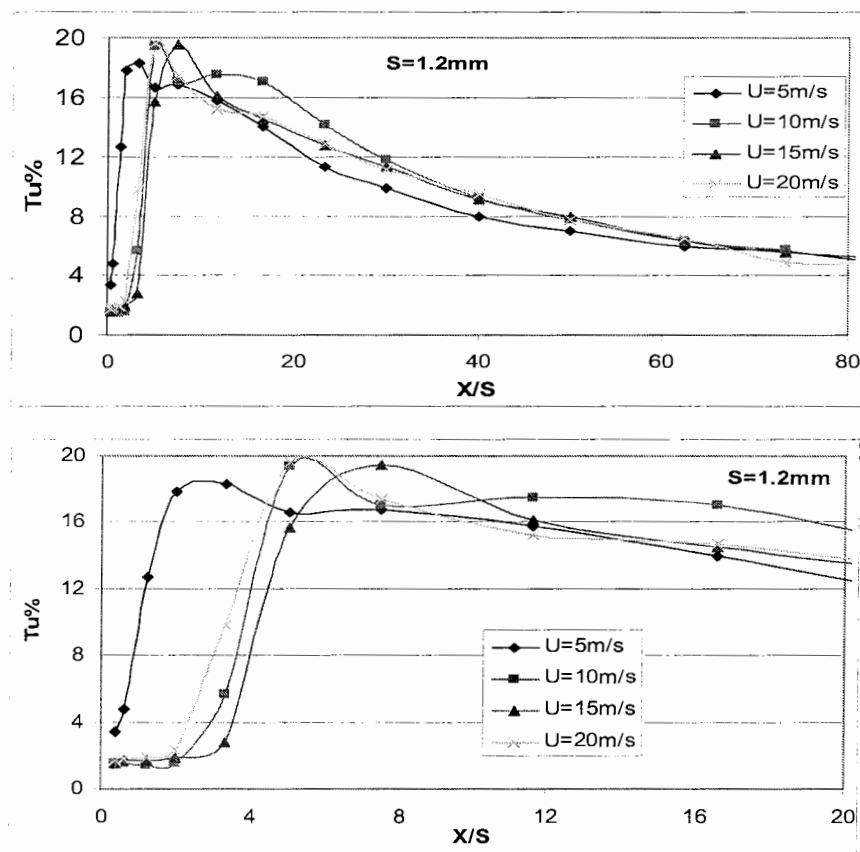


شکل (۴۳-۵) بیشترین شدت اغتشاشها در نزدیکی صفحه با پهنای $S=1/2\text{mm}$ در سرعت‌های مختلف

همانگونه که در شکل (۴۳-۵) نشان داده شده ماکزیمم شدت اغتشاشها در نزدیکی صفحه کم بوده که با افزایش $\frac{X}{S} = 4$ تا مقدار شدت اغتشاشها افزایش پیدا کرده و به مقدار ماکزیمم خود حدود $Tu=25\%$ می‌رسد و پس از آن با افزایش $\frac{X}{S}$ روند نزولی داشته در فاصله $\frac{X}{S} = 70$ به حدود $Tu=5\%$ کاهش می‌یابد. این مقدار را نمی‌توان گفت که ناشی از اغتشاشهای صفحه می‌باشد. شکل (۴۳-۵) شدت اغتشاشها را در

نزدیکی صفحه با پهنای $S=1/2\text{mm}$ نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که مقدار ماکزیمم اغتشاشها با افزایش سرعت در $\frac{X}{S}$ های بالاتر اتفاق می‌افتد.

شکل (۴۴-۵) تغییرات شدت اغتشاشها در مرکز صفحه $\frac{Y}{S}=0$ در ناحیه دنباله پایین دست جریان را نشان می‌دهد.



شکل (۴۴-۵) تغییرات شدت اغتشاشها در مرکز صفحه $\frac{Y}{S}=0$ در ناحیه دنباله پایین دست صفحه به پهنای $S=1/2\text{mm}$ در

سرعت‌های مختلف

در نزدیکی صفحه مقدار این اغتشاشها بسیار پایین بوده و با افزایش پایین دست این مقدار بطور ناگهانی افزایش می‌یابد. نقطه ماکزیمم این شدت اغتشاشها بستگی به سرعت جریان هوا دارد. در فاصله کمتر از

$\frac{X}{S} = 3$ شدت اغتشاشها جریان هوا کم بوده و بهتر است برای اندازه‌گیری جریان معکوس سنسوردوم در این ناحیه قرار گیرد.

بهترین نقطه برای قرارگیری سنسور که دارای کمترین شدت اغتشاش برای اندازه‌گیری جریان معکوس در فاصله $1 < \frac{X}{S} < 3$ پایین دست صفحه است.

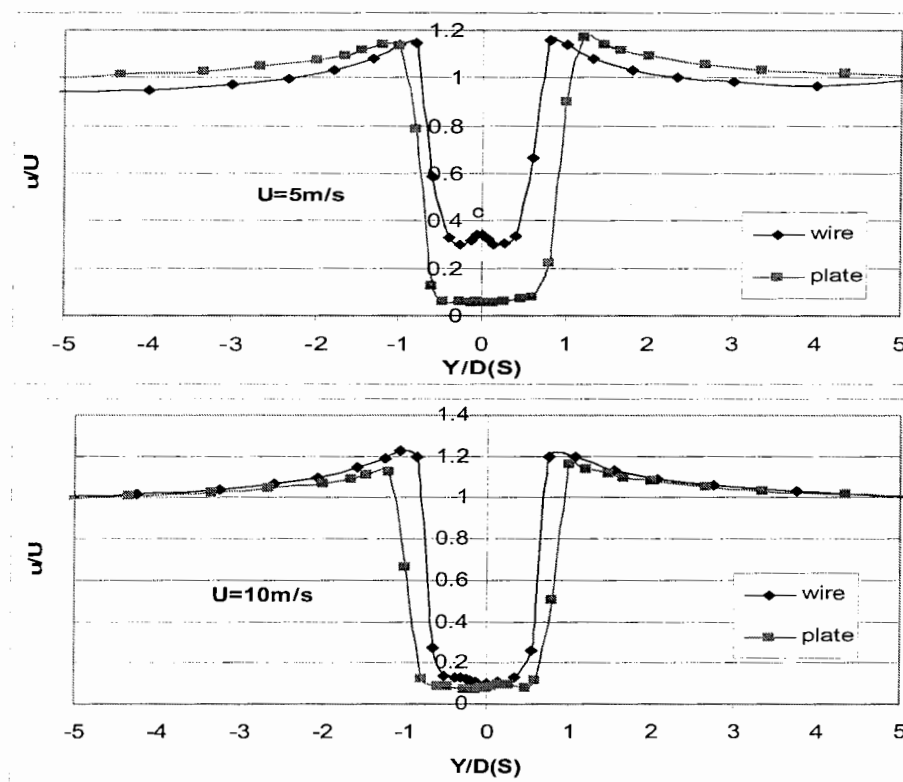
شکل‌های (۹۲) تا (۹۵) پیوست مقایسه دو صفحه با پهنای $S = 1/2 \text{mm}$ و $S = 1/5 \text{mm}$ در توزیع شدت اغتشاشها در فاصله‌های یکسان پایین دست صفحه‌ها برای سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

با افزایش $\frac{X}{S}$ مقادیر ماکزیمم (قله) از بین رفته و تبدیل به یک منحنی قوسی شکل می‌شود. همچنین با افزایش سرعت مقدار شدت اغتشاشها کاهش می‌یابد. مقدار شدت اغتشاش در ناحیه دنباله تقریباً با افزایش S پهنای صفحه، کاهش می‌یابد. همانگونه که در شکل (۹۴) پیوست نشان داده شده است در بعضی سرعتها برای صفحه $S = 1/5 \text{mm}$ ما دارای دو قله هستیم. تغییرات شدت اغتشاشها با زمان زیاد است. می‌توان اختلاف ۲۰٪ آنها را ناشی از تغییرات در خود آزمایش می‌باشد.

با توجه به مقایسه‌هایی که در توزیع شدت اغتشاشها و توزیع سرعت مشاهده شده است صفحه به پهنای $S = 1/5 \text{mm}$ برای اندازه‌گیری جریان معکوس مناسب تر می‌باشد.

۵-۲-۳- مقایسه توزیع سرعت و شدت اغتشاشهای مفتول به قطر $D=1/5\text{mm}$ و صفحه به پهنای $S=1/5\text{mm}$:

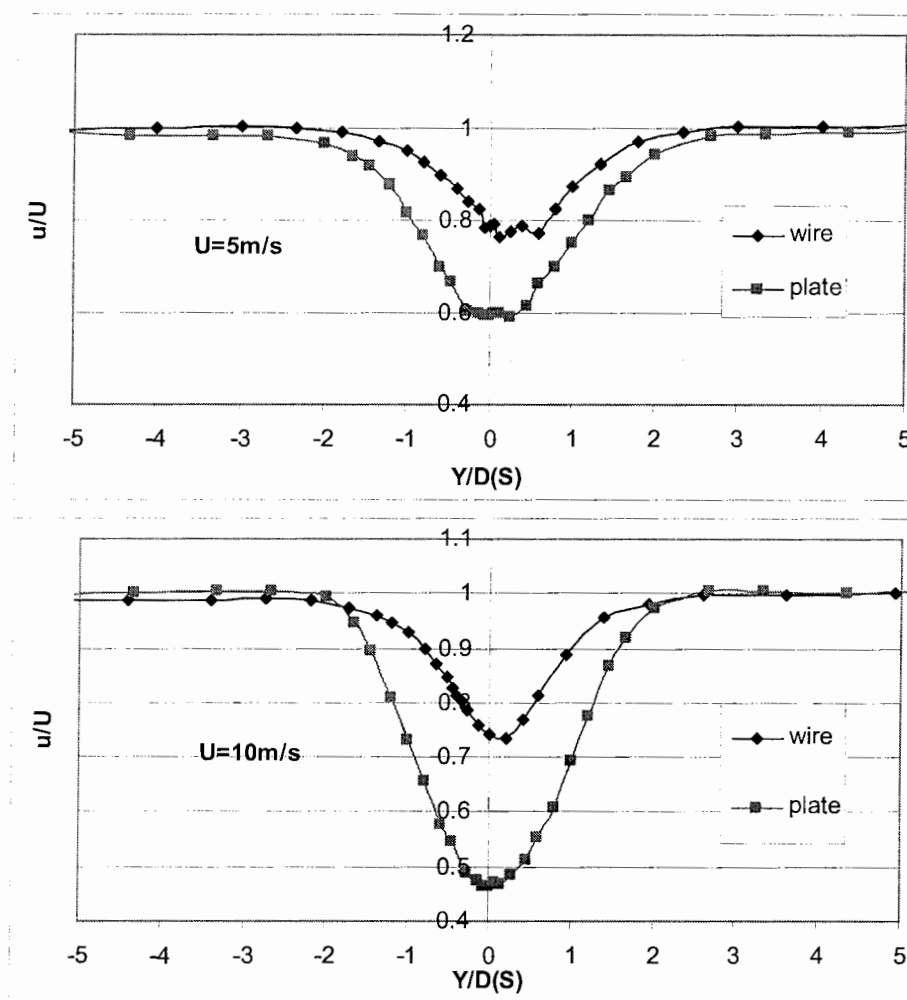
شکل (۵-۴۵) توزیع سرعت جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=1/5\text{mm}$ و صفحه به پهنای $S=1/5\text{mm}$ در سرعتهای $U=5\text{m/s}$ و $U=10\text{m/s}$ مقایسه می‌شوند. همانطور که در شکل نشان داده شده است، مقدار نقاط ماکزیمم Over flow برای مفتول و صفحه تقریباً برابر بوده ولی ناحیه دنباله برای مفتول در سرعت $U=5\text{m/s}$ ضعیفتر و همچنین پهنای آن در $X/D=1$ نیز کمتر می‌باشد. در سرعت $U=10\text{m/s}$ نیز دنباله تشکیل شده از صفحه پهن تر از دنباله مفتول می‌باشد.



شکل (۵-۴۵) توزیع سرعت جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=1/5\text{mm}$ و صفحه به پهنای $S=1/5\text{mm}$ در سرعتهای $U=5\text{m/s}$

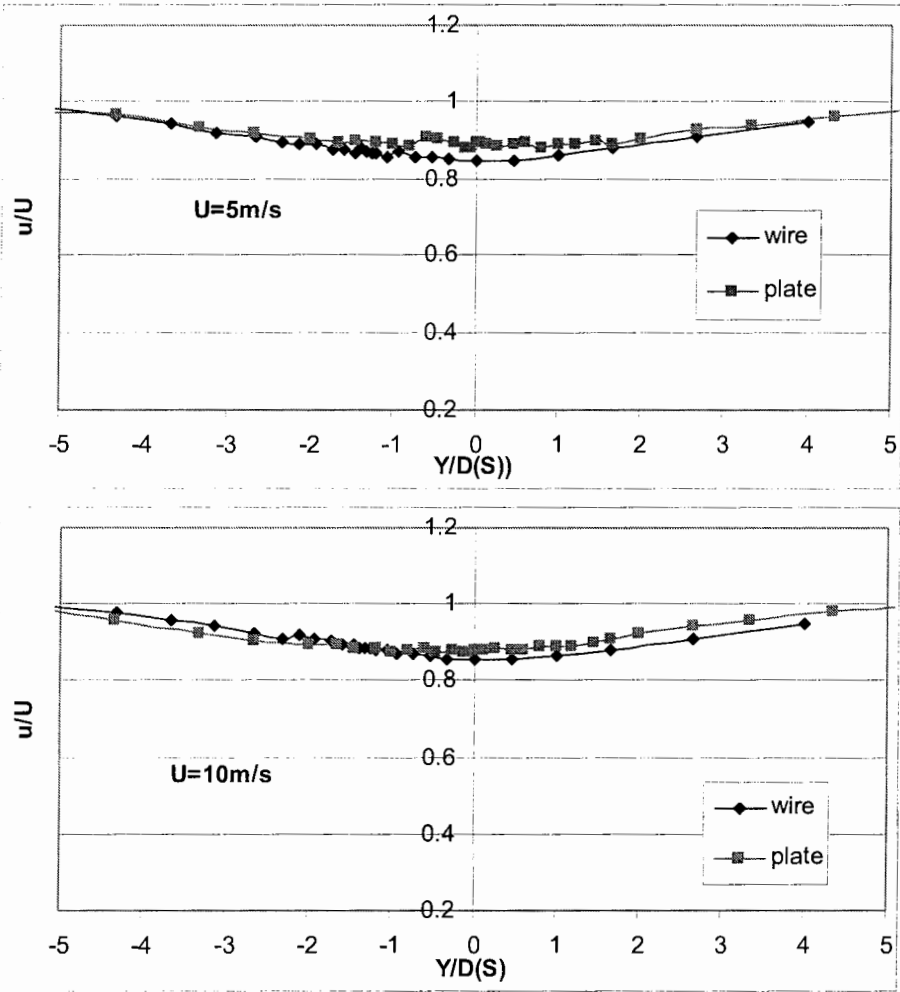
$$U=10\text{m/s} \text{ در فاصله } X/D=1$$

شکل (۴۶-۵) توزیع سرعت جریان هوا پایین دست مفتول و صفحه $\left(\frac{X}{D} = 9/3\right)$ ذکر شده در سرعت‌های $U=5\text{m/s}$ و $U=10\text{m/s}$ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌کنید با افزایش پایین دست به $\frac{X}{D} = 9/3$ ناحیه دنباله ضعیف‌تر شده ولی هنوز صفحه دارای ناحیه دنباله قویتر بوده ولی پهنای دنباله تقریباً یکسان می‌باشد.



شکل (۴۶-۵) توزیع سرعت جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=1/5\text{mm}$ و صفحه به پهنای $S=1/5\text{mm}$ در سرعت‌های $U=5\text{m/s}$ و

$$U=10\text{m/s} \text{ در فاصله } \frac{X}{D} = 9.3$$



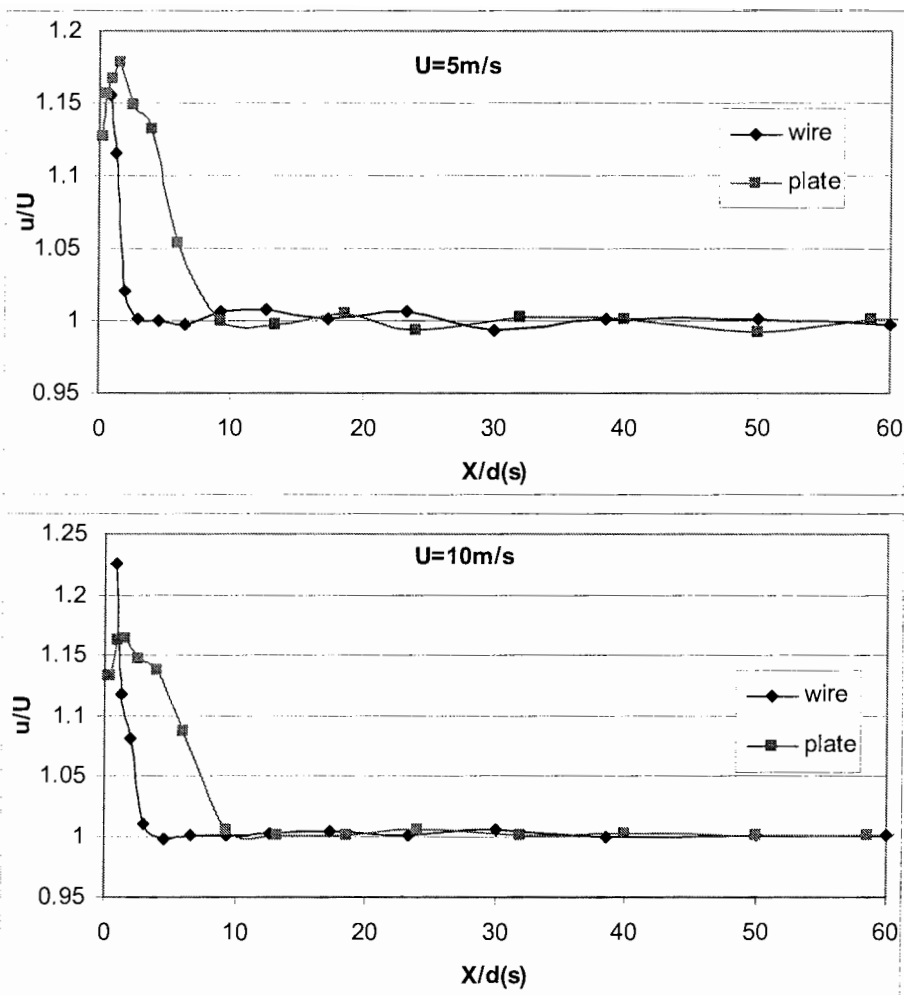
شکل (۴۷-۵) توزیع سرعت جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=1/5\text{mm}$ و صفحه به پهنای $S=1/5\text{mm}$ در سرعتهای $U=5\text{m/s}$ و

$$U=10\text{m/s} \text{ در فاصله } X/D = 50$$

همانطور که از شکل (۴۷-۵) استنباط می‌شود با افزایش پایین دست ناحیه دنباله در ابتدا برای صفحه قویتر بوده $\left(\frac{X}{D} = 9/3\right)$ ولی با افزایش بیشتر در $\frac{X}{D} = 50$ توزیع سرعت در مفتول و صفحه با یکدیگر یکسان می‌شود.

بنابراین استفاده از صفحه برای اندازه‌گیری جریان معکوس بین دو سنسور مناسبتر خواهد بود.

شکل (۴۸-۵) توزیع مقادیر ماکزیمم سرعت Over flow در ناحیه دنباله پایین دست مفتول و صفحه ذکر شده در سرعت $U = 5 \text{ m/s}$ و $U = 10 \text{ m/s}$ وجود دارد. برای هر دو سرعت مقادیر Over flow برای مفتول تا $\frac{X}{D} = 4$ و برای صفحه تا $\frac{X}{D} = 10$ وجود دارد. این مقدار برای مفتول سریعتر و در $\frac{X}{D}$ کمتر از بین می‌رود. بنابراین برای کالیبراسیون جریان سنج سیم‌داغ در سرعت‌های کم با استفاده از روش گردابه‌های کارمن (Karman Vortex) استفاده از مفتول بهتر می‌باشد.



شکل (۴۸-۵) توزیع مقادیر ماکزیمم سرعت *Over flow* در ناحیه دنباله پایین دست مفتول و صفحه ذکر شده در سرعت $U=5\text{m/s}$ و

$$U=1.0\text{m/s}$$

شکل (۴۹-۵) مقادیر مینیمم سرعت در $Y/D(S)=0$ ناحیه دنباله پایین دست مفتول و صفحه ذکر شده در

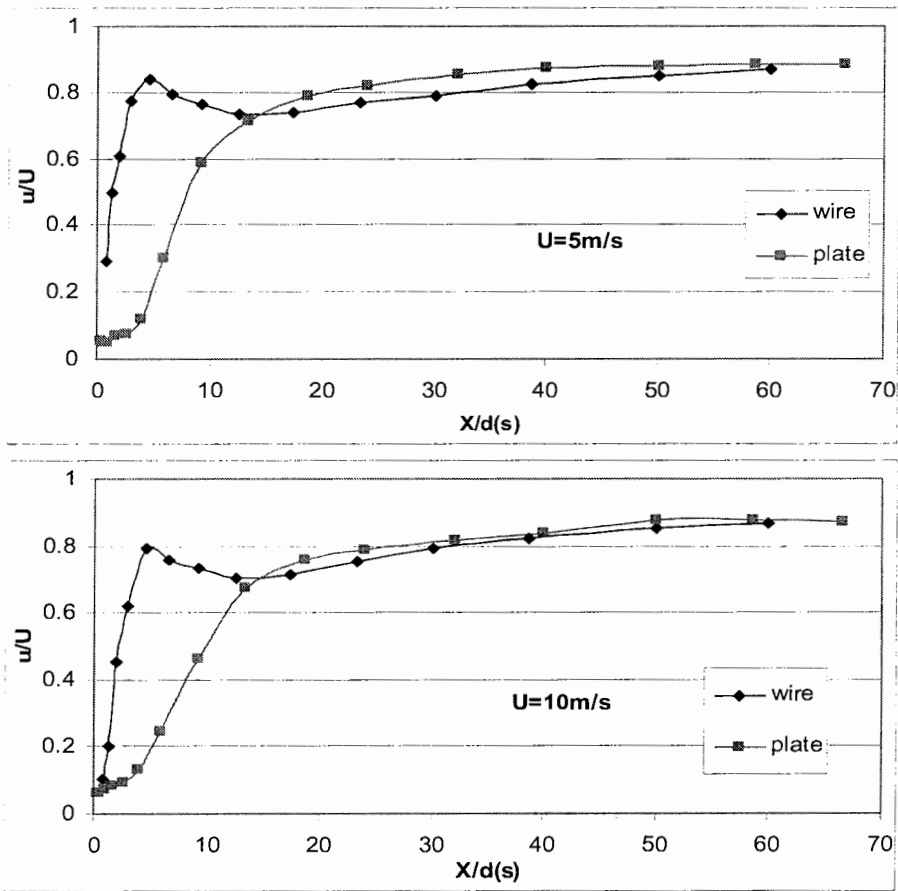
سرعتهای $U=5\text{m/s}$ و $U=1.0\text{m/s}$ را نشان می‌دهد.

ناحیه دنباله در صفحه تا $X/D=5$ بسیار قویتر از مفتول می‌باشد و تا ناحیه بیشتری در پایین دست

گسترش یافته است. از $X/D=15$ به بعد تأثیر مفتول و صفحه در ناحیه دنبال یکسان می‌شود ولی قبل از

$\frac{X}{D} = 10$ دنباله مفتول قویتر می‌باشد بنابراین برای اندازه‌گیری جریان معکوس استفاده از صفحه بین دو

سنسور مناسب می‌شود.



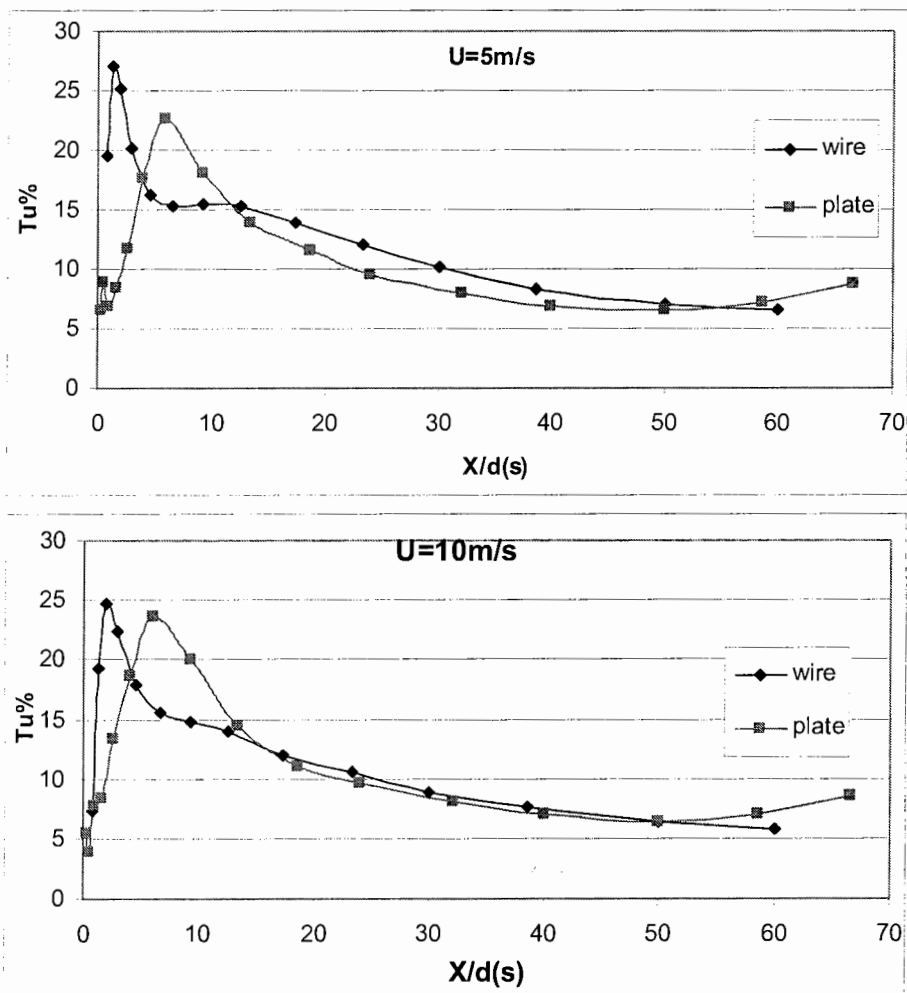
شکل (۴۹-۵) مقادیر مینیمم سرعت در $\frac{Y}{D(S)} = 0$ ناحیه دنباله پایین دست مفتول و صفحه ذکر شده در سرعتهای $U = 5 \text{ m/s}$ و

$$U = 10 \text{ m/s}$$

شکل‌های (۹۶) تا (۹۸) پیوست نیز توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا پایین دست مفتول و صفحه

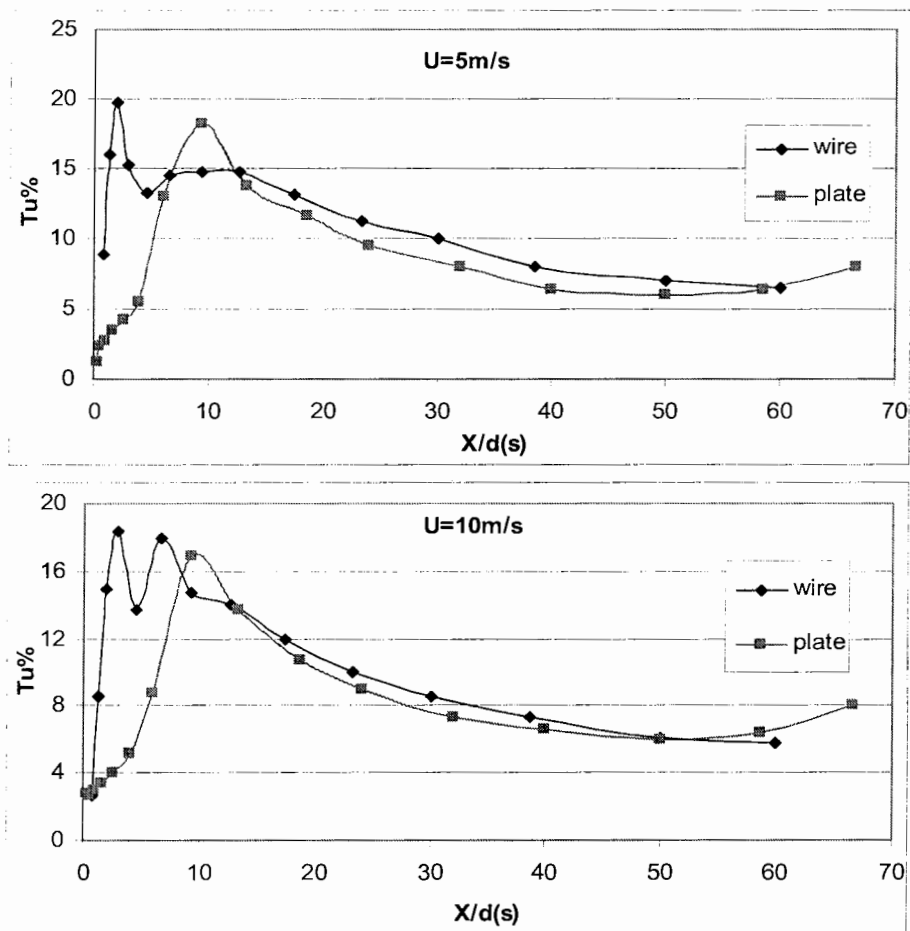
در $\frac{X}{D} = 1$ و $\frac{X}{D} = 9/3$ و $\frac{X}{D} = 50$ در سرعتهای $U = 5 \text{ m/s}$ و $U = 10 \text{ m/s}$ را با یکدیگر مقایسه می‌کند.

شکل (۵-۵) تغییرات ماکزیمم شدت اغتشاشها در پایین دست مفتول و صفحه در سرعت‌های $U=5\text{m/s}$ و $U=10\text{m/s}$ را نشان می‌دهد. همانگونه که بیان شد ماکزیمم شدت اغتشاشها برای مفتول نزدیکتر به المان و برای صفحه ماکزیمم شدت اغتشاشها پایین‌تر و در $\frac{X}{D}$ بیشتر اتفاق می‌افتد. بنابراین برای اندازه‌گیری جریان معکوس به علت نزدیک بودن سنسور به المان استفاده از صفحه مناسب می‌باشد.



شکل (۵-۵) تغییرات ماکزیمم شدت اغتشاشها در پایین دست مفتول و صفحه در سرعت‌های $U=5\text{m/s}$ و $U=10\text{m/s}$

شکل (۵-۵۱) توزیع شدت اغتشاشهای جریان هوا در $Y/D(S)=0$ ناحیه دنباله پایین دست مفتول و صفحه را در سرعتهای $U=5\text{m/s}$ و $U=10\text{m/s}$ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌کنید در $0 < \frac{X}{D} < 5$ کمترین اغتشاش را در ناحیه دنباله داریم. از شکل‌های (۹۶) و (۹۸) پیوست می‌توان دریافت که با افزایش پایین دست مقدار شدت اغتشاشها کاهش می‌یابد و از $\frac{X}{D} > 10$ تأثیر مفتول و صفحه بر روی شدت اغتشاش جریان هوا یکسان است.



شکل (۵-۵۱) توزیع شدت اغتشاشهای جریان هوا در $Y/D(S)=0$ ناحیه دنباله پایین دست مفتول و صفحه را در سرعتهای $U=5\text{m/s}$ و

$U=10\text{m/s}$

۵-۲-۴- اثر دو سنسور فیلم‌داغ:

همانگونه که گفته شد برای اندازه‌گیری جریان معکوس از دو سنسور که المانی مانند مفتول و یا صفحه بین آنها قرار می‌گیرد می‌توان استفاده کرد. حال اگر جریان آرام باشد با استفاده از دو سنسور فیلم‌داغ در مسی می‌توان جریان معکوس را تشخیص داد در این قسمت اثر متقابل دو سنسور فیلم‌داغ بر روی یکدیگر را بررسی می‌کنیم:

برای بررسی آزمایشات انجام شده در این قسمت سنسور اول را ثابت و سنسور دوم را نسبت به سنسور اول در جهات مختلف X (پایین دست جریان) و Y (عمود بر راستای جریان) حرکت داده و جریان هوا را با استفاده از جریان سنج سیم‌داغ بوسیله سنسور دوم اندازه‌گیری می‌کنیم و همچنین اندازه‌گیری سرعت جریان هوا هنگامیکه سنسور فیلم‌داغ اول (بالا دست) سرد و یا گرم می‌باشد اندازه‌گیری می‌شود. در این حالت جریان هوا تحت تاثیر دنباله سنسور اول قرار گرفته و همچنین دنباله گرمایی ناشی از سنسور بالا دست بر روی نرخ انتقال حرارت سنسور دوم (پایین دست) تاثیر می‌گذارد. در این حالت با توجه به اینکه نرخ انتقال حرارت از سنسور از سیال طبق معادله زیر تعریف می‌شود:

$$Q = hA(\Delta T) \quad (۱-۵)$$

که ضریب جابجایی اجباری که بستگی به سرعت جریان هوا دارد، A ، سطح جانبی سنسور فیلم‌داغ و ΔT اختلاف دمای سنسور و جریان هوا است. با توجه به رابطه ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم‌داغ و سرعت جریان سیال طبق معادله (king) خواهیم داشت:

$$E^2 = A + BU^n \quad (۲-۵)$$

طبق معادله بالا افزایش دمای محیط سبب کاهش ولتاژ خروجی جریان سنج سیم‌داغ شده و در نتیجه کاهش سرعت اندازه‌گیری را در بر خواهد داشت.

۵-۲-۴-۱- بررسی توزیع سرعت در جهت Y (عمود بر راستای جریان):

اندازه‌گیری سرعت در جهت Y را در سه فاصله $X/D = 8, X/D = 24, X/D = 40$ وقتی که سنسور فیلم‌داغ اول سرد و یا گرم است را در دو سرعت $U = 10 \text{ m/s}$ و $U = 20 \text{ m/s}$ انجام داده و توزیع سرعت در منحنی‌ها با استفاده از سرعت جریان آزاد U بی‌بعد شده‌است.

شکل (۵-۲۲) توزیع سرعت جریان‌های اندازه‌گیری شده بوسیله سنسور دوم در جهت Y در پایین‌دست سنسور اول در فاصله‌های $X/D = 8, X/D = 24, X/D = 40$ وقتی که سنسور اول سرد و گرم است را در سرعت $U = 10 \text{ m/s}$ نشان می‌دهد همانطور که مشاهده می‌شود کاهش سرعت ناشی از سنسور اول وقتی که آن سرد است به مراتب کمتر از حالتی است که سنسور گرم است در $X/D = 8$ وقتی که سنسور گرم است، کمترین مقدار سرعت $\frac{u}{U} = 0.185$ است. ولی وقتی سنسور سرد است، $\frac{u}{U} = 0.189$ می‌باشد. طبق معادله (۵-۲) در صورتیکه دمای محیط افزایش یابد جریان سنج سیم‌داغ ولتاژ کمتری را نشان می‌دهد سرعت اندازه‌گیری شده کمتر خواهد بود. و در فاصله $X/D = 24$ وقتی که سنسور اول گرم می‌باشد کمترین سرعت $\frac{u}{U} = 0.186$ می‌باشد.

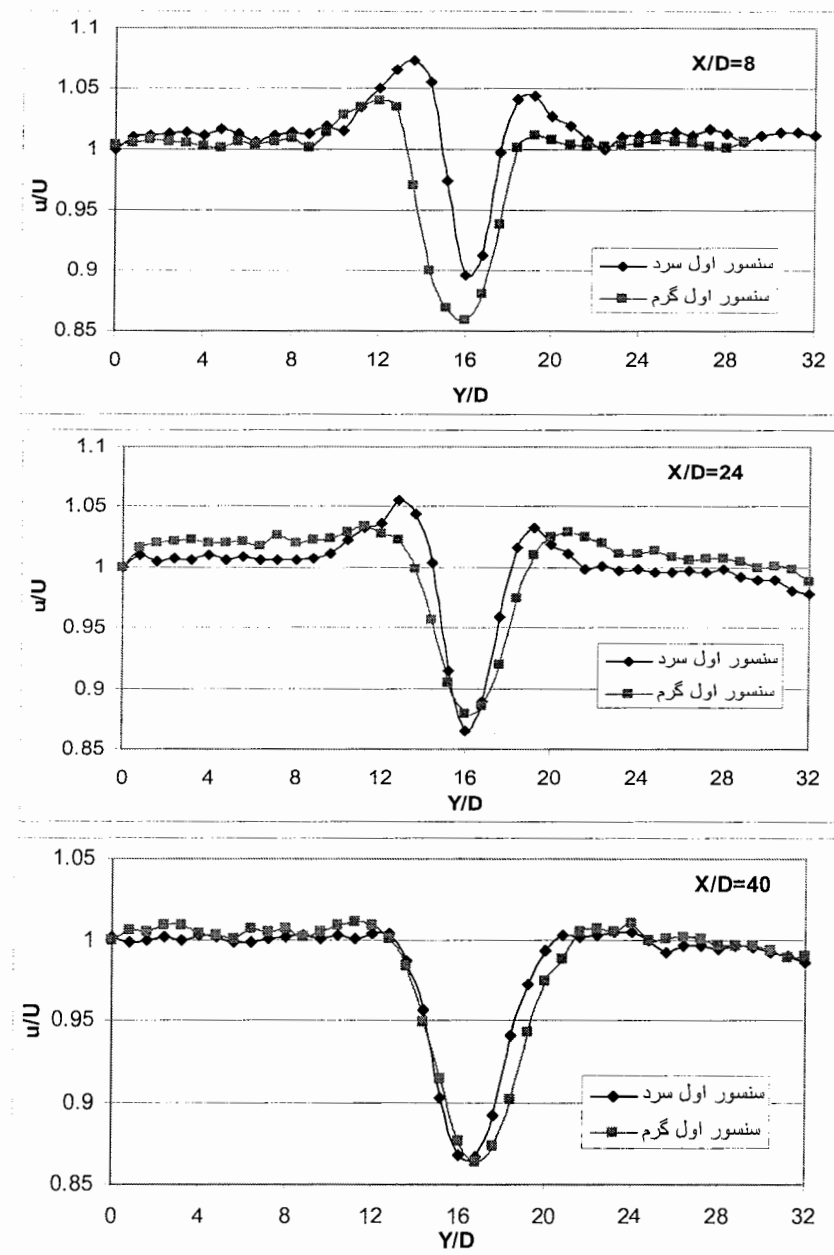
کاهش سرعت ناشی از سنسور اول وقتی که آن سنسور سرد می‌باشد در مقایسه با حالتی که آن سنسور گرم است دارای اختلاف اندکی می‌باشد.

همانطور که در شکل مشاهده می‌کنیم، در $X/D = 40$ وقتی که سنسور روشن (گرم) و یا خاموش (سرد)

می‌باشد $\frac{u}{U} = 0.186$ است، می‌توان نتیجه گرفت که هنگامیکه جریان هوا $U = 10 \text{ m/s}$ می‌باشد تقریباً در

فاصله $X/D = 24$ به بعد اثر حرارتی سنسور اول در کاهش سرعت اندازه‌گیری شده بوسیله سنسور دوم از

بین می‌رود و اثر حرارتی در مقایسه با اثر دنباله آن ناچیز می‌باشد.



شکل (۵۲-۵) توزیع سرعت جریان هوای اندازه‌گیری شده بوسیله سنسور دوم در جهت پایین دست سنسور اول در سرعت

$$U = 10 \text{ m/s}$$

شکل (۵۳-۵) توزیع سرعت جریان هوای اندازه‌گیری شده بوسیله سنسور دوم در جهت Y در پایین دست سنسور اول در فاصله‌های $X/D = 8, X/D = 24, X/D = 40$ وقتی که سنسور اول سرد و گرم است را در سرعت $U = 20 \text{ m/s}$ نشان می‌دهد همانطور که مشاهده می‌شود وقتی که سنسور اول گرم می‌باشد $\frac{u}{U} = 0.18$ است و وقتی که سنسور اول سرد است $\frac{u}{U} = 0.183$ می‌باشد.

در $X/D = 24$ این شکل وقتی که سنسور اول گرم می‌باشد $\frac{u}{U} = 0.175$ است و وقتی که آن سرد است $\frac{u}{U} = 0.182$ می‌باشد که در مقایسه با حالتی که سنسور در فاصله $X/D = 8$ قرار دارد، دارای اختلاف بیشتری می‌باشد. که اثر حرارتی نسبت به دنباله در این فاصله اثر بیشتری را دارا می‌باشد.

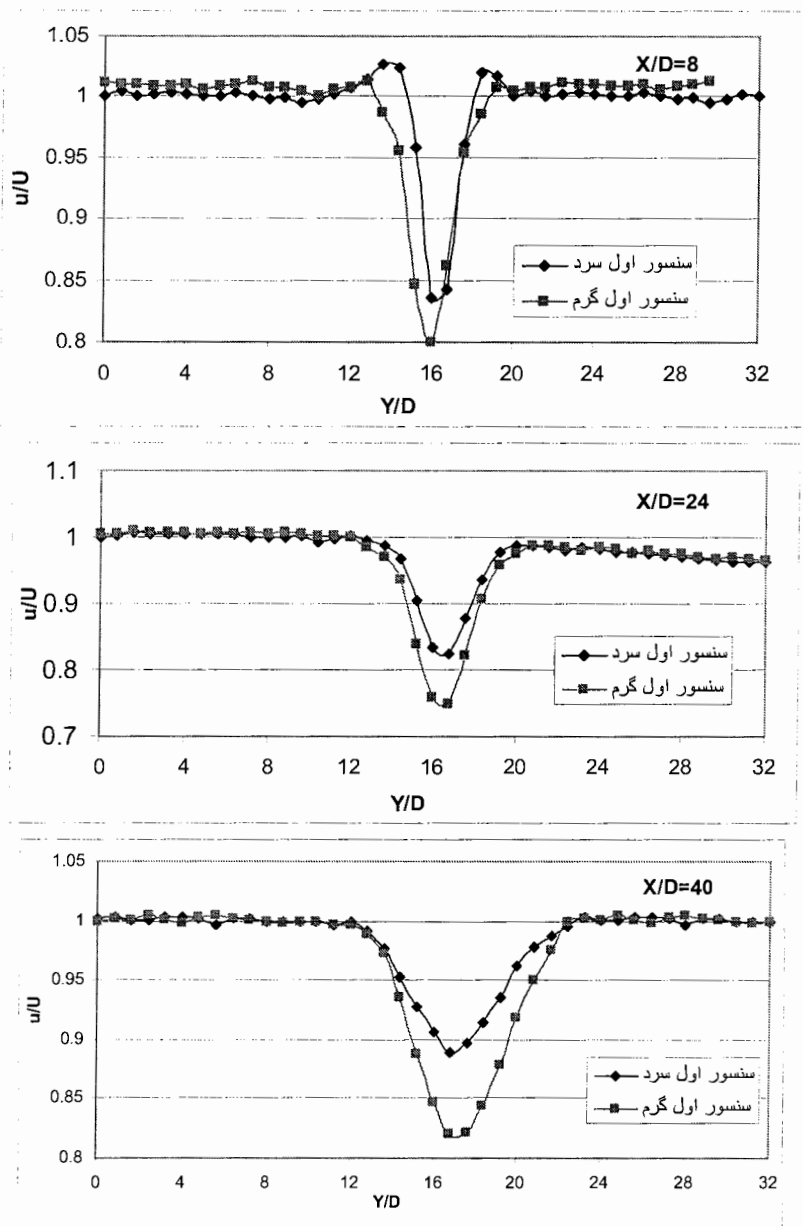
در $X/D = 40$ وقتی که سنسور اول گرم می‌باشد $\frac{u}{U} = 0.182$ است و وقتی که سنسور اول سرد می‌باشد $\frac{u}{U} = 0.188$ است. در این فاصله اثر حرارتی دارای اثر کمتری نسبت به حالت قبل می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که هنگامیکه جریان هوا $U = 20 \text{ m/s}$ باشد در فاصله حدود $X/D = 24$ اثر حرارتی دارای بیشترین اثر می‌باشد و برای اندازه‌گیری در $U = 20 \text{ m/s}$ اصلاً مکان مناسبی نمی‌باشد.

شکل (۵۴-۵) منحنی توزیع سرعت جریان هوا در نقاط $X/D = 8, X/D = 24, X/D = 40$ پایین دست سنسور اول هنگامیکه سنسور خاموش (سرد) است را در سرعت‌های $U = 10 \text{ m/s}$ و $U = 20 \text{ m/s}$ نشان می‌دهد. در شکل با استفاده از سرعت جریان آزاد U بی‌بعد شده است. شکل فوق ناحیه دنباله ناشی از سنسور اول را بخوبی نشان می‌دهد.

توزیع سرعت در $U = 20 \text{ m/s}$ مشابه سرعت $U = 10 \text{ m/s}$ است، ولی مقدار کاهش توزیع سرعت جریان هوا در ناحیه دنباله ($\frac{u}{U} = 0.182, U = 20 \text{ m/s}$) بیشتر از حالت ($\frac{u}{U} = 0.1867, U = 10 \text{ m/s}$) می‌باشد. همچنین

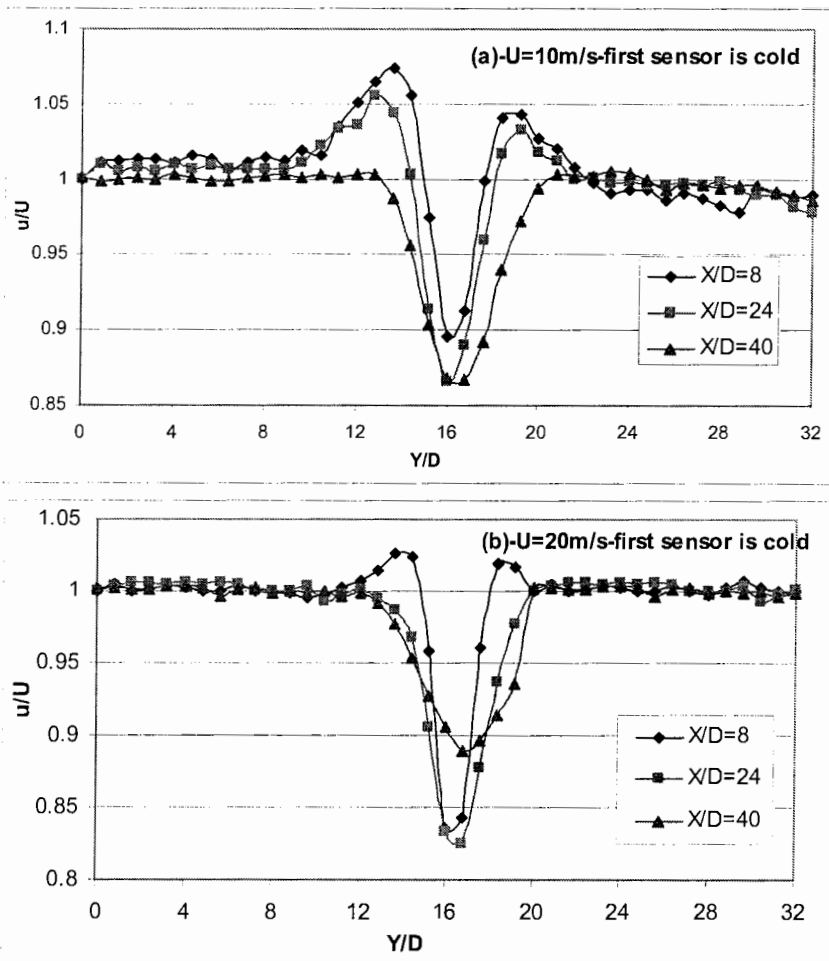
در $U=10\text{ m/s}$ در فاصله $X/D=24$ دارای افزایش سرعتی در نزدیکی دنباله سنسور هستیم در $Y/D=3.2$

و $X/D=24$ ، $u/U=1.05$ است ولی در $U=20\text{ m/s}$ این اثر در $X/D=24$ از بین رفته است.



شکل (۵-۵) توزیع سرعت جریان هوای اندازه‌گیری شده بوسیله سنسور دوم در جهت پایین‌دست سنسور اول در سرعت

$$U=20\text{ m/s}$$

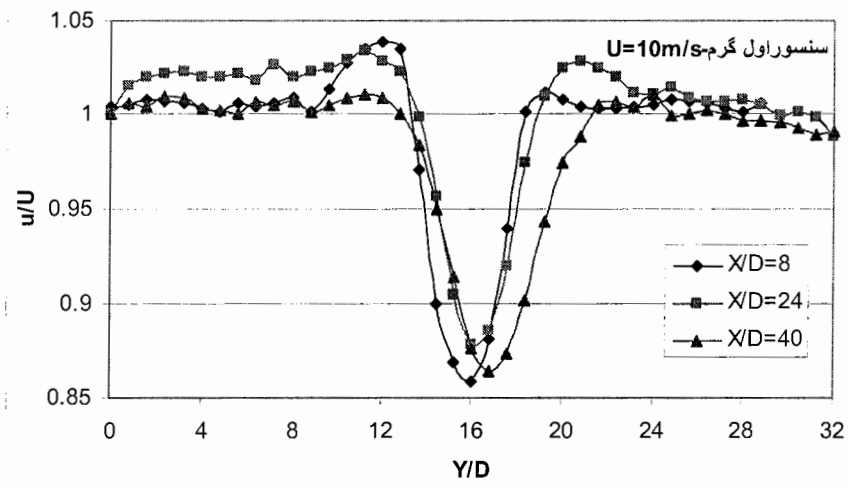


شکل (۵۴-۵) توزیع سرعت جریان هوا پایین دست سنسور اول هنگامیکه سنسور خاموش (سرد) است در سرعتهای $U=10\text{ m/s}$ و $U=20\text{ m/s}$

شکل (۵۵-۵) منحنی توزیع سرعت جریان هوا در نقاط $X/D=8, X/D=24, X/D=40$ پایین دست سنسور اول هنگامیکه سنسور روشن (گرم) است را در سرعتهای $U=10\text{ m/s}$ و $U=20\text{ m/s}$ نشان می‌دهد. شکل با استفاده از سرعت جریان آزاد U بی‌بعد شده است. شکل فوق ناحیه دنباله ناشی از سنسور اول را بخوبی نشان می‌دهد. توزیع سرعت برای $U=20\text{ m/s}$ مشابه سرعت $U=10\text{ m/s}$ است ولی مقدار کاهش توزیع

سرعت جریان هوا در ناحیه دنباله ($U=20\text{ m/s}$) ($\frac{u}{U}=0.74$) ($X/D=24$) بیشتر از حالت ($U=10\text{ m/s}$)
 ($\frac{u}{U}=0.87$) ($X/D=24$) می باشد.

از شکل‌های (۵-۵۴) و (۵-۵۵) می توان نتیجه گرفت که با افزایش سرعت در ناحیه دنباله ما دارای کاهش
 $\frac{u}{U}$ در ناحیه دنباله هستیم که بیشترین کاهش $\frac{u}{U}$ در $X/D=24$ در سرعت $U=20\text{ m/s}$ اتفاق می افتد.
 همچنین با افزایش فاصله از $X/D=24$ نیز دارای کاهش $\frac{u}{U}$ هستیم.



شکل (۵-۵۵) توزیع سرعت جریان هوا پایین دست سنسور اول هنگامیکه سنسور روشن (گرم) است در سرعت‌های $U=10\text{ m/s}$

شکل (۵-۵۶) توزیع سرعت جریان هوا اندازه گیری شده بوسیله سنسور دوم در جهت Y در فاصله $X/D=8$
 پایین دست سنسور اول در سرعت‌های $U=10\text{ m/s}$ و $U=20\text{ m/s}$ را وقتی که سنسور اول سرد و یا گرم است
 نشان می دهد. شکل با توجه به سرعت جریان آزاد U بی بعد شده است.

در این فاصله وقتی سنسور اول سرد است در ($U=10\text{ m/s}$) ، $\frac{u}{U}=0.89$ و $U=20\text{ m/s}$ ، $\frac{u}{U}=0.83$ می باشد.

در فاصله $X/D=8$ پایین دست سنسور اول وقتی که سنسور اول روشن (گرم) است در $U=10\text{ m/s}$ ،
 $\frac{u}{U}=0.185$ و $U=20\text{ m/s}$ ، $\frac{u}{U}=0.18$ می باشد.

همانطور که از این دو شکل مشخص است یکی با افزایش سرعت U و همچنین طبق معادله (۵-۲) با گرم شدن سنسور اول ما در فاصله $X/D=8$ دارای کاهش $\frac{u}{U}$ هستیم.

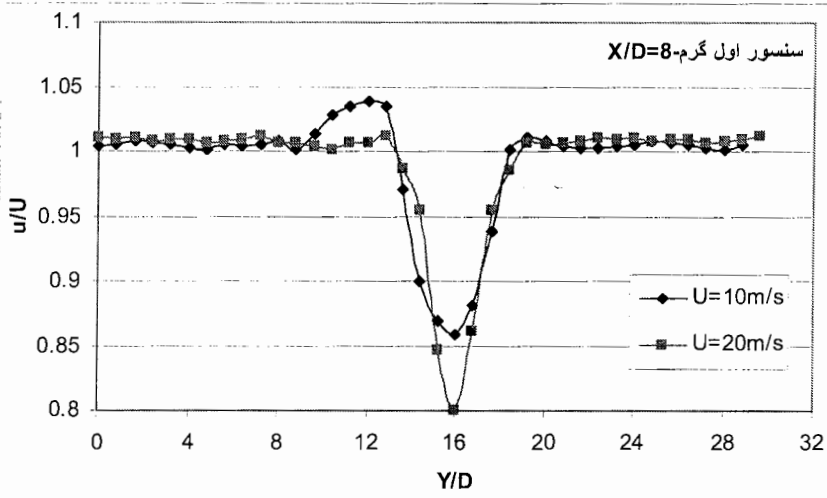
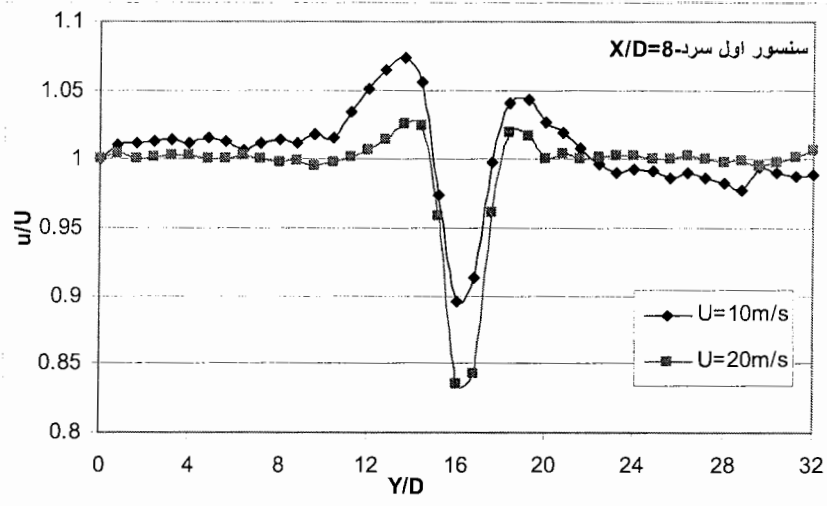
همچنین همانطور که از دو شکل مشخص است وقتی که سنسور اول روشن (گرم) است نسبت به وقتی که سنسور اول سرد است را دارا هستیم.

در $U=10\text{ m/s}$ وقتی که سنسور اول گرم است دارای پهنای $Y/D=6.4$ و وقتی که سنسور سرد است

دارای پهنای $Y/D=4.8$ هستیم و در $U=20\text{ m/s}$ وقتی که سنسور اول گرم است دارای پهنای $Y/D=6.4$

و وقتی که سنسور سرد است دارای پهنای $Y/D=4$ هستیم.

در صورتیکه در این فاصله $X/D=8$ با افزایش سرعت پهنای دنباله تغییری نمی کند.



شکل (۵۶-۵) توزیع سرعت جریان هوا در فاصله $X/D = 8$ پایین دست سنسور اول وقتی که سنسور اول سرد و یا گرم است در

سرعتهای $U = 10 \text{ m/s}$ و $U = 20 \text{ m/s}$

شکل (۵۷-۵) توزیع سرعت جریان هوا اندازه گیری شده بوسیله سنسور دوم در جهت Y در فاصله

$X/D = 24$ پایین دست سنسور اول در سرعتهای $U = 10 \text{ m/s}$ و $U = 20 \text{ m/s}$ وقتی که سنسور اول سرد و یا

گرم است نشان می دهد. شکل با توجه به سرعت جریان آزاد U بی بعد شده است.

شکل فوق ناحیه دنباله ناشی از سنسور اول را بخوبی نشان می‌دهد. در فاصله $X/D = 24$ وقتی سنسور اول

سرد است در $(\frac{u}{U} = 0.182, U = 20 \text{ m/s}$ و $\frac{u}{U} = 0.186, U = 10 \text{ m/s}$) می‌باشد.

در $X/D = 24$ وقتی که سنسور اول گرم است $(\frac{u}{U} = 0.175, U = 20 \text{ m/s}$ و $\frac{u}{U} = 0.187, U = 10 \text{ m/s}$)

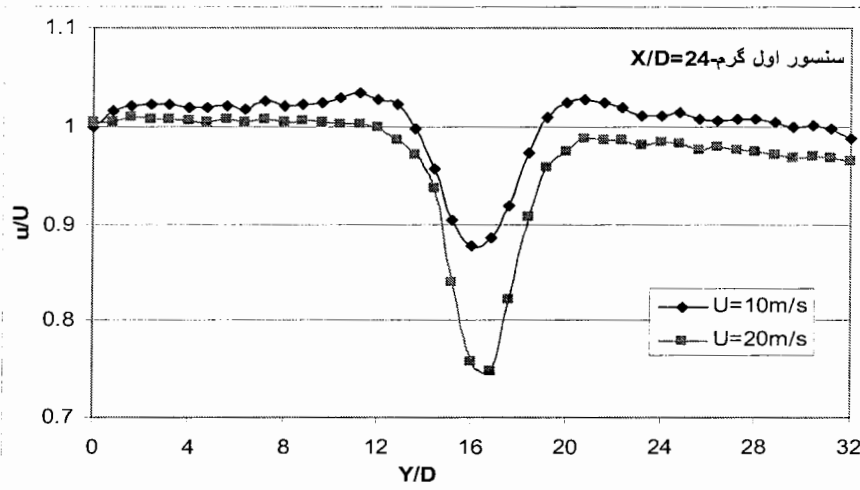
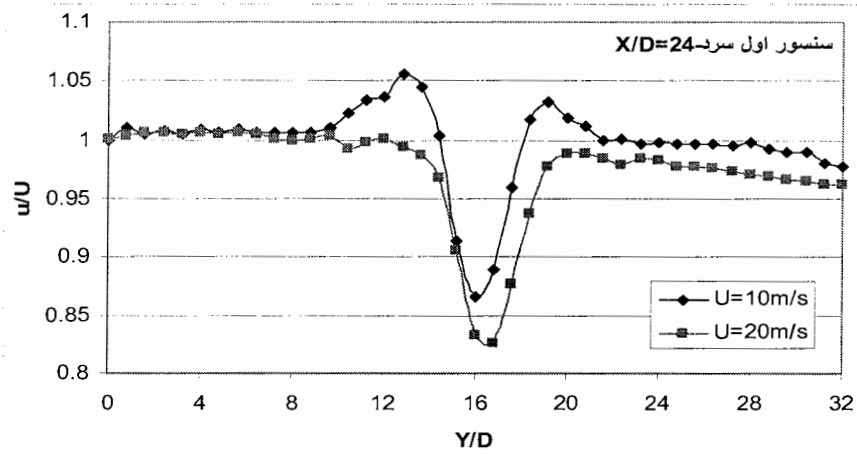
می‌باشد. در این فاصله $X/D = 24$ نیز همانند شکل (۴۶-۵) با افزایش سرعت و در سرعت $U = 20 \text{ m/s}$ با

گرم شدن سنسور اول با کاهش $\frac{u}{U}$ روبرو هستیم ولی در سرعت $U = 10 \text{ m/s}$ در این فاصله با تغییر $\frac{u}{U}$

زیادی روبرو نیستیم پس در این سرعت و در فاصله $X/D = 24$ اثر حرارتی سنسور اول بر سنسور دوم

ناچیز می‌باشد. همچنین در این دو شکل دنباله ناشی از سنسور اول در هر دو حالت گرم و سرد و سرعت

$U = 20 \text{ m/s}$ و $U = 10 \text{ m/s}$ دارای پهنای تقریباً یکسانی می‌باشد.



شکل (۵-۵) توزیع سرعت جریان هوا در فاصله $X/D = 24$ پایین دست سنسور اول وقتی که سنسور اول سرد و یا گرم است در

سرعتهای $U = 10 \text{ m/s}$ و $U = 20 \text{ m/s}$

شکل (۵-۸) توزیع سرعت جریان هوا اندازه گیری شده بوسیله سنسور دوم در جهت Y در فاصله

$X/D = 40$ پایین دست سنسور اول در سرعتهای $U = 10 \text{ m/s}$ و $U = 20 \text{ m/s}$ وقتی که سنسور اول سرد و یا

گرم است نشان می دهد. شکل با توجه به سرعت جریان آزاد U بی بعد شده است.

در فاصله $X/D = 40$ وقتی سنسور اول سرد است در $(\frac{u}{U} = 0.182, U = 20 \text{ m/s}$ و $\frac{u}{U} = 0.186, U = 10 \text{ m/s}$) می باشد.

در $X/D = 40$ وقتی سنسور اول گرم است $(\frac{u}{U} = 0.182, U = 20 \text{ m/s}$ و $\frac{u}{U} = 0.186, U = 10 \text{ m/s}$) می باشد.

وقتی که سنسور اول سرد است با افزایش سرعت از $U = 10 \text{ m/s}$ به $U = 20 \text{ m/s}$ اثر دنباله کمتری می شود و $\frac{u}{U}$

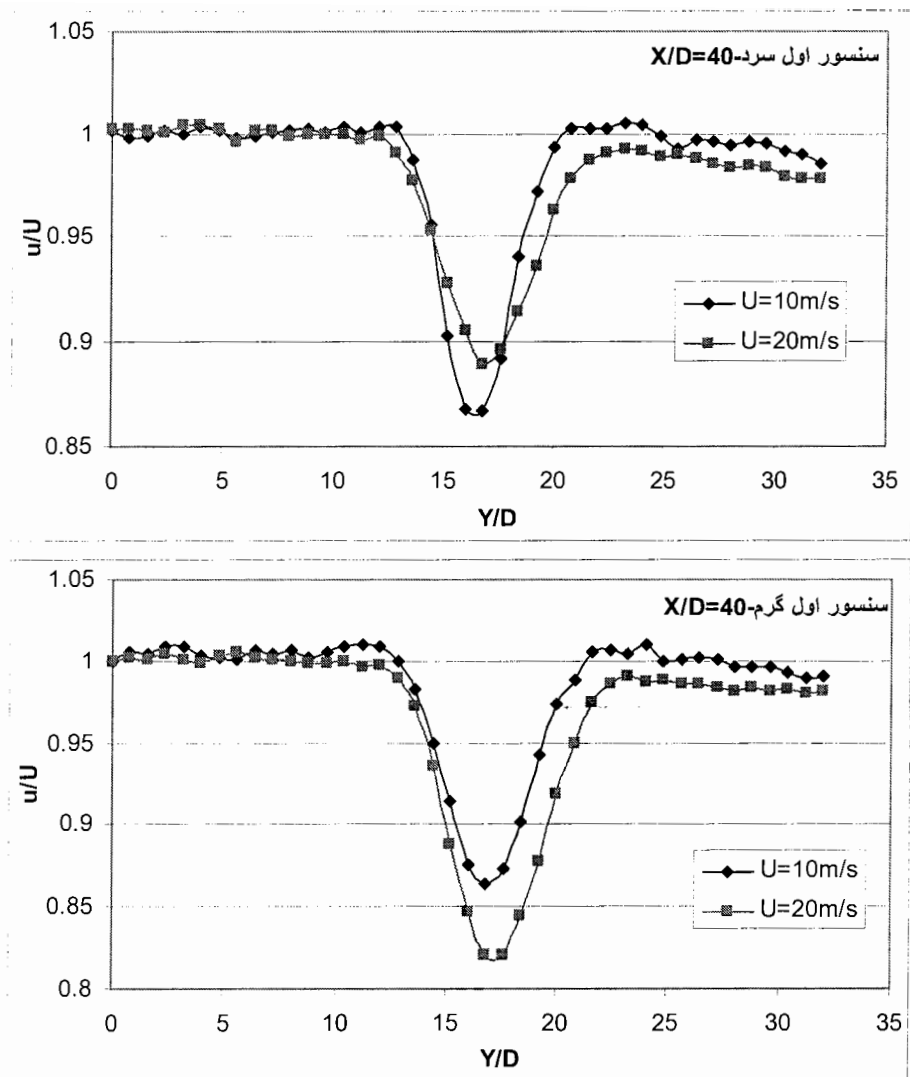
افزایش می یابد ولی وقتی سنسور اول گرم است مانند قبل با افزایش سرعت اثر دنباله بیشتر شده و $\frac{u}{U}$

در پشت سنسور اول کاهش می یابد. همچنین در سرعت $U = 10 \text{ m/s}$ اثر حرارتی سنسور اول در $X/D = 40$

دیده نمی شود و تغییرات $\frac{u}{U}$ بسیار کم می باشد اما $U = 20 \text{ m/s}$ اثر حرارتی باعث کاهش $\frac{u}{U}$ می شود.

در این دو شکل نیز دنباله ناشی از سنسور اول در هر دو حالت گرم و سرد و سرعت $U = 10 \text{ m/s}$ و

$U = 20 \text{ m/s}$ دارای پهنای یکسانی نمی باشد.



شکل (۵-۵۸) توزیع سرعت جریان هوا در فاصله $X/D = 40$ پایین دست سنسور اول وقتی که سنسور اول سرد و یا گرم است در

سرعتهای $U=10\text{ m/s}$ و $U=20\text{ m/s}$

۵-۲-۴-۲- بررسی توزیع سرعت در جهت X (پایین دست جریان):

اندازه‌گیری توزیع سرعت در جهت X در سرتهای $U = 3, 5, 7.5, 12.5, 15 \text{ m/s}$ در دو حالت سنسور سیم‌داغ اول خاموش (سرد) و روشن (گرم) است را انجام دادیم. توزیع سرعت با استفاده از سرعت جریان آزاد U بی‌بعد شده است.

شکل (۵-۵۹) توزیع سرعت جریان هوا اندازه‌گیری شده توسط سنسور پایین دست در حالیکه سنسور

بالا دست سرد و گرم است را نشان می‌دهد. در این حالت سرعت جریان هوا $U = 5 \text{ m/s}$ می‌باشد. همانطور که در شکل نشان داده شده است در حالتیکه سنسور بالا دست سرد می‌باشد به علت وجود دنباله ناشی از سنسور اول (بالادست) سرعت اندازه‌گیری شده توسط جریان سنج سیم‌داغ کمتر از سرعت جریان آزاد می‌باشد. این مقدار در $X/D = 8$ ، $u/U = 0.77$ می‌باشد و هنگامیکه سنسور بالا دست گرم

می‌باشد $u/U = 0.42$ است که این اختلاف ناشی از اثر حرارت سنسور بالادست به سنسور پایین دست

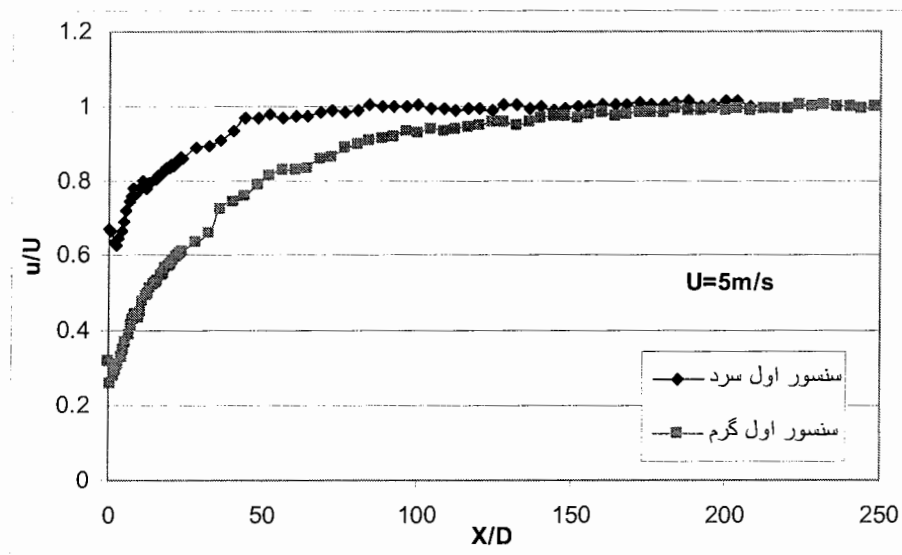
می‌باشد. طبق معادله (۳-۴) در صورتیکه دمای محیط افزایش یابد جریان سنج سیم‌داغ ولتاژ کمتری را نشان می‌دهد و سرعت اندازه‌گیری شده کمتر خواهد بود. مطابق شکل (۵-۵۹) هنگامیکه $X/D = 52$ است

برای حالتیکه سنسور بالا دست سرد است اثر دنباله به پایان می‌رسد ولی برای حالتیکه سنسور اول گرم

است به علت وجود اثر حرارتی در $X/D = 84$ و $u/U = 0.9$ می‌باشد که حدود 0.09 کاهش سرعت

اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. هنگامیکه $X/D = 160$ است، اثر حرارتی ناشی از سنسور اول نیز وجود

ندارد.

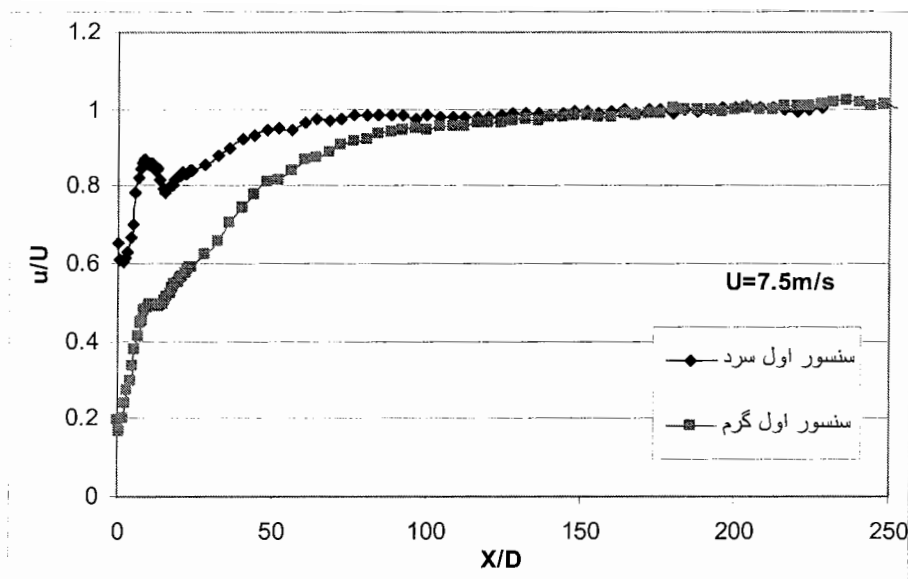


شکل (۵-۵۹) توزیع سرعت جریان هوای اندازه‌گیری شده توسط سنسور پایین دست در حالیکه سنسور بالا دست سرد و گرم است در

$$U = 5 \text{ m/s}$$

شکل (۵-۶۰) توزیع سرعت جریان هوای اندازه‌گیری شده برای $U = 7/5 \text{ m/s}$ در حالتیکه سنسور بالادست سرد و گرم است را نشان می‌دهد. مطابق شکل هنگامیکه $X/D < 32$ است اثرات ناشی از دنباله سنسور بالادست و اثر دنباله حرارتی به تفکیک قابل تشخیص است. در $X/D = 12$ برای حالتیکه سنسور بالادست سرد است $u/U = 0.183$ اندازه‌گیری شده است. در حالیکه در نقطه فوق وقتی که سنسور بالادست گرم است مقدار $u/U = 0.49$ می‌باشد. که این اختلاف ناشی از اثر دنباله حرارتی است که سنسور اول ایجاد می‌کند.

در $X/D = 96$ اثر حرارتی به پایان می‌رسد و در $X/D = 76$ اثر دنباله ناشی از سنسور اول نیز به پایان می‌رسد.

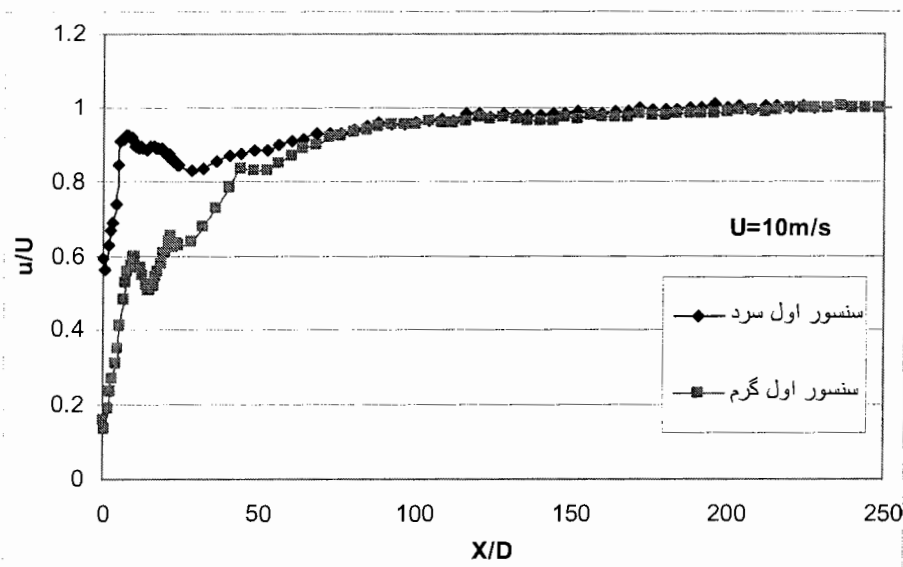


شکل (۵-۶۰) توزیع سرعت جریان هوای اندازه‌گیری شده توسط سنسور پایین دست در حالیکه سنسور بالا دست سرد و گرم است در

$$\text{سرعت } U = 7.5 \text{ m/s}$$

شکل (۵-۶۱) توزیع سرعت جریان هوای اندازه‌گیری شده برای $U = 10 \text{ m/s}$ در حالتی که سنسور بالادست سرد و گرم است را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۵-۵۱) هنگامیکه مقدار $X/D < 40$ است اثرات ناشی از دنباله سنسور بالادست و اثر دنباله حرارتی به تفکیک قابل تشخیص است. در $X/D = 24$ برای حالتیکه سنسور بالادست سرد است $\frac{u}{U} = 0.184$ اندازه‌گیری شده است. در حالیکه در نقطه فوق وقتی که سنسور بالادست گرم است مقدار $\frac{u}{U} = 0.162$ می‌باشد که این اختلاف ناشی از اثر دنباله حرارتی است که سنسور اول ایجاد می‌کند.

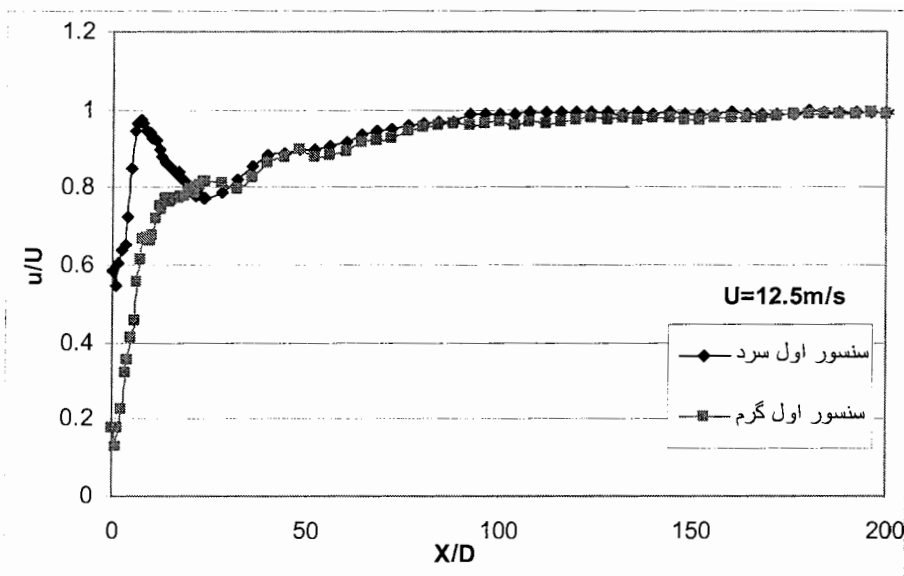
در $X/D = 76$ اثر حرارتی به پایان می‌رسد و در $X/D = 112$ اثرات دنباله ناشی از سنسور اول نیز به پایان می‌رسد.



شکل (۵-۶۱) توزیع سرعت جریان هوای اندازه‌گیری شده توسط سنسور پایین دست در حالیکه سنسور بالا دست سرد و گرم است در

$$\text{سرعت } U = 10 \text{ m/s}$$

شکل (۵-۶۲) توزیع سرعت جریان هوای اندازه‌گیری شده برای $U = 12.5 \text{ m/s}$ در حالتی که سنسور بالادست سرد و گرم است را نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق هنگامیکه مقدار $X/D < 12$ است اثرات ناشی از دنباله سنسور بالادست و اثر دنباله حرارتی به تفکیک قابل تشخیص است. در $X/D = 8$ برای حالیکه سنسور بالادست سرد است $\frac{u}{U} = 0.96$ اندازه‌گیری شده است. در حالیکه در نقطه فوق، وقتی که سنسور بالادست گرم است مقدار $\frac{u}{U} = 0.66$ می‌باشد. که این اختلاف ناشی از اثر دنباله حرارتی است که سنسور اول ایجاد می‌کند. در $X/D = 28$ اثر حرارتی به پایان می‌رسد و در $X/D = 8$ اثرات دنباله ناشی از سنسور اول نیز به پایان می‌رسد.

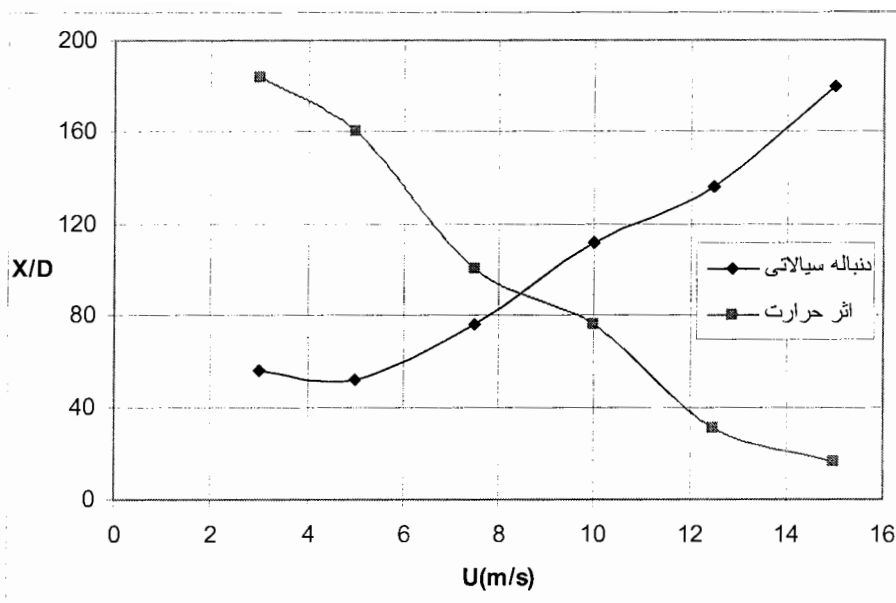


شکل (۵-۶۲) توزیع سرعت جریان هوای اندازه‌گیری شده توسط سنسور پایین دست در حالیکه سنسور بالا دست سرد و گرم است در

$$U = 12.5 \text{ m/s}$$

با توجه به شکل‌های (۵-۵۹) الی (۵-۶۲) می‌توان دریافت که دنباله و اثر حرارتی سنسور اول بستگی به سرعت جریان هوا دارد. شکل (۵-۶۳) تغییرات طول دنباله و اثر حرارتی ناشی از سنسور اول را بر حسب سرعت جریان هوا نشان می‌دهد. همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود طول دنباله سنسور اول با افزایش سرعت افزایش یافته ولی اثر حرارتی ناشی از سنسور بالادست با افزایش سرعت کاهش پیدامی‌کند. لازم به ذکر است هنگامیکه سرعت نزدیک به صفر می‌باشد انتقال حرارت جابجایی آزاد به جابجایی اجباری غلبه می‌کند و اثر حرارتی سنسور بالادست به پایین دست ناچیز می‌شود.

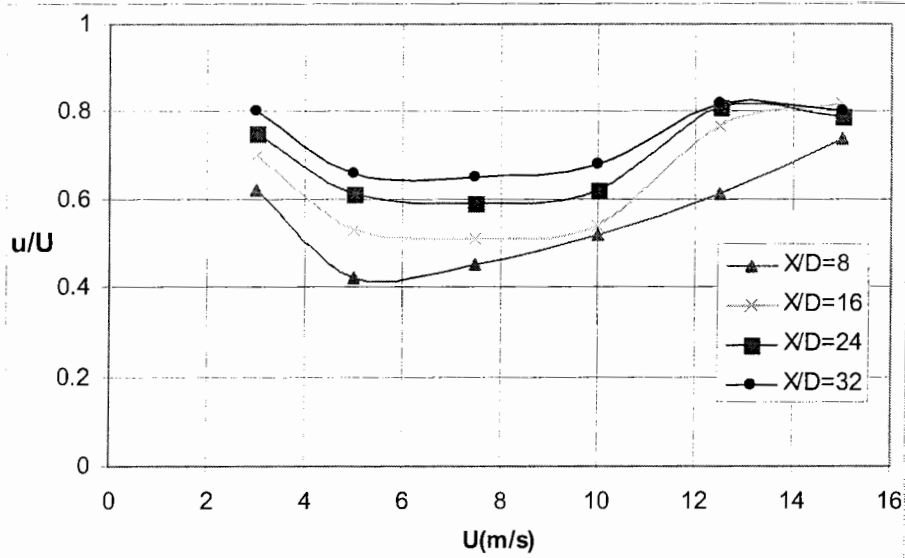
همانطور که در شکل مشخص است دو منحنی در $U = 8 \text{ m/s}$ و $X/D = 96$ به هم برخورد می‌کند که نشان می‌دهد در این نقطه اثر دنباله و اثر حرارتی بر روی هم می‌افتد و در این سرعت و نقطه هر دو اثر در یک زمان از بین می‌روند.



شکل (۵-۶۳) تغییرات طول دنباله سیالاتی و اثر حرارتی ناشی از سنسور اول بر حسب سرعت جریان هوا

شکل (۵-۶۴) تاثیر جریان هوا بر روی $\frac{u}{U}$ اندازه‌گیری شده در نقاط $X/D=8, X/D=24, X/D=32$ نشان می‌دهد. هنگامیکه سرعت جریان هوا در حدود بین $U=10 \text{ m/s}$ تا $U=5 \text{ m/s}$ بیشترین کاهش $\frac{u}{U}$ را در نقاط $X/D=6$ و $X/D=8$ خواهیم داشت و در حدود سرعت $U=12.5 \text{ m/s}$ تا $U=10 \text{ m/s}$ در همه نقاط بیشترین افزایش $\frac{u}{U}$ را خواهیم داشت.

می‌توان نتیجه گرفت که برای اندازه‌گیری جریان معکوس بوسیله دو سنسور فیلم داغ باید در سرعت‌های بین $3 \text{ m/s} < U < 15 \text{ m/s}$ سنسور را در فاصله $50 < X/D < 90$ قرارداد تا یا دنباله حرارتی و یا دنباله سیالاتی سنسور اول بر روی سنسور دوم اثر بگذارد.



شکل (۶۴-۵) تاثیر سرعت جریان هوا بر روی $\frac{u}{U}$ در نقاط مختلف

شکل (۹۹) تا (۱۰۴) پیوست توزیع شدت اغتشاشها جریان هوای اندازه گیری شده بوسیله سنسور دوم در جهت X و Y در پایین دست سنسور اول در فاصله های مختلف وقتی که سنسور اول سرد و گرم است را در سرعت $U=10 \text{ m/s}$ و $U=20 \text{ m/s}$ نشان می دهد.

۵-۲-۵- کاهش غیر یکنواختی جریان هوا با استفاده از توری:

آزمایشها در سرعت‌های 10 m/s و 20 m/s و 30 m/s انجام می‌شود. همچنین در این آزمایشها توری‌هایی با مش‌هایی با ضرایب $\beta = 0.43, 0.46, 0.51$ مورد استفاده قرار می‌گیرد (β نسبت سطح باز به سطح کل).

۵-۲-۵-۱- اثر توری در جریان هوا:

هنگامی که توری در مسیر جریان هوا قرار می‌گیرد، شدت اغتشاشها و غیریکنواختی سرعت جریان هوا را کاهش می‌دهد. توری‌ها اغتشاشهای محوری جریان هوا را کاهش می‌دهند و افت نسبتاً زیادی در مسیر جریان ایجاد می‌کنند که این افت در سرعت‌های بالاتر بیشتر می‌باشد، افت فشار در توری‌ها طبق معادله (۳-۵) بدست می‌آید:

$$\Delta p = K \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (3-5)$$

U سرعت جریان هوا، ρ چگالی جریان هوا، K ضریب افت فشار است. افت فشار طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$K = 6(1 - \beta)\beta^{-5/3} \left(\frac{Ud}{\nu}\right)^{-1/3} \quad (4-5)$$

در معادله فوق d قطر سیم توری و β نسبت سطح مقطع باز به سطح مقطع کل توری است و طبق معادله (۵-۵) بدست می‌آید:

$$\beta = \left[1 - \frac{d}{l}\right]^2 \quad (5-5)$$

l فاصله بین مرکزهای دو سیم توری است. توری را معمولاً با تعداد مش (Mesh) آن مشخص می‌کنند. تعداد مش توری به معنی تعداد سوراخهای توری در طول یک اینچ می‌باشد، بنابراین $l = 25.4/M$ که

Mمش توری است. لازم به ذکر است که معادله (۴-۵) برای بازه $60 < Ud/(\beta v) < 600$ قابل قبول است.

کاهش شدت اغتشاشها توسط توریها طبق معادله (۶-۵) و (۷-۵) مشخص می‌شوند:

$$f = \frac{1}{\sqrt{1+K}} \quad (۶-۵)$$

$$f = \frac{\sqrt{(u'_2)^2}}{\sqrt{(u'_1)^2}} \quad (۷-۵)$$

معادله‌های زیر به دست می‌آید: $\sqrt{(u'_2)^2}$ و $\sqrt{(u'_1)^2}$ شدت اغتشاشهای قبل و بعد از توری است. همچنین کاهش غیریکنواختی طبق

معادله‌های زیر به دست می‌آید:

$$a = \frac{1.1}{\sqrt{1+K}} \quad (۸-۵)$$

$$\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \left(\frac{1+a-aK}{1+a+K} \right) \quad (۹-۵)$$

با توجه به توریهای انتخاب شده با ضرایب $\beta = 0.43, 0.46, 0.51$ ، مقادیر ضریب افت فشار و کاهش

شدت اغتشاشها محاسبه شده و در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۲-۵) - بررسی توریهای مورد استفاده در آزمایش

| U | f | K | B | d | L | Mesh |
|----|----------|----------|----------|------|----------|------|
| 10 | 0.560815 | 2.179516 | 0.435392 | 0.36 | 1.058333 | 24 |
| 10 | 0.659874 | 1.296564 | 0.513423 | 0.48 | 1.693333 | 15 |
| 10 | 0.647445 | 1.385584 | 0.469279 | 0.8 | 2.54 | 10 |
| 20 | 0.60524 | 1.729883 | 0.435392 | 0.36 | 1.058333 | 24 |
| 20 | 0.702021 | 1.029083 | 0.513423 | 0.48 | 1.693333 | 15 |
| 20 | 0.690108 | 1.099739 | 0.469279 | 0.8 | 2.54 | 10 |
| 30 | 0.631045 | 1.511192 | 0.435392 | 0.36 | 1.058333 | 24 |
| 30 | 0.72567 | 0.898987 | 0.513423 | 0.48 | 1.693333 | 15 |
| 30 | 0.714156 | 0.96071 | 0.469279 | 0.8 | 2.54 | 10 |

باتوجه به بحثی که انجام پذیرفت، اثر توری بر روی توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاشهای آن بستگی به نوع توری (نسبت سطح مقطع باز به کل) و سرعت جریان هوا دارد. هنگامی که توری در مسیر جریان هوا قرار می‌گیرد، افت فشار در مسیر جریان هوا ایجاد می‌شود، که این افت سبب کاهش غیریکنواختی توزیع سرعت جریان هوا می‌شود. همچنین توری سبب شکسته شدن گردابه‌های بزرگ به گردابه‌های کوچک می‌شود که این گردابه‌ها در پایین دست جریان کاهش می‌یابد.

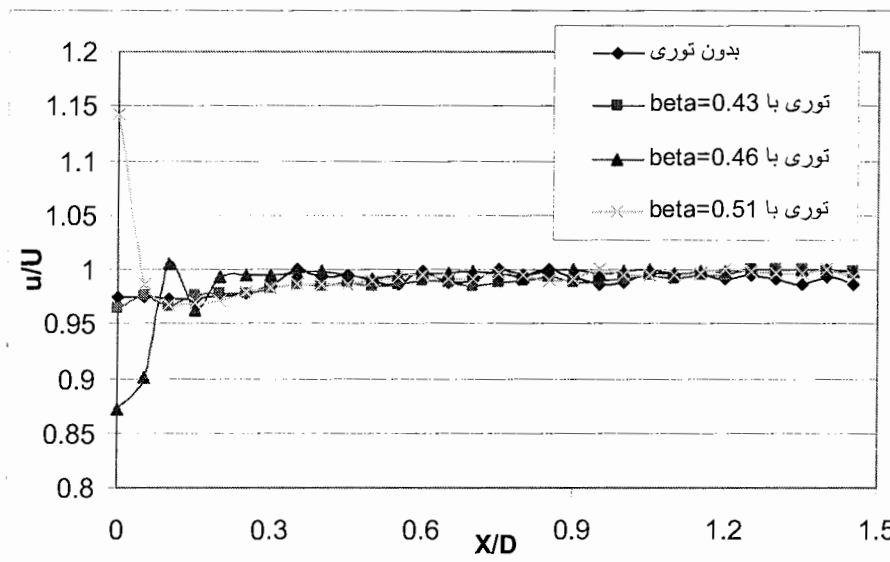
۲-۵-۲-۵- اثر توری بر روی توزیع سرعت و شدت اغتشاشهای جریان هوا:

به منظور بررسی اثر توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاشهای آن، توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاشهای آن در جهت پایین دست توری مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۵-۶۵) تغییرات سرعت جریان هوا در پایین دست توری در لوله برای حالت‌هایی که توری با سیم‌های مختلف و بدون توری را در سرعت $U=20\text{m/s}$ نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود با توجه به اثر جت‌های جریان که ناشی از سوراخ‌های توری و یا اثر ناشی از دنباله سیم توری است؛ جریان در نزدیکی توری در حد فاصل

کمتر از $\frac{X}{D} = 0.1$ تا $\frac{X}{D} = 0.2$ ناپایدار بوده و اندازه‌گیری آن بستگی شدیدی به موقعیت پراب نسبت به

سیمهای توری دارد. ولی با افزایش فاصله پایین‌دست (X) در حدود $\frac{X}{D} = 0.2$ سرعت جریان هوا یکنواخت

می‌شود.



شکل (۵-۶) تغییرات سرعت جریان هوا در پایین‌دست توری با مشهای مختلف در سرعت $U=20\text{m/s}$

شکل‌های (۱۰۵) و (۱۰۶) پیوست نیز توزیع سرعت جریان هوا پایین‌دست توری با مشهای مختلف.

در سرعت‌های $U=10\text{m/s}$ و $U=30\text{m/s}$ را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها نیز مانند شکل (۵-۶) سرعت

در نزدیکی توری ناپایدار می‌باشد. همانطور که از شکل‌ها مشخص است با افزایش سرعت، جریان ناپایدار در

فاصله دورتر از توری به پایداری می‌رسد. بطوری که در سرعت $U=10\text{m/s}$ بین $\frac{X}{D} < 0.1$ و $\frac{X}{D} < 0.2$ جریان

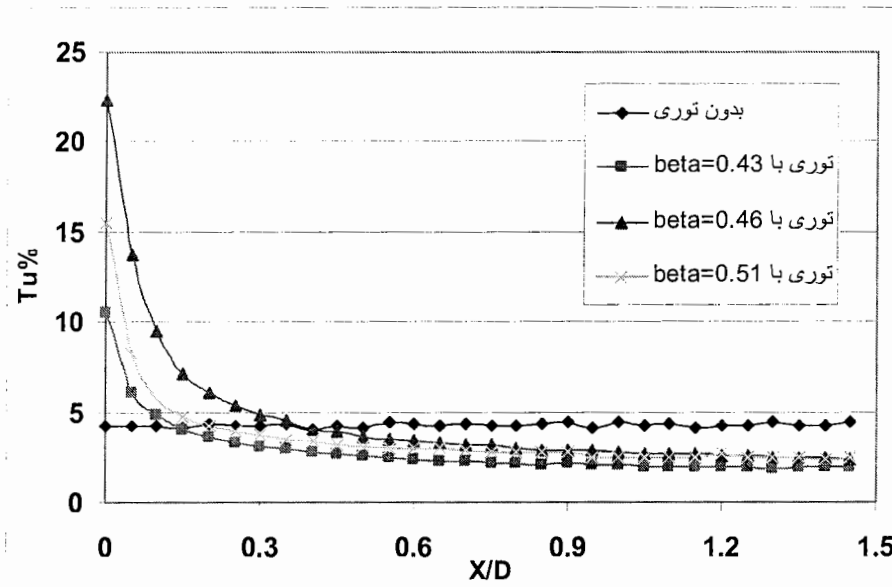
پایدار می‌شود و در سرعت $U=30\text{m/s}$ بین $\frac{X}{D} < 0.3$ و $\frac{X}{D} < 0.2$ جریان پایدار می‌شود.

بنابراین با توجه به یکنواخت شدن جریان هوا می‌توان بعد از آن منطقه سنسور سیم‌داغ را قرارداد. لازم به ذکر است با توجه به شکل فوق با افزایش پایین‌دست جریان، سرعت جریان هوا کمی افزایش پیدا می‌کند که این به دلیل افزایش لایه مرزی می‌باشد.

تغییرات شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین‌دست توری در شکل (۵-۶۶) در سرعت $U=20\text{m/s}$ نشان

داده شده است. شدت اغتشاش‌های جریان هوا با توجه به رابطه $T_{ii} = \frac{\sqrt{(\overline{u'})^2}}{U}$ بی‌بعد می‌شود.

که (u') اغتشاش‌های جریان هوا و U سرعت متوسط جریان است. همانطور که در شکل نشان داده شده است، در نزدیکی توری شدت اغتشاشها بسیار بالا بوده (بیشتر از $T_{ii} = 10\%$) بطوریکه چندین برابر شدت اغتشاش‌های جریانی که فاقد توری است. ($T_{ii} = 4\%$) این امر ناشی از اثرات جت و دنباله سیم‌های توری می‌باشد.



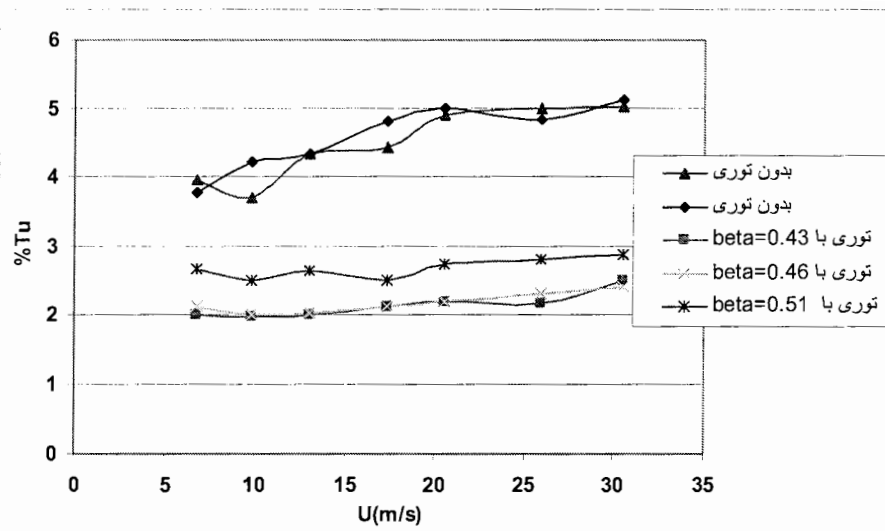
شکل (۵-۶۶) تغییرات شدت اغتشاش‌های سرعت جریان را در پایین‌دست توری با مش‌های مختلف بر حسب سرعت جریان هوا در

سرعت $U=20\text{m/s}$

با افزایش پایین دست (هنگامی که از توری فاصله می‌گیریم) شدت اغتشاشهای جریان هوا کاهش می‌یابد، بطوریکه در حدفاصل حدود $\frac{X}{D} = 0.3$ شدت اغتشاشهای جریان هوا کمتر از حالتی است که لوله توری ندارد. شیب این کاهش در نزدیکی توری تا فاصله $\frac{X}{D} = 0.4$ بسیار شدید بوده و پس از آن به آرامی کاهش می‌یابد. بطوریکه بعد از فاصله حدود $\frac{X}{D} = 0.7$ از توری این شیب تقریباً نزدیک صفر است.

شکل‌های (۱۰۷) و (۱۰۸) پیوست نیز تغییرات شدت اغتشاشهای سرعت جریان هوا را در پایین دست توری با مشهای مختلف بر حسب سرعت جریان هوا به ترتیب در سرعت‌های $U = 10 \text{ m/s}$ و $U = 30 \text{ m/s}$ را نشان می‌دهد. این شکلها نیز همانند شکل (۵-۶۶)، شدت اغتشاشها در نزدیکی توری بسیار بالا بوده و با افزایش پایین دست (X) اغتشاش‌های جریان هوا کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت نیز این افزایش شدت اغتشاشها تا فاصله‌های بیشتر از $\frac{X}{D} = 0.3$ نیز ادامه دارد.

شکل (۵-۶۷) تغییرات شدت اغتشاشها را در پایین دست توری بر حسب سرعت جریان هوا نشان می‌دهد. در شکل فوق نقطه‌ای در پایین دست توری $\frac{X}{D} = 1$ در نظر گرفته و شدت اغتشاشهای جریان هوا در این نقطه بررسی می‌شود. همچنین به منظور بررسی تکرارپذیری، این آزمایش برای حالتی که لوله فاقد توری است دوباره اندازه‌گیری شد و با توجه به اینکه شدت اغتشاشهای هوا با زمان تغییر می‌کند بنابراین تکرارپذیری دارای اختلافی حدود ۷٪ خواهد بود.

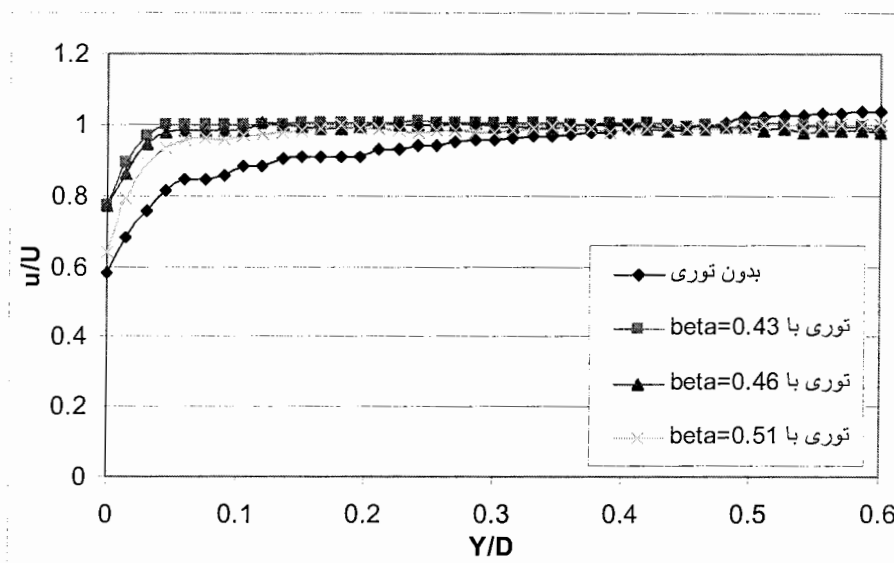


شکل (۵-۶۷) - تغییرات شدت اغتشاشهای سرعت جریان را در پایین دست توری بر حسب سرعت جریان هوا (x=100mm)

شکل (۵-۶۷) نشان می‌دهد که با افزایش سرعت، مقدار شدت اغتشاشهای جریان نیز افزایش می‌یابد. همچنین تئوری نیز مؤید این افزایش می‌باشد. افزایش شدت اغتشاشها در بازه سرعت m/s (۳۵-۵) حدود ۱۵٪ می‌باشد. با توجه به منحنیهای شکل‌های فوق می‌توان منطقه قرارگیری سنسور را طوری مشخص نمود که در منطقه فوق جریان هوا ناپایدار نبوده و دارای شدت اغتشاشهای مناسبی باشد. باتوجه به بحثهایی که در قسمت تئوری انجام شد و جدول (۵-۲) در سرعت $2.0 m/s$ کاهش شدت اغتشاشها برای توری با ضرایب $\beta = 0.43, 0.46, 0.51$ به ترتیب برابر ۳۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ می‌باشد. نتایج بدست‌آمده از آزمایش با تئوری همخوانی مناسبی دارد. لازم به ذکر است اختلاف موجود بین نتایج آزمایش و تئوری می‌تواند ناشی از تغییرات شدت اغتشاشها با زمان باشد و همچنین آزمایشها بصورت همزمان و شرایط یکسان انجام نشده است. لازم به ذکر است که اختلاف بین تئوری و آزمایشها جزء ماهیت پدیده می‌باشد.

۵-۲-۵-۳- اثر توری بر روی لایه مرزی:

همانگونه که بیان شد دستگاه جریان سنج سیم داغ قادر به اندازه گیری سرعت محلی می باشد. به منظور اندازه گیری دبی جریان هوا بهتر است که توزیع سرعت جریان هوا در مقطعی که سنسور سیم داغ قرار دارد دارای یکنواختی مناسبی بوده و حتی المقدور ضخامت لایه مرزی کوچک باشد. با استفاده از توری می توان ضخامت لایه مرزی را کاهش داد. شکل (۵-۶۹) اثر توریهای مختلف با ضرایب $\beta = 0.43, 0.46, 0.51$ بر روی توزیع جریان هوا را در سرعت $U = 20 \text{ m/s}$ را نشان می دهد.



شکل (۵-۶۹) توزیع سرعت جریان هوا در پایین دست توری در مقطعی که سنسور قرار دارد در سرعت $U=20\text{m/s}$

شکل های (۱۰۹) و (۱۱۰) پیوست اثر توریهای مختلف با ضرایب $\beta = 0.43, 0.46, 0.51$ بر روی توزیع جریان هوا را در سرعت $U=10\text{m/s}$ و $U=30\text{m/s}$ را نشان می دهد.

همانطور که در شکل نشان داده شده با قرار دادن توری ضخامت لایه مرزی کاهش یافته که این کاهش با کاهش نسبت سطح باز به سطح بسته β بطور جزئی افزایش می‌یابد. ولی با توجه به اینکه مقدار β نزدیک به هم می‌باشد کاهش ضخامت لایه مرزی نیز نزدیک به هم می‌باشد.

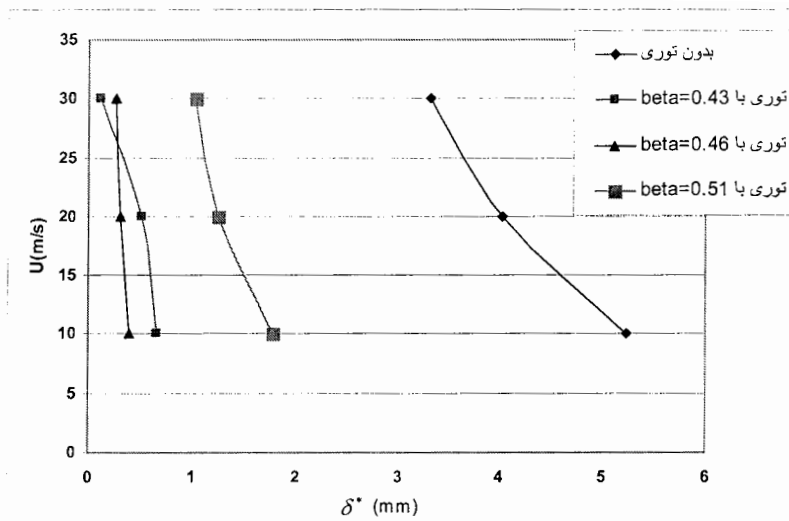
همانطور که در شکل مشخص است هنگامی که توری در مسیر جریان قرار می‌گیرد لایه مرزی به شدت کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است اندازه‌گیری ضخامت لایه مرزی با استفاده از دستگاه جریان سنج سیم‌داغ مشکل می‌باشد، بنابراین به منظور مشخص نمودن کاهش ضخامت لایه مرزی برای توری و ضخامت جابجایی لایه مرزی طبق معادله زیر تعریف می‌شود:

$$\delta^* = \frac{1}{U} \int_0^{D/2} (U - u) dy \quad (۱۰-۵)$$

در معادله فوق U سرعت متوسط در مرکز لوله و u توزیع سرعت محلی می‌باشد.

شکل‌های (۱۱۱) و (۱۱۲) پیوست نیز توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در مقطعی که سنسور قرار می‌گیرد را تا لبه لوله که لایه مرزی تشکیل شده برای توری‌هایی با ضرایب $\beta = 0.43, 0.46, 0.51$ به ترتیب در سرعت‌های $U=20\text{m/s}$ و $U=10\text{m/s}$ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل‌ها نشان داده شده، در لایه مرزی شدت اغتشاش‌ها بالا است که با قرار دادن توری این شدت اغتشاش‌ها بطور محسوسی کاهش می‌یابد.

شکل (۷۰-۵) تغییرات ضخامت جابجایی لایه مرزی را برای حالت‌هایی که توری با مش‌های مختلف در لوله قرار دارد نشان می‌دهد. همچنین تغییرات نسبت به سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل فوق می‌توان دریافت که اثر توری بر روی کاهش ضخامت جابجایی لایه مرزی بسیار موثر است توری با مش‌های مختلف تاثیر خاص در کاهش ضخامت جابجایی لایه مرزی دارد.



شکل (۵-۷) - تغییرات ضخامت جابجایی لایه مرزی بر اثر توری در سرعت‌های مختلف

بنابراین توریها هم باعث کاهش شدت اغتشاشها و هم باعث کاهش لایه مرزی شده و محل قرارگیری

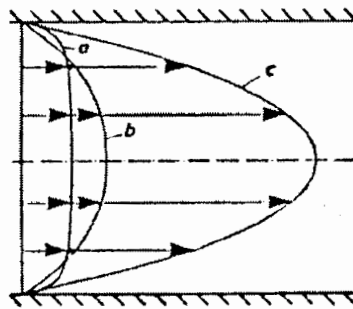
سنسور پایین دست توری در حدود 5.0 mm تا 7.0 mm می باشد.

۵-۲-۶- بررسی جریان داخل لوله و نازل:

همانگونه که بیان شد هدف از انجام این آزمایشها بررسی جریان هوای داخل لوله می باشد. معمولا نوع جریان داخل لوله با استفاده از عدد رینولدز به طور تقریبی مشخص می شود. در صورتیکه عدد رینولدز $Re < 2300$ و جریان ورودی به لوله یکنواخت باشد، جریان به صورت آرام می باشد. در این حالت توزیع سرعت بصورت پارابولیک بوده و بصورت رابطه زیر بیان می شود:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (۱۱-۵)$$

در این حالت مطابق شکل (۵-۷۱) سرعت در مرکز لوله در جریانهای آرام حدود دو برابر سرعت متوسط جریان هوا می باشد. در صورتیکه بتوان جریان کاملا آرام بدست آورد می توان با استفاده از این جریان آرام و شناخت آن نسبت به دیواره لوله دستگاه جریان سنج سیم داغ را برای سرعتهای کم کالیبره نمود. همچنین در صورتیکه جریان کاملا آرام باشد با اندازه گیری سرعت در مرکز لوله می توان سرعت متوسط و یا دبی جریان را اندازه گیری کرد.



Velocity distribution in a pipe

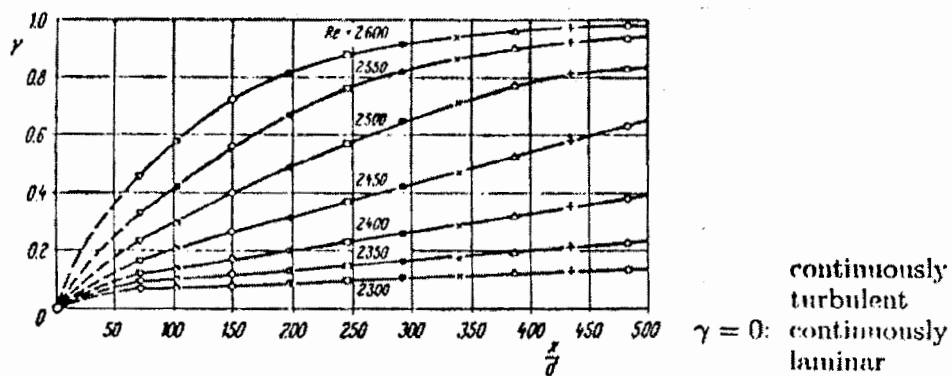
- (a) turbulent
- (b) laminar, same volume flux as a
- (c) laminar, same pressure gradient as a

شکل (۵-۷۱) جریان در داخل لوله

در صورتیکه که جریان یکنواختی را در درون لوله داشته باشیم می‌توان با اندازه‌گیری سرعت محلی و ضرب آن در سطح مقطع دبی جریان هوا را بدست آورد. بنابراین در صورتیکه که جریان یکنواخت‌تر باشد اندازه‌گیری جریان هوا ساده‌تر می‌گردد. همانگونه که در شکل (۵-۷۱) نشان داده شده است، هنگامی که جریان هوا بصورت کاملاً آشفته باشد توزیع جریان هوا یکنواخت‌تر شده و می‌توان با اندازه‌گیری سرعت متوسط دبی جریان هوا را با خطای کمتر بدست آورد.

برای بدست آوردن جریان کاملاً آشفته نیاز است که عدد رینولدز بالاتر از $Re > 2300$ باشد.

شکل (۵-۷۲) تابع تناوبی جریان مغشوش (Intermittency Function) در جهت پایین دست لوله بر حسب X/D نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ملاحظه می‌کنید در عدد رینولدز $Re = 2600$ هنگامیکه $X/D = 500$ می‌باشد، جریان کاملاً آشفته داریم. با کاهش X/D و یا عدد رینولدز تابع تناوبی آشفته $\lambda < 1$ بوده و دیگر جریان کاملاً آشفته نخواهیم داشت ($X/D < 50$). داده‌های نشان داده شده کامل نبود و احتمال اینکه لایه مرزی آرام و مغشوش کاملاً همپوشانی نکرده باشند وجود دارد.



شکل (۵-۷۲) تابع تناوبی جریان مغشوش (Intermittency Function) در جهت پایین دست لوله

با توجه به استاندارد دستگاه اسپرومتری سرعت جریان هوا از 1 lit/s تا 14 lit/s تغییر می‌کند.

به همین دلیل عدد رینولدز برای لوله اسپرومتر از اعداد رینولدز پایین تا حدود ۳۰ برابر افزایش پیدا می‌کند. بنابراین جریان هوا در اسپرومتر دارای شرایط مختلفی خواهد بود. در آزمایشهایی که انجام شده لوله اسپرومتر با قطر $D = 23.5\text{mm}$ استفاده شده و در سرعت‌های $U = 1\text{ m/s}$ تا $U = 20\text{ m/s}$ توزیع سرعت بررسی شده است.

جدول (۳-۵) عدد رینولدز را برای لوله اسپرومتر نشان می‌دهد.

| U(m/s) | Tube(23.5mm)(Re) | Spirometer(Re) |
|--------|------------------|----------------|
| 1 | 1533.33 | 600 |
| 2 | 3066.66 | 1200 |
| 3 | 4600 | 1800 |
| 4 | 6133.33 | 2400 |
| 5 | 7666.66 | 3000 |
| 6 | 9200 | 3600 |
| 7 | 10733.33 | 4200 |
| 10 | 15333.33 | 6000 |
| 15 | 23000 | 9000 |
| 20 | 30666.6 | 12000 |

همانطور که در جدول مشاهده می‌کنید $3000 < Re < 5000$ تغییر کرده است.

همانطور که در شکل (۵-۷۲) نشان داده شده مقدار X/D پارامتر مهمی برای تعیین لایه مرزی آرام و مغشوش در داخل لوله می‌باشد. در مقادیر $X/D > 50$ با توجه به عدد رینولدز می‌توان نوع جریان در داخل لوله تشخیص داد ولی با توجه به اینکه مقدار طول لوله دستگاه اسپرومتر حدود ۷،۵ سانتیمتر و قطر آن حدود ۲۳/۵ mm می‌باشد. نسبت X/D کم می‌باشد، بنابراین داده‌های تجربی برای تحقیق در مورد نوع جریان نیاز می‌باشد.

شکل (۵-۷۳) توزیع سرعت در داخل لوله در فاصله $X/D = 3$ در سرعت‌های $U = 1 \text{ m/s}$ تا $U = 20 \text{ m/s}$ نشان می‌دهد. در شکل محور افقی منحنی‌ها بر حسب Y/D بوده و محور عمودی سرعت را با استفاده از سرعت در مرکز لوله بی‌بعد نمودیم. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌کنید در نزدیکی دیواره لوله، لایه مرزی وجود دارد و ضخامت لایه مرزی با افزایش سرعت کاهش می‌یابد.

هنگامی که $U = 1 \text{ m/s}$ ($Re = 1533$) این لایه مرزی شدید بوده ولی جریان به حالت کاملاً گسترش یافته در جریان آرام نمی‌باشد. بنابراین منحنی فوق کاملاً سهمی نبوده زیرا X/D آن کوچک می‌باشد و لایه مرزی ضخیمی وجود دارد و با افزایش سرعت لایه مرزی کاهش می‌یابد.

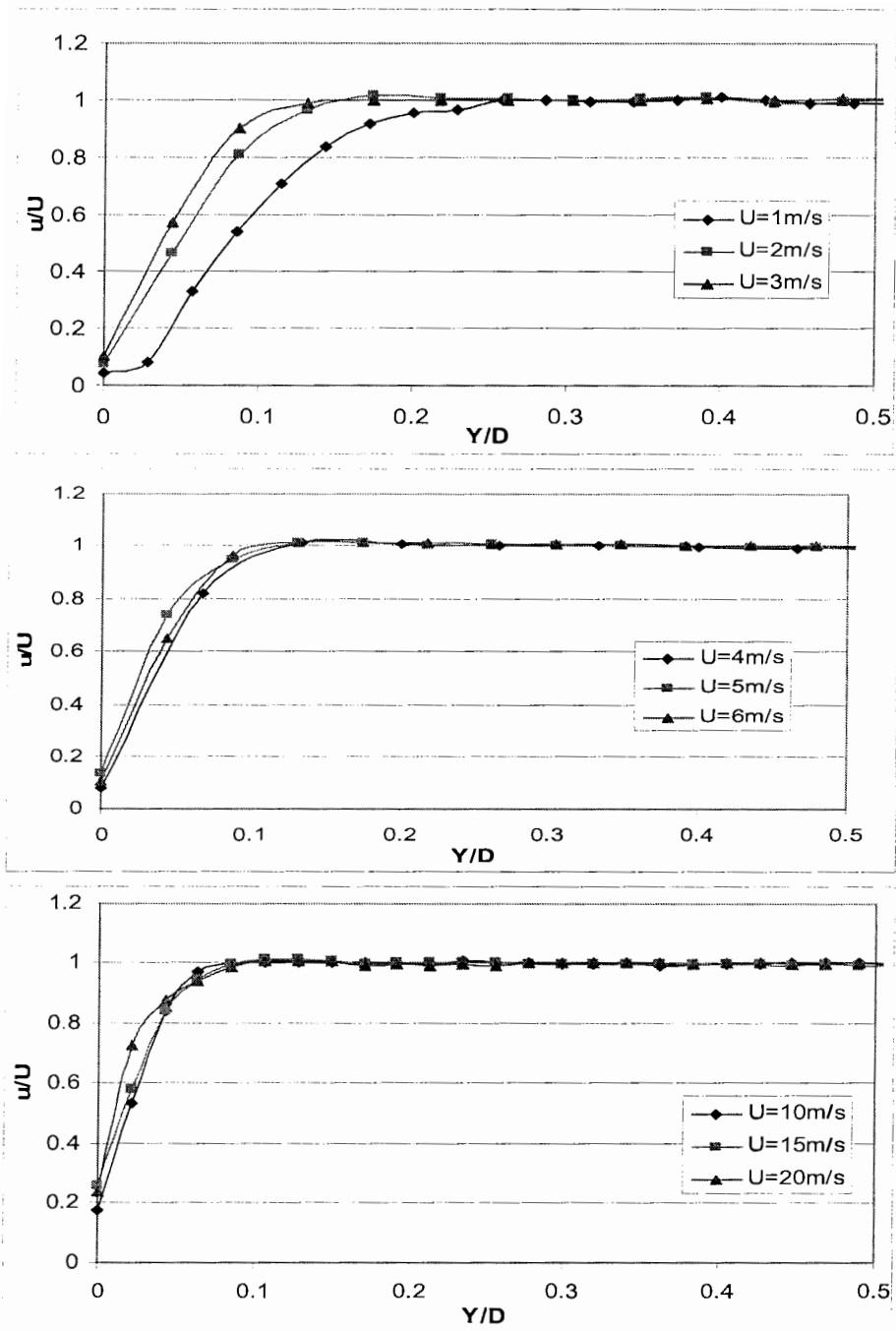
به منظور بررسی بهتر اغتشاش‌های جریان هوا در داخل لوله و مشخص نمودن نوع لایه مرزی در لوله منحنی شکل (۵-۷۴) که بیان کننده شدت اغتشاشها در داخل لوله است را نشان می‌دهیم:

همانگونه که در شکل نشان داده شده است در سرعت $U = 1 \text{ m/s}$ ($Re = 1533$) شدت اغتشاشها حدود ۴٪ می‌باشد و این شدت اغتشاشها تقریباً ثابت می‌باشد.

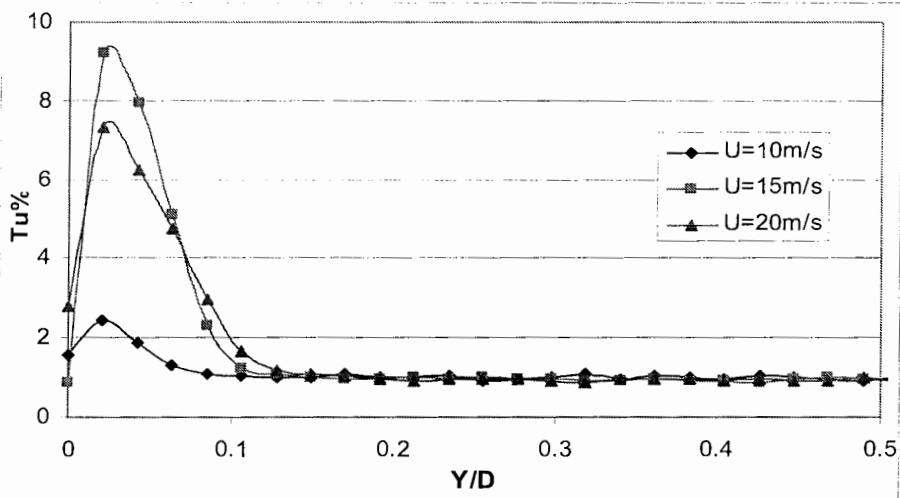
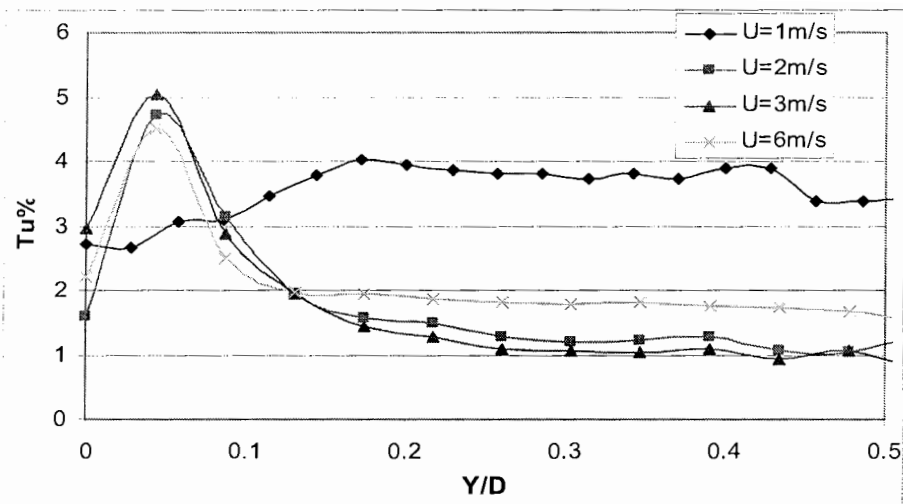
این اغتشاشها ناشی از تونل باد دمنده می‌باشد که این نوع تونل باد در سرعت‌های کم دارای اغتشاش‌های بیشتری می‌باشند. بنابراین معمولاً تونل‌بادهای دمنده در سرعت‌های کم دارای اغتشاش‌های بیشتری نسبت

به حالتی که سرعت جریان هوا زیاد است می‌باشد. بنابراین بر روی این اغتشاشها نمی‌توان تجزیه و تحلیل خاصی داشت.

با افزایش سرعت یعنی هنگامیکه $Re > 4500$ می‌رسد لایه‌مرزی در نزدیکی دیواره ایجاد می‌شود بطوریکه نقطه ماکزیمم آن (قله) حدود بالاتر از ۴٪ بوده و این نقطه با افزایش سرعت نیز افزایش می‌یابد ولی با افزایش Y/D یعنی به سمت مرکز لوله مقدار شدت اغتشاشها کاهش می‌یابد، که دلیل بر آن است که جریان در داخل لوله کاملاً بصورت جریان آزاد می‌باشد. یعنی اینکه لایه‌مرزی کاملاً همپوشانی نکرده‌اند.



شکل (۵-۷) توزیع سرعت در داخل لوله در فاصله $X/D = 3$ در سرعت‌های $U=1\text{m/s}$ تا $U=20\text{m/s}$

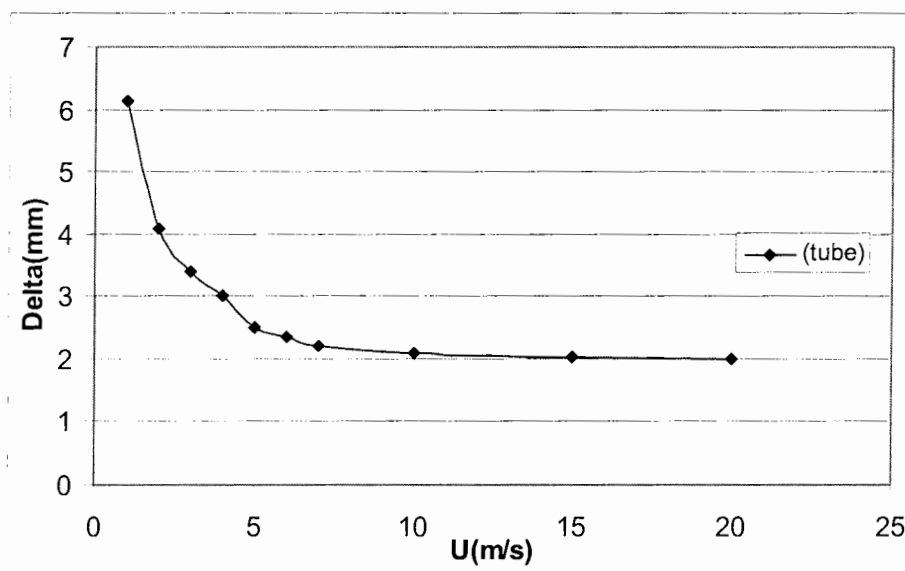


شکل (۷۴-۵) توزیع شدت اغتشاشها در داخل لوله در فاصله $X/D = 3$ در سرعت‌های $U=1\text{ m/s}$ تا $U=20\text{ m/s}$

همانگونه که در شکل (۷۳-۵) نشان داده شد در داخل لوله در نقطه $X/D = 3$ در سرعت‌های مختلف لایه مرزی وجود دارد که این لایه مرزی بطور کامل گسترش نیافته است. ضخامت لایه مرزی با کاهش سرعت جریان هوا افزایش می‌یابد. به منظور بررسی دقیق‌تر تاثیر سرعت بر روی ضخامت لایه مرزی شکل (۷۵-۵) بدست آمده است.

منحنی شکل (۵-۷۵) تغییرات ضخامت لایه مرزی لوله بر حسب سرعت می باشد که محور عمودی ضخامت لایه مرزی در $X/D = 3$ و محور افقی سرعت محلی که با استفاده از سرعت جریان آزاد بی بعد شده است می باشد.

ضخامت لایه مرزی را تا نقطه ای تعریف می کنیم که سرعت محلی نسبت به سرعت جریان آزاد حدود 0.99 می باشد.



شکل (۵-۷۵) تغییرات ضخامت لایه مرزی لوله بر حسب سرعت جریان هوا

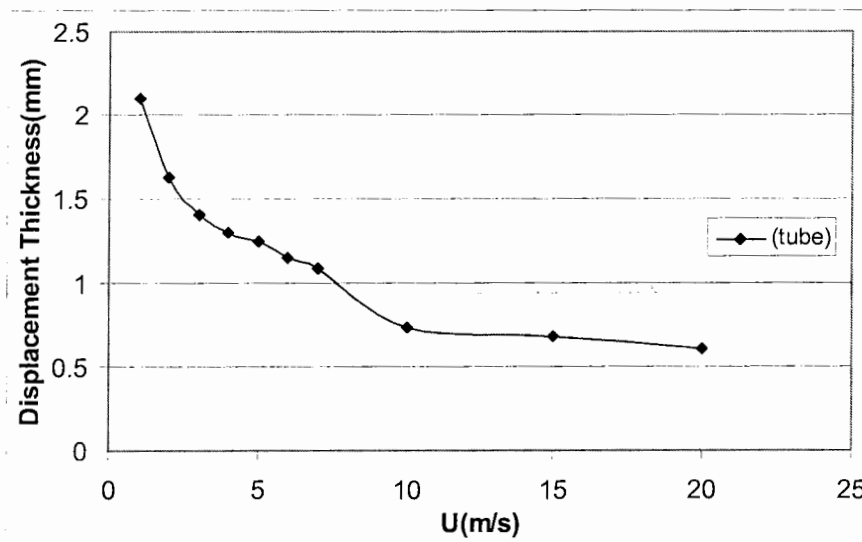
ضخامت لایه مرزی در سرعت $(U=1 \text{ m/s}$ و $Re=1533$) حدود $\delta = 6 \text{ mm}$ بوده که با افزایش سرعت کاهش می یابد و در سرعت $U=7 \text{ m/s}$ ($Re=10733$) این مقدار به $\delta = 2 \text{ mm}$ کاهش می یابد و در سرعت $U > 7 \text{ m/s}$ تغییر ضخامت لایه مرزی با سرعت ناچیز می باشد. به منظور بررسی و مقایسه جریان لزوج و غیر لزوج (شرایطی که لایه مرزی وجود نداشته باشد) ضخامت جابجایی لایه مرزی

(Displacement thickness) را تعریف می‌کنیم. ضخامت جابجایی لایه مرزی طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\delta^* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (۱۲-۵)$$

در رابطه فوق U سرعت جریان آزاد و u سرعت جریان هوای محلی می‌باشد. ضخامت لایه مرزی (δ^*) اختلاف جریان لزوج و غیرلزوج می‌باشد و یا به عبارت دیگر بیان کننده درصد خطای اندازه‌گیری دبی حجمی می‌باشد.

با استفاده از اندازه‌گیری سرعت در مرکز لوله و با محاسبه سطح مقطع آن می‌توان دبی حجمی جریان هوا را محاسبه کرد. شکل (۵-۷۶) ضخامت جابجایی لایه مرزی (δ^*) بر حسب سرعت جریان هوا را نشان می‌دهد. هنگامیکه سرعت جریان هوا $U = 1 \text{ m/s}$ است این ضخامت حدود $\delta^* = 2.1 \text{ mm}$ بوده که با افزایش سرعت این مقدار نیز کاهش می‌یابد. هنگامیکه سرعت به $U = 10 \text{ m/s}$ می‌رسد این مقدار حدود $\delta^* = 0.75 \text{ mm}$ می‌باشد.

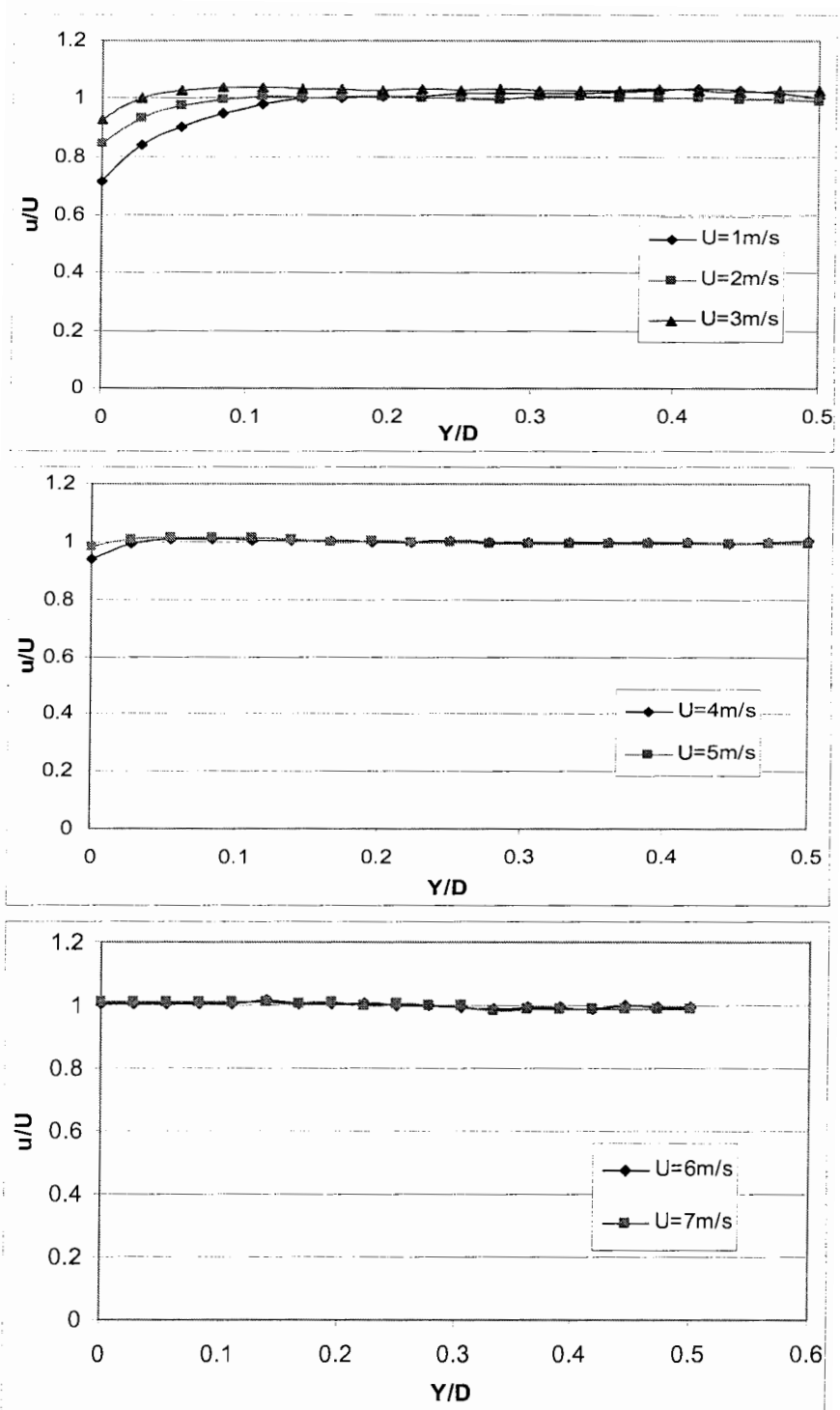


شکل (۵-۷۶) ضخامت جابجایی لایه مرزی (δ^*) لوله بر حسب سرعت جریان هوا

برای سرعت‌های بین $U=1\text{ m/s}$ تا $U=10\text{ m/s}$ ($Re=15333$ تا $Re=153333$) شیب کاهش ضخامت جابجایی لایه مرزی (δ^*) زیاد می‌باشد. پس از $U=10\text{ m/s}$ ($Re=153333$) این تغییرات ناچیز می‌باشد. با توجه به شکل (۵-۷۶) اگر با استفاده از جریان غیرلنج بخواهیم دبی جریان هوا را اندازه‌گیری کنیم در $U=1\text{ m/s}$ خطایی معادل $17\% = \frac{2.1*2}{23.5} * 100$ خواهیم داشت ولی هنگامیکه سرعت به $U=10\text{ m/s}$ می‌رسد، خطایی معادل $6.3\% = \frac{0.75*2}{23.5} * 100$ می‌رسد. بنابراین استفاده از جریان غیرلنج برای اندازه‌گیری دبی جریان دارای خطای زیادی بوده و به منظور غلبه بر این مشکل ما باید سعی کنیم، جریان لنج را کم کنیم و یا به عبارت دیگر لایه مرزی را به سمت صفر سوق دهیم. بدین منظور از نازلی به قطر $D=18\text{ mm}$ استفاده می‌کنیم، نازل فوق طبق استاندارد (ASME) ساخته شده است.

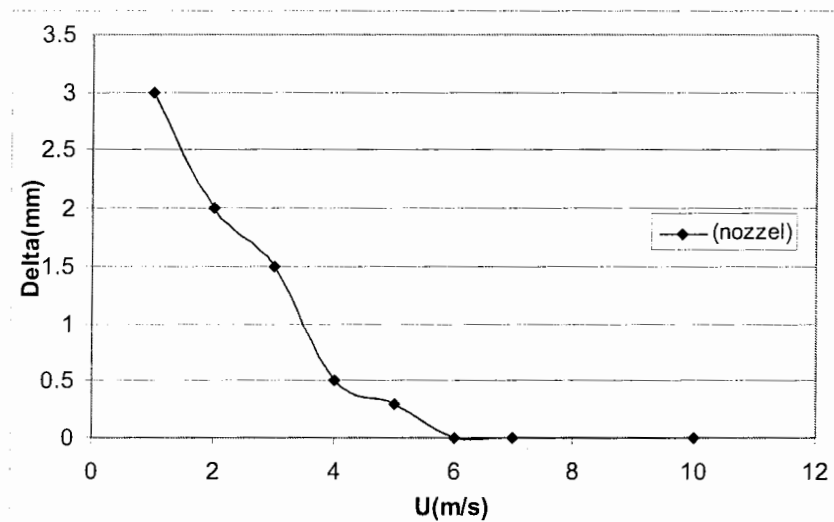
شکل (۵-۷۷) توزیع سرعت در نازلی که در انتهای لوله نصب شده است را در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد، همانطور که در شکل نشان داده شده است، ضخامت لایه مرزی به مقدار قابل توجهی کاهش یافته ولی در سرعت‌های کم حدود $U=1\text{ m/s}$ ($Re=600$) ضخامت لایه مرزی به مقدار کمی تحت تاثیر جریان بالادست قرار گرفته است.

در صورتیکه کاهش قطر لوله بوسیله نصب نازل در سر لوله بیشتر از ضخامت لایه مرزی باشد، ضخامت لایه مرزی بالادست نازل حذف می‌شود و همچنین اگر اختلاف قطر نازل و لوله کمتر از ضخامت لایه مرزی باشد مقداری از لایه مرزی پایین تر از نازل وجود دارد. با استفاده از این نازل می‌توان توزیع سرعت بالاتر از آن را بصورت یکنواخت تر تبدیل کرد.

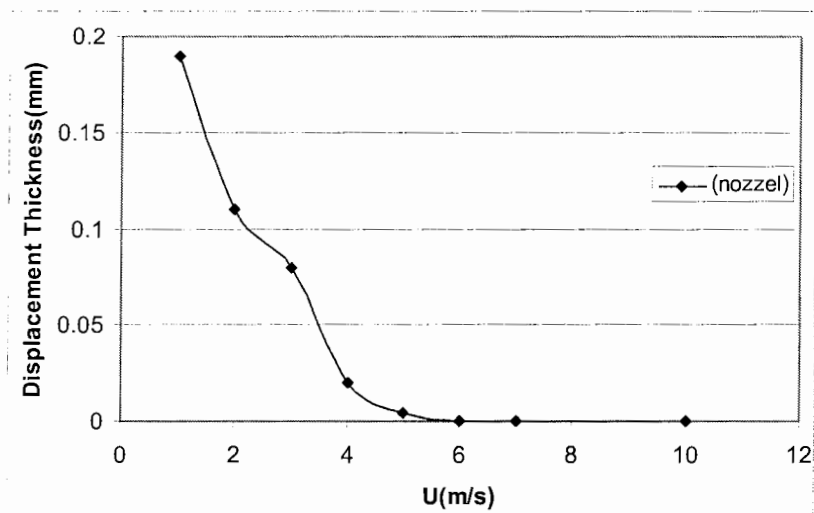


شکل (۵-۷۷) توزیع سرعت در نازل در سرعت‌های مختلف

به منظور بررسی بهتر توزیع سرعت در نازل، ضخامت لایه مرزی (δ) و ضخامت جابجایی لایه مرزی (δ^*) بر حسب سرعت به ترتیب در شکل‌های (۷۸-۵) و (۷۹-۵) نشان داده شده‌است.

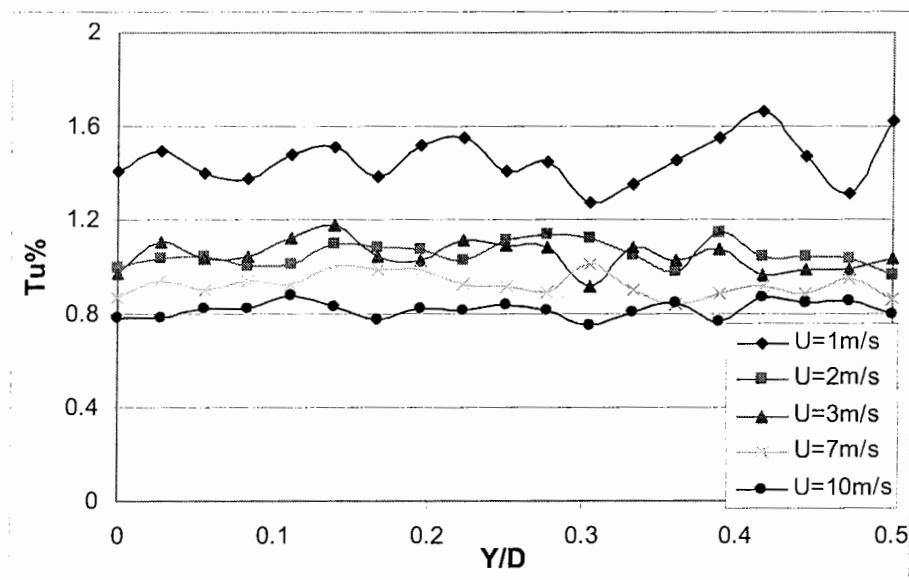


شکل (۷۸-۵) تغییرات ضخامت لایه مرزی نازل بر حسب سرعت جریان هوا



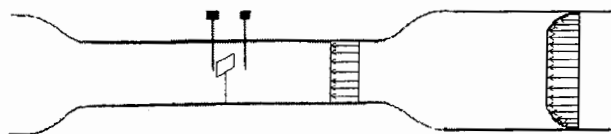
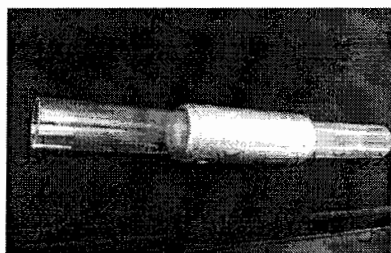
شکل (۷۹-۵) ضخامت جابجایی لایه مرزی (δ^*) نازل بر حسب سرعت جریان هوا

همانگونه که در شکل (۷۸-۵) مشاهده می‌کنیم ضخامت لایه مرزی با کاهش سرعت کاهش یافته و در سرعت $U=6 \text{ m/s}$ به صفر می‌رسد. شکل (۷۹-۵) نیز ضخامت جابجایی لایه مرزی و مقایسه لزج و غیرلزج می‌باشد و نشان می‌دهد که استفاده از نازل، توزیع سرعت جریان هوا را یکنواخت‌تر کرده و اختلاف جریان لزج و غیرلزج را به مقدار بسیار کم نموده است. بطوریکه در سرعت $U=1 \text{ m/s}$ دارای ضخامت لایه مرزی $\delta = 3 \text{ mm}$ و در سرعت $U \geq 5 \text{ m/s}$ به صفر می‌رسد. بنابراین می‌توانیم جریان را غیرلزج در نظر می‌گیریم. شکل (۸۰-۵) توزیع شدت اغتشاشها را در نازل نشان می‌دهد. شدت اغتشاشها با افزایش سرعت کاهش می‌یابد که این امر ناشی از مشخصه تونل باد که قبلاً ذکر شد می‌باشد. (با افزایش سرعت جریان هوا شدت اغتشاشها کاهش می‌یابد) همچنین با توجه به قطر نازل شدت اغتشاشهای بالایی که در نزدیکی دیواره اتفاق می‌افتد، در شکل (۷۸-۵) مشاهده نمی‌شود.

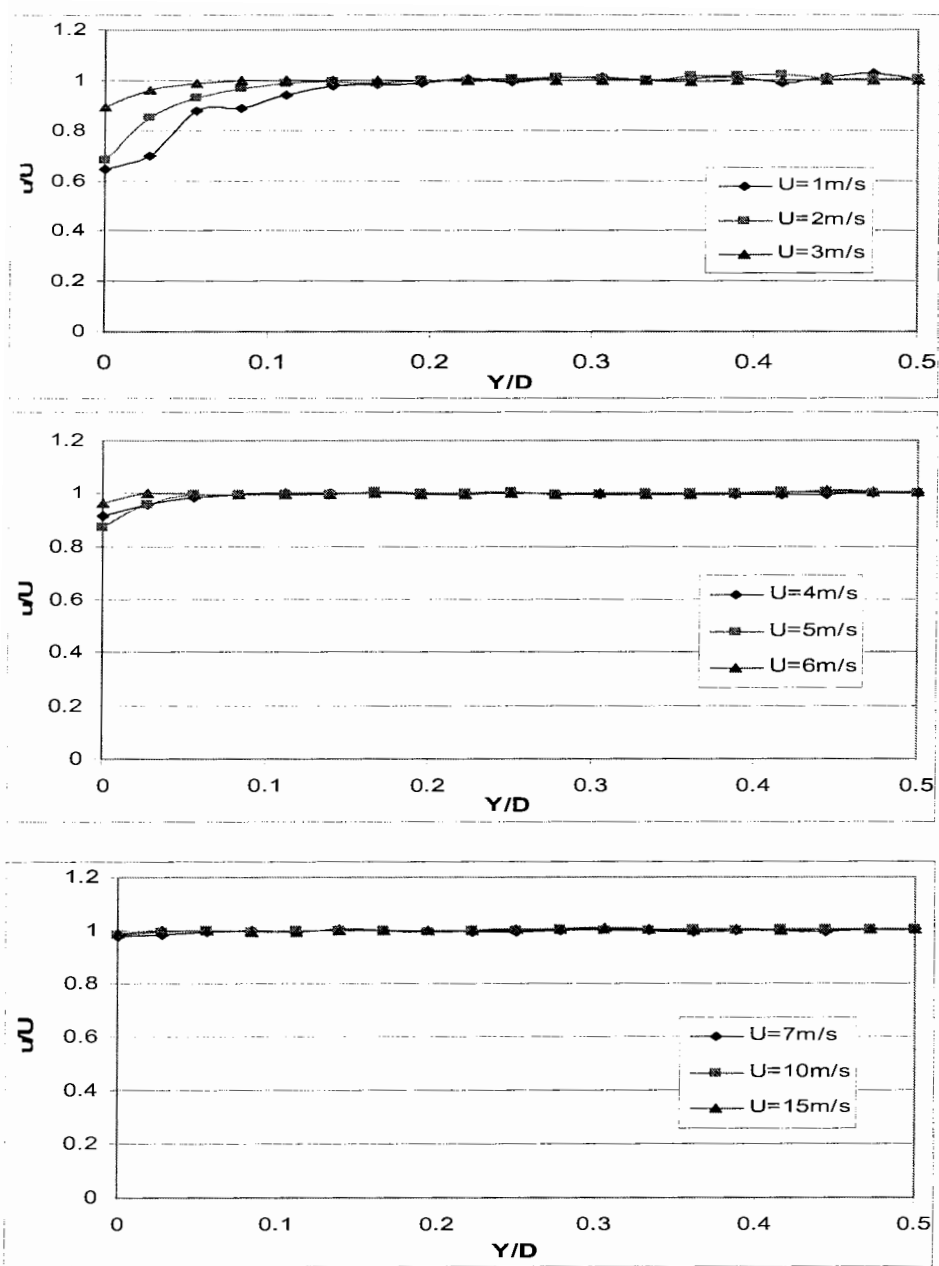


شکل (۷۸-۵) توزیع شدت اغتشاشها را در نازل در سرعت‌های مختلف

در دستگاه اسپرومتر جریان دم و بازدم از دو طرف لوله اسپرومتر وارد و خارج می‌شود، بنابراین نیاز به دو نازل بالادست و پایین‌دست سنسور وجود دارد و مطابق شکل (۷۹-۵) فاصله‌ای بین دو نازل با سطح مقطع یکسان خواهیم داشت. هنگامیکه جریان دم می‌باشد طول نازل کوتاه‌تر بوده و X/D آن کمتر می‌باشد. در این حالت مدل اسپرومتری واقعی ساخته‌شده و توزیع سرعت آن نیز مطابق شکل (۸۰-۵) رسم می‌شود. شکل (۸۰-۵) اندازه‌گیری توزیع سرعت در جایی که سنسور اسپرومتر قرار می‌گیرد را نشان می‌دهد. مشابه شکل‌های توزیع سرعت در نازل می‌باشد.

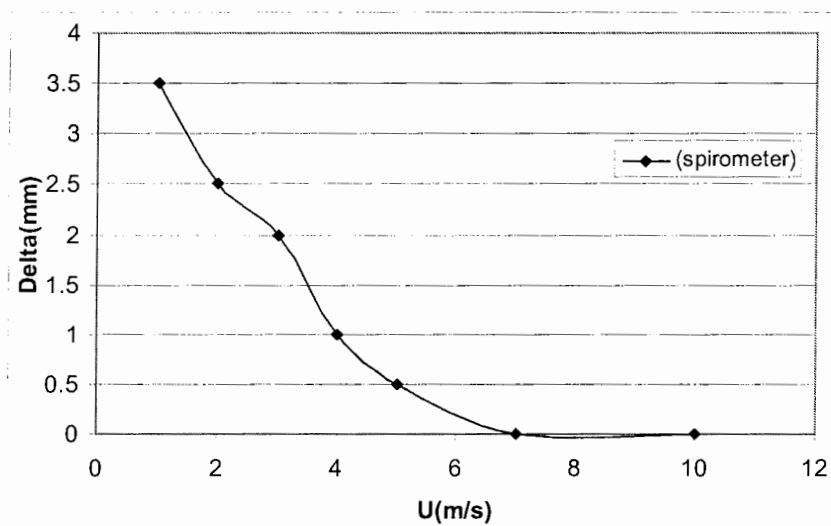


شکل (۷۹-۵) نازل‌های اسپرومتر

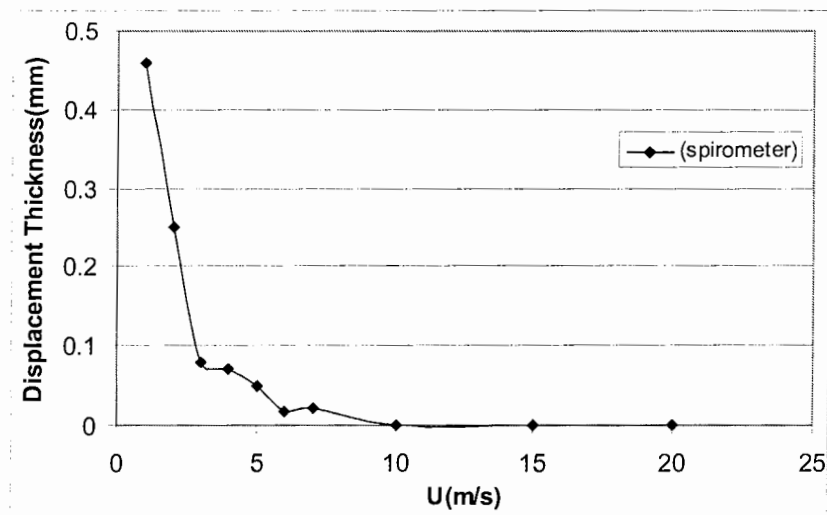


شکل (۵-۸) توزیع سرعت در اسپرومتر در سرعت‌های مختلف

تغییرات لایه مرزی و ضخامت جابجایی لایه مرزی نیز مطابق شکل نازل می‌باشد. شکل (۸۱-۵) و (۸۲-۵) نیز ضخامت لایه مرزی و ضخامت جابجایی لایه مرزی را نشان می‌دهد که بیان کننده آن است که در سرعتهای بالا این ضخامت به سمت صفر میل می‌کند.



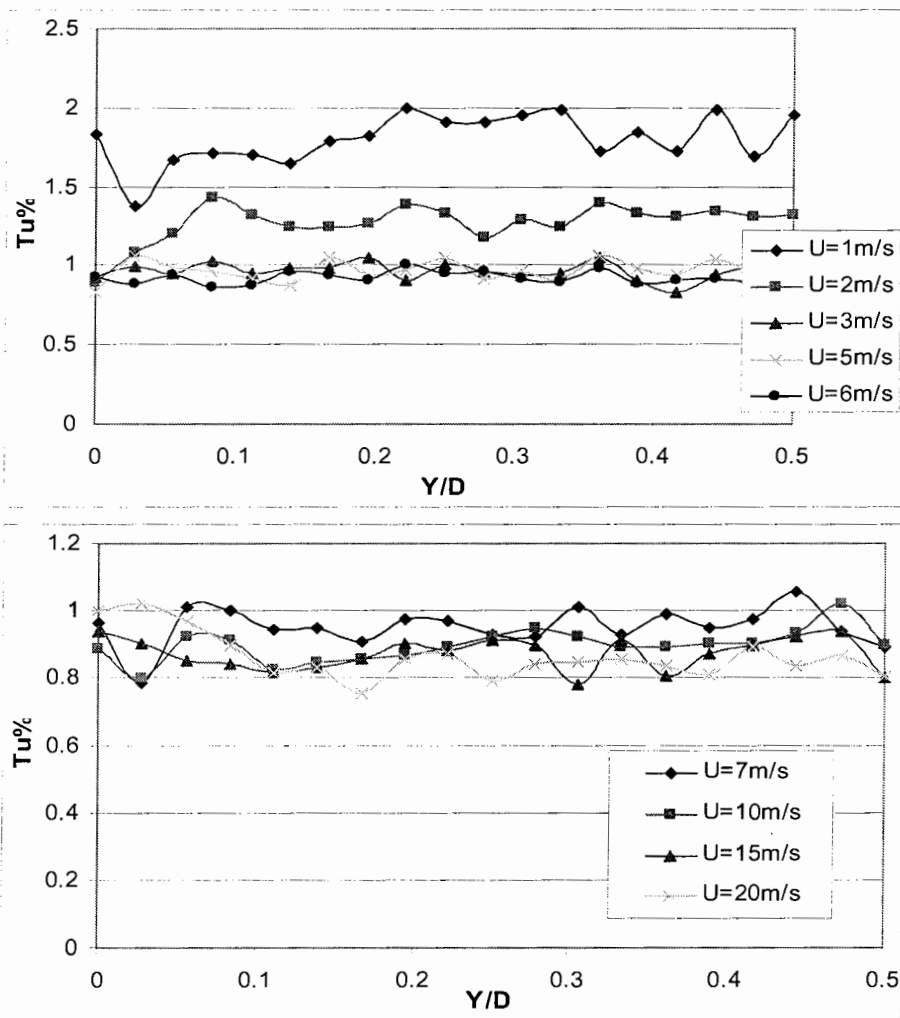
شکل (۸۱-۵) تغییرات ضخامت لایه مرزی اسپرومتر بر حسب سرعت جریان هوا



شکل (۸۲-۵) ضخامت جابجایی لایه مرزی (δ^*) اسپرومتر بر حسب سرعت جریان هوا

شکل (۸۳-۵) نیز شدت اغتشاشها در این حالت نشان می‌دهد که در این حالت نیز شدت اغتشاشها کاهش

یافته است.

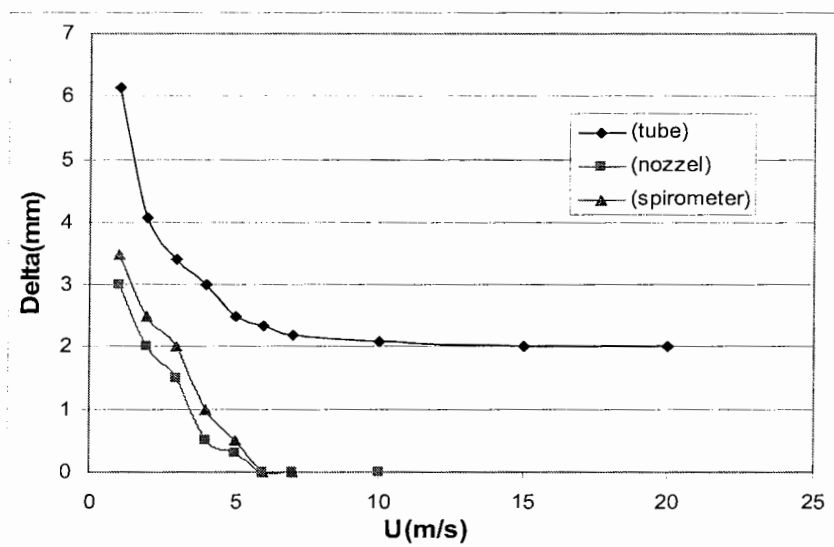


شکل (۸۳-۵) توزیع شدت اغتشاشها را در اسپرومتر در سرعت‌های مختلف

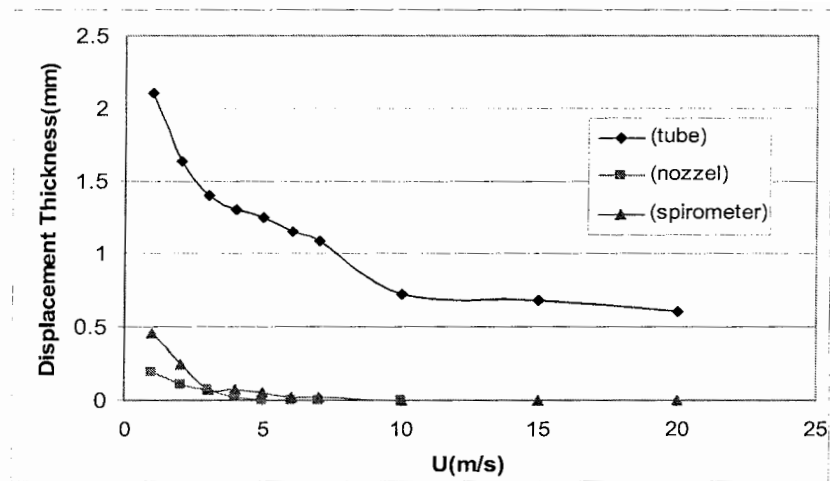
به منظور مقایسه بهتر شکل (۸۴-۵) و (۸۵-۵) ضخامت لایه مرزی و ضخامت جابجایی لایه مرزی ایجاد شده در لوله، نازل و اسپرومتر را با یکدیگر مقایسه می‌کند.

همانگونه که در شکل (۸۴-۵) مشاهده می‌کنید ضخامت لایه مرزی با افزایش سرعت کاهش می‌یابد و به مراتب مقدار آن در لوله بیشتر از نازل و اسپرومتر می‌باشد.

شکل (۸۵-۵) ضخامت جابجایی لایه مرزی و یا به عبارت دیگر اختلاف جریان لزوج و غیرلزوج را در لوله و نازل و اسپرومتر نشان می‌دهد.



شکل (۸۴-۵) مقایسه تغییرات ضخامت لایه مرزی اسپرومتر و نازل و لوله بر حسب سرعت جریان هوا



شکل (۵-۸) مقایسه تغییرات جابجایی ضخامت لایه مرزی اسپرومتر و نازل و لوله بر حسب سرعت جریان هوا

۵-۲-۷- آزمایش دبی‌سنجی جریان:

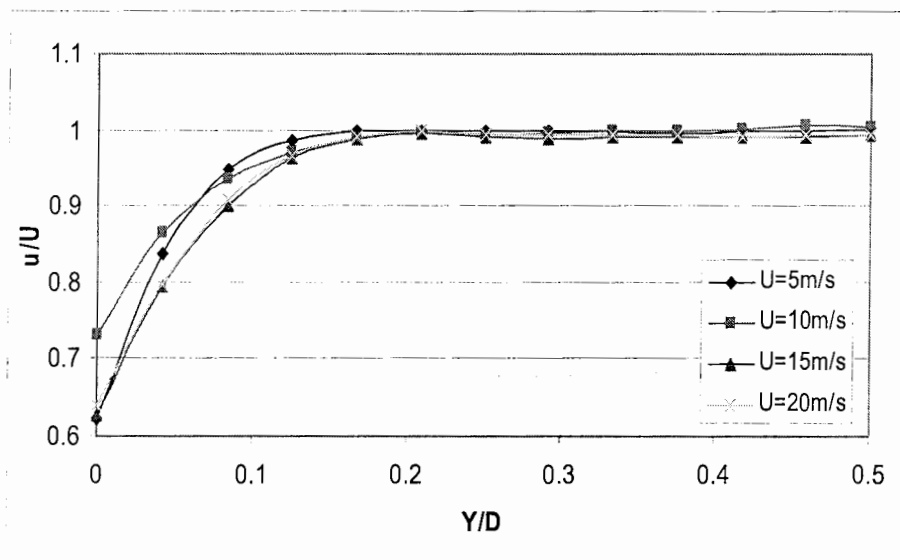
همانگونه که بیان شد اندازه‌گیری دبی حجمی جریان برای لوله در سرعت‌های کم به دلیل لزج بودن جریان دارای خطای زیادی می‌باشد. این خطا برای سرعت‌های $U=10 \text{ m/s}$ برای لوله به قطر $D=24 \text{ mm}$ حدود ۱۶٪ می‌باشد. ولی با استفاده از نازل، توزیع سرعت را در مقطع نازل یکنواخت نموده و خطای ناشی از جریان لزجی کاهش یافته و جریان بصورت غیرلزج درمی‌آید. بطوریکه در سرعت‌های بالا در نازل این خطا به صفر می‌رسد ولی در سرعت‌های پایین خطا وجود دارد. بنابراین برای سرعت‌های خیلی کم از روش کالیبراسیون و دبی‌سنجی استفاده می‌کنیم و در این حالت از فرض جریان لزج استفاده نکرده و دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ را بصورت مستقیم با استفاده از دبی‌سنج کالیبره می‌کنیم.

به منظور کالیبره نمودن از دبی‌سنج حرارتی (Thermal Anemometer) استفاده شده است. به منظور بررسی خطای در نظرگرفت جریان غیرلزج توزیع سرعت جریان هوا پایین دست دبی‌سنج نیز بررسی شده است.

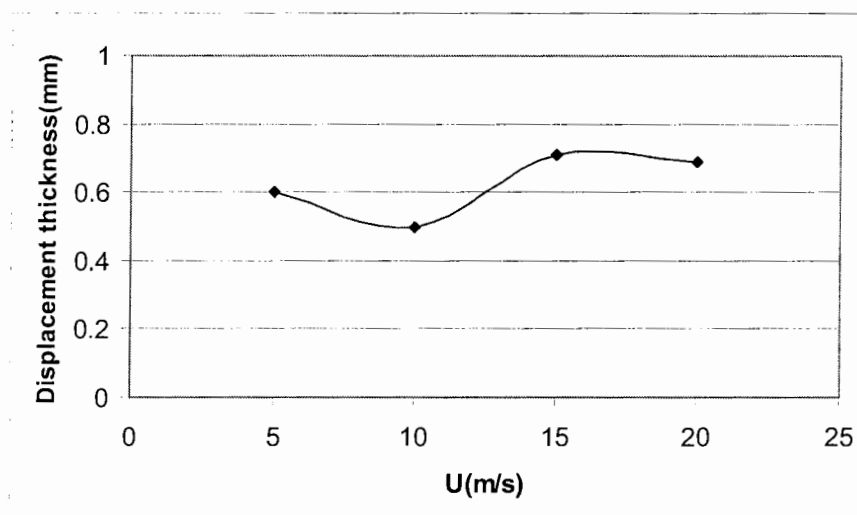
دبی‌سنج فوق دارای لانه‌زنبوری به منظور کاهش زاویه جریان و توری به منظور کاهش شدت اغتشاشها و یکنواخت بودن سرعت استفاده شده است. فاصله لانه‌زنبوری و توری از مقطعی که آزمایش انجام شده برابر می‌باشد. شکل (۵-۸۶) توزیع سرعت در دبی‌سنج را نشان می‌دهد. سرعت با استفاده از سرعت جریان آزاد بی‌بعد شده است. همانگونه که در شکل نشان داده شده است توزیع سرعت دارای لایه مرزی می‌باشد و این لایه مرزی سبب می‌شود که خطا در اندازه‌گیری دبی حجمی می‌شود. همانگونه که در شکل نشان داده شده است ضخامت لایه مرزی در سرعت‌های مختلف دارای تغییرات شدید نمی‌باشد. به منظور بررسی بهتر جریان لزج ضخامت جابجایی لایه مرزی δ^* مورد بررسی قرار می‌گیرد. این ضخامت جابجایی در

شکل (۸۷-۵) نشان داده شده است. این ضخامت جابجایی بین حدود ۰/۶ تا ۰/۷ ثابت می باشد که خطای

آن بین $5\% = \frac{0/6 \times 2}{24}$ تا $6\% = \frac{0/7 \times 2}{24}$ می باشد.

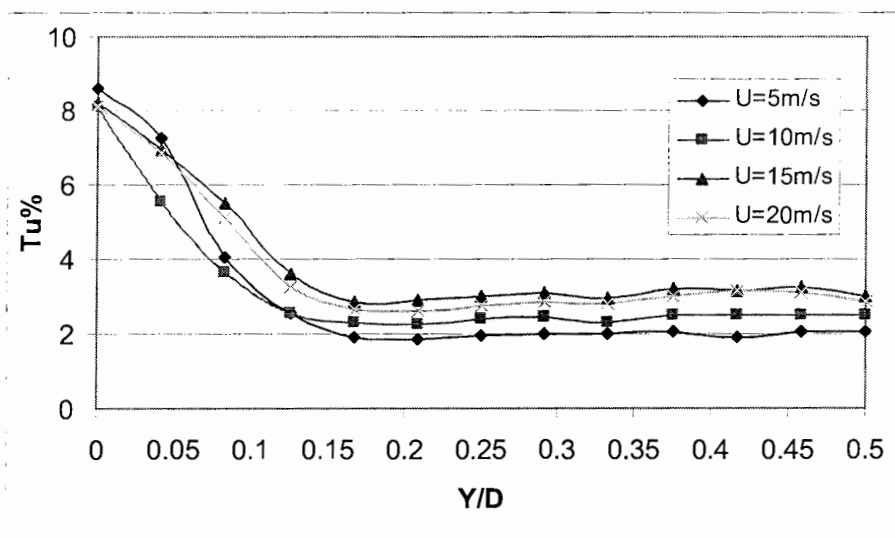


شکل (۸۶-۵) توزیع سرعت در دبی سنج



شکل (۸۷-۵) ضخامت جابجایی لایه مرزی در سرعت های مختلف

چون خطا دارای مقدار تقریباً ثابتی است می‌توان این خطا را در محاسبات در نظر گرفت و نتایج بهتری را داشته‌باشیم. شکل (۵-۸۷) توزیع شدت‌اغتشاشهای جریان‌هوا را در لوله نشان داده شده‌است. همانگونه‌که ملاحظه می‌شود شدت‌اغتشاشهای جریان‌هوا در نزدیکی دیواره زیاد بوده و با حرکت به سمت مرکز لوله این مقدار کاهش می‌یابد. هنگامی‌که از لایه‌مرزی خارج می‌شویم این مقدار با شیب بیشتری کاهش می‌یابد. که از این مکان به بعد برای اندازه‌گیری جریان با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ مناسب می‌باشد بنابراین می‌توان دبی‌سنجها را با دقت مناسب با استفاده از سرعت مناسب در مرکز لوله و در نظر گرفتن جریان غیرلزج و با استفاده از پارامتر تصحیح آنرا به راحتی کالیبره‌نمود و در مراحل بعدی آزمایش از آن استفاده کرد.



شکل (۵-۸۷) توزیع شدت‌اغتشاشهای جریان‌هوا در دبی‌سنج

فصل ششم

نتیجه گیری

نتیجه‌گیری:

با بررسی نتایج بدست‌آمده از آزمایشات انجام‌شده که در بخش‌های قبل توضیح داده‌شد برای اندازه‌گیری جریان معکوس می‌توان به نتایج زیر رسید.

۱-۶) با استفاده از مفتول و دو سنسور که در بالادست و پایین‌دست آن قرار دارد می‌توان جریان معکوس را اندازه‌گیری و مشخص نمود بطوریکه سنسور دوم تحت تاثیر دنباله مفتول قرار می‌گیرد و سرعت آن بسیار کاهش می‌یابد. بهترین فاصله قرار دادن سنسور نسبت به مفتول حدود $\frac{x}{D}=1$ تا $\frac{x}{D}=2$ می‌باشد و قطر مفتول برای این کار حدود $1/5\text{mm}$ تا $D=2$ می‌تواند مناسب باشد. با بررسی داده‌های پایین‌دست صفحه‌نازک قویتر از مفتول بوده بنابراین برای اندازه‌گیری جریان معکوس بهتر است از صفحه استفاده شود. ۲-۶) روش دیگر برای اندازه‌گیری جریان معکوس استفاده از گردابه‌های پایین‌دست مفتول می‌باشد بطوریکه سنسور پایین‌دست در صورتیکه بتواند گردابه‌ها را اندازه‌گیری کند جهت جریان هوا و سرعت آن مشخص می‌شود. ناحیه‌هایی که گردابه‌ها دیده می‌شوند در حد فاصل $2 < \frac{x}{D} < 10$ و $-2 < \frac{Y}{D} < 2$

می‌باشد. استفاده از این روش در جریان معکوس با توجه به مکان مشاهده گردابه‌های کارمن (karman vortex) مشکل می‌باشد.

۳-۶) با استفاده از گردابه‌های کارمن (karman vortex) ایجاد شده در پایین دست مفتول می‌توان جریان معکوس را مشاهده نمود لازم به ذکر است که در نزدیکی مفتول over flow وجود دارد و همچنین با افزایش پایین دست مفتول گردابه‌ها تغییر فرکانس می‌دهند. بنابراین در ناحیه $4 < \frac{x}{D} < 6$ و $-2 < \frac{Y}{D} < 2$ مناسب‌ترین نقطه برای کالیبراسیون جریان سنج سیم‌داغ با استفاده از گردابه‌های کارمن (karman vortex) می‌باشد.

۴-۶) برای اندازه‌گیری جریان معکوس همچنین می‌توان از دو سنسور فیلم‌داغ استفاده نمود با توجه به اینکه قطر سنسور 0.125mm می‌باشد. در صورتیکه دو سنسور را موازی یکدیگر قرار دهیم اثر دنباله حرارتی و دنباله سیالاتی سنسور اول به روی سنسور دوم سبب کاهش ولتاژ شده و در نتیجه سرعت نیز کاهش می‌یابد و با استفاده از این روش می‌توان جریان معکوس را اندازه‌گیری کرد. در سرعت $3\text{m/s} < U < 15\text{m/s}$ اثر دنباله حرارتی تا $60 < \frac{x}{D} < 180$ می‌باشد و دنباله سیالاتی در سرعت $3\text{m/s} < U < 15\text{m/s}$ تا $180 < \frac{x}{D} < 200$ اثر دارد. همانطور که ملاحظه می‌شود طول دنباله سنسور اول با افزایش سرعت افزایش یافته ولی اثر حرارتی ناشی از سنسور بالادست با افزایش سرعت کاهش پیدامی‌کند. لازم به ذکر است هنگامیکه سرعت نزدیک به صفر می‌باشد انتقال حرارت جابجایی آزاد به جابجایی اجباری غلبه می‌کند و اثر حرارتی سنسور بالادست به پایین دست ناچیز می‌شود.

این روش برای اندازه‌گیری جریان معکوس با اغتشاش‌های بالا مناسب نمی‌باشد.

۵-۶) به منظور کاهش اثر شدت اغتشاش‌ها و همچنین یکنواخت نمودن توزیع جریان هوا و کاهش لایه مرزی می‌توان در بالادست و پایین دست سنسورها از توری استفاده نمود. توریها سبب کاهش شدت اغتشاش‌ها و

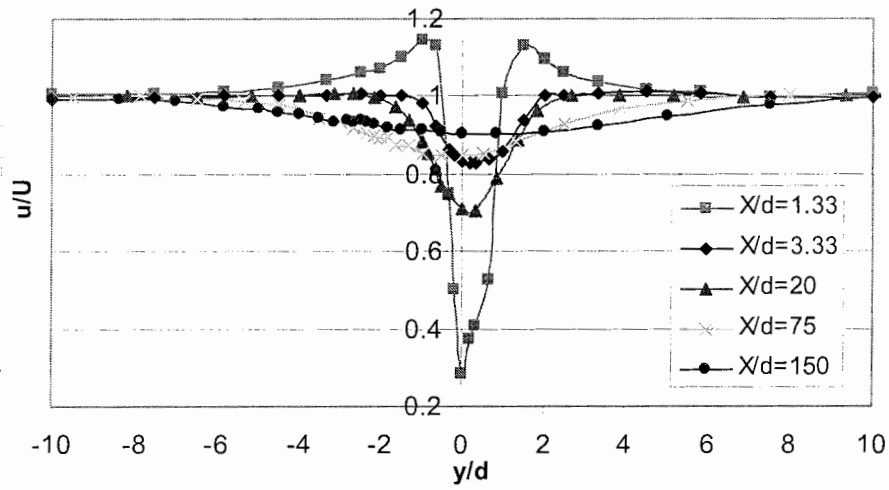
کاهش ضخامت جابجایی لایه مرزی می‌شوند، بطوریکه برای توری با مش ۲۴ و $\beta = 0.43$ کاهش شدت اغتشاشها حدود ۲ تا ۲.۵ درصد می‌باشد و کاهش ضخامت جابجایی لایه مرزی از $\delta^* = 3\text{mm}$ برای بدون توری تا $\delta^* = 0.5\text{mm}$ با توری می‌باشد. محل مناسب قرارگیری سنسور ۵۰mm تا ۷۰mm پایین دست توری است.

۶-۶) اسپيرومتر یکی از کاربردهای مهم جریان معکوس است. اسپيرومتری یکی از روشهای اندازه‌گیری حجم ریه می‌باشد. با استفاده از اسپيرومتر جریان دم و بازدم انسان اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به اینکه جریان سنج سیم‌داغ قادر است سرعت لحظه‌ای را با دقت بالا و فرکانس بالا اندازه‌گیری نماید و همچنین برای اندازه‌گیری سرعتهای کم مناسب است (با روشهای دیگر اندازه‌گیری مشکل است). جریان سنج سیم‌داغ را می‌توان در دستگاه اسپيرومتر بکار برد، با توجه به اینکه دستگاه اسپيرومتر جریان دم و بازدم را اندازه‌گیری می‌کند به همین دلیل نیاز است جریان معکوس را اندازه‌گیری نمود که در این حالت با توجه به نتایج بدست آمده از دو سنسور به فاصله $L = 2/5\text{mm}$ که در وسط آن از صفحه نازک به ضخامت 2mm و پهنای $S = 1/5\text{mm}$ استفاده می‌شود که آنها برای اندازه‌گیری دم و بازدم (معکوس) استفاده شده‌است. با توجه به اینکه اسپيرومتری دبی حجمی ریه را اندازه‌گیری می‌کند و جریان سنج سیم‌داغ سرعت محلی را اندازه‌گیری می‌کند نیاز است که توزیع سرعت به خوبی در مقطعی که سنسورها در اسپيرومتر قرار دارد مورد بررسی قرار گیرد. به منظور بررسی جریان یکنواخت در مقطع سنسورها از نازل با مشخصات ذکر شده در بخش قبل استفاده شده است. این نازل غیریکنواختی جریان ناشی از ناحیه مرزی تشکیل شده در لوله است را کاهش می‌دهد که بستگی به سرعت داشته که در سرعتهای بالا، ضخامت لایه مرزی به صفر نیز کاهش می‌یابد. تجربه نشان می‌دهد علی‌رغم اینکه توزیع سرعت توسط نازل و توری یکنواخت می‌شوند. با استفاده از توری یکنواختی آن تا حدود ۲ تا ۲/۵ درصد می‌باشد و با استفاده از نازل

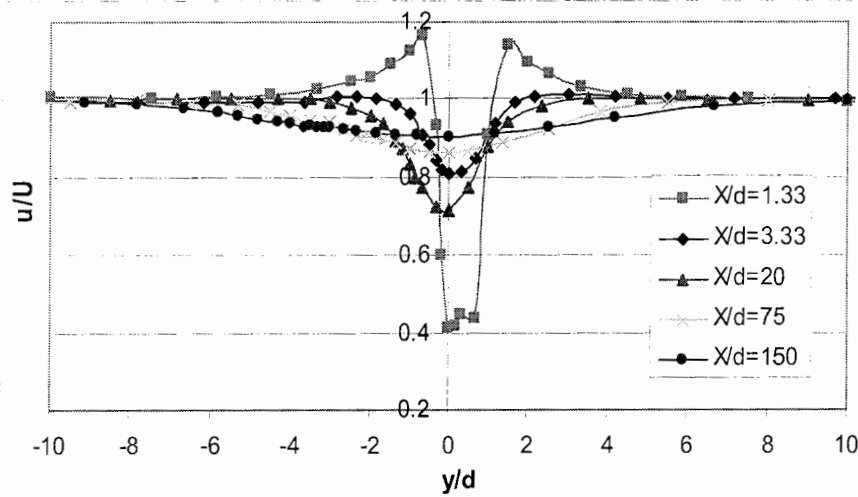
حدود $1/5$ تا $2/5$ درصد کاهش می‌دهد (بستگی به سرعت دارد)، بهتر است که برای کالیبره نمودن دستگاه اسپرومتر از روش دبی حجمی استفاده شود.

۶-۷) نتایج تحقیقات انجام شده در مورد جریان معکوس در دستگاه اسپرومتر بکار گرفته شد و نتایج موفقیت آمیزی در اندازه‌گیری جریان دم و بازدم (معکوس) بدست آمده است.

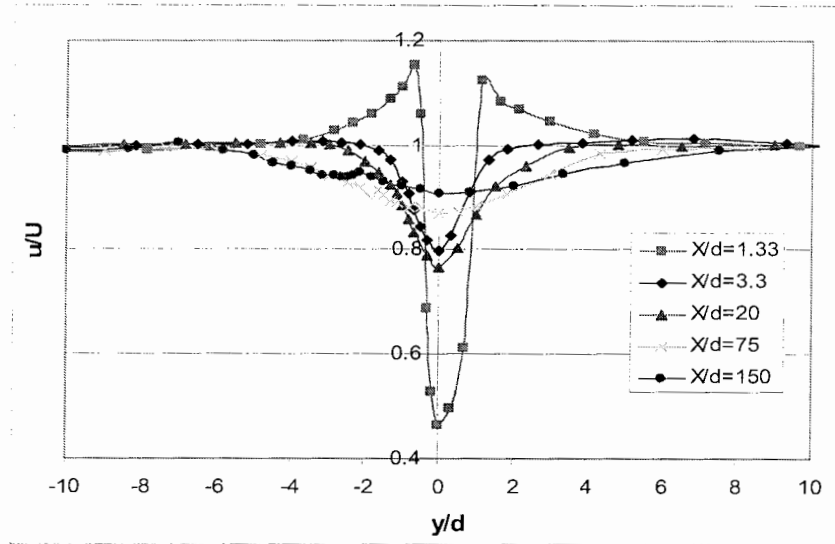
پیوست



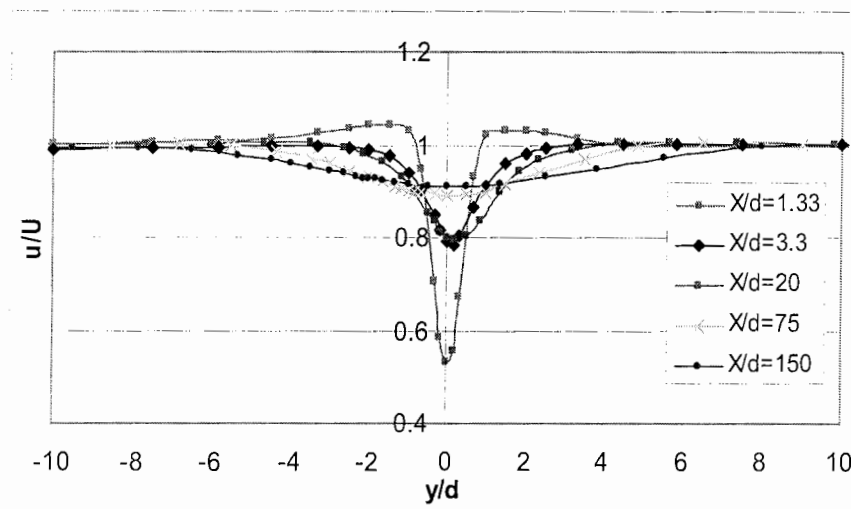
شکل (۱) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=0.6\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$



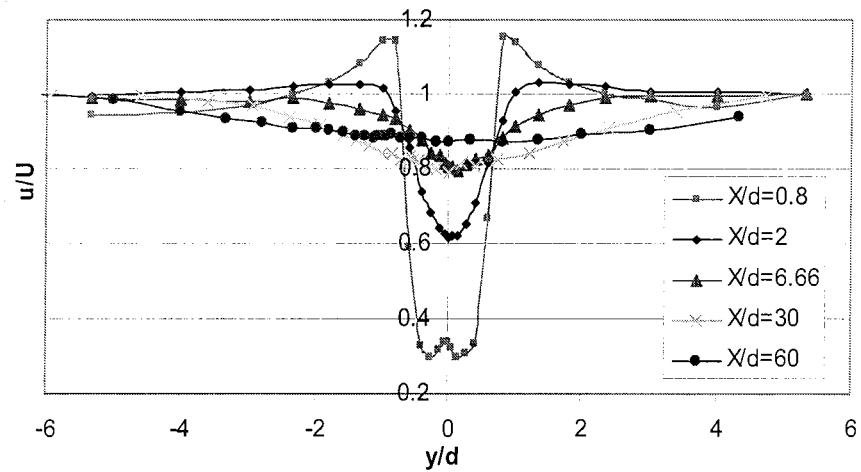
شکل (۲) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=0.6\text{mm}$ در سرعت $U=10\text{m/s}$



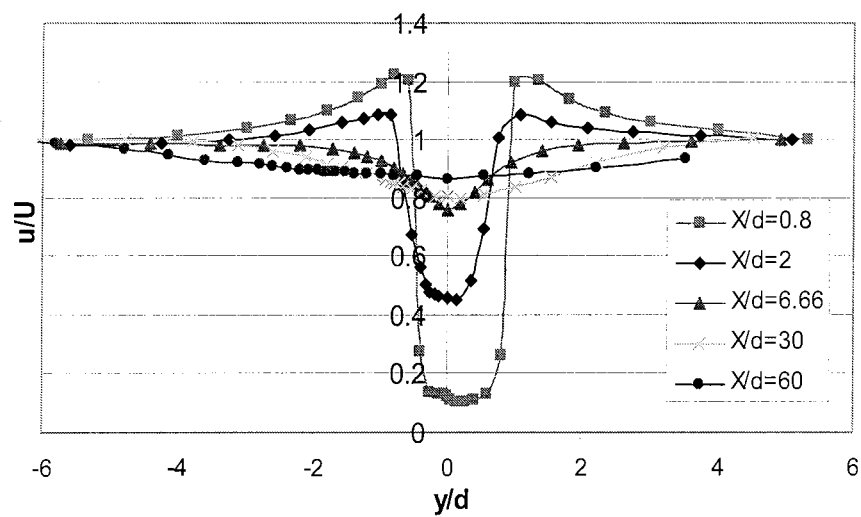
شکل (۳) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=0.6\text{mm}$ در سرعت $U=15\text{m/s}$



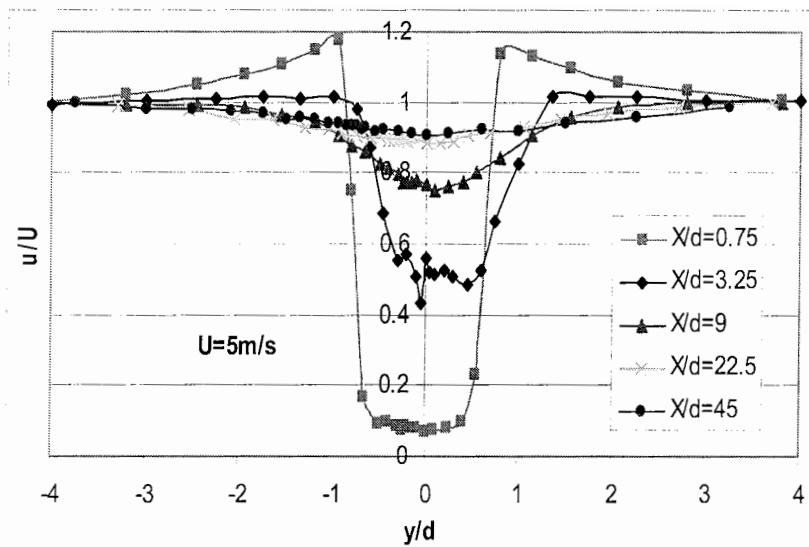
شکل (۴) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=0.6\text{mm}$ در سرعت $U=20\text{m/s}$



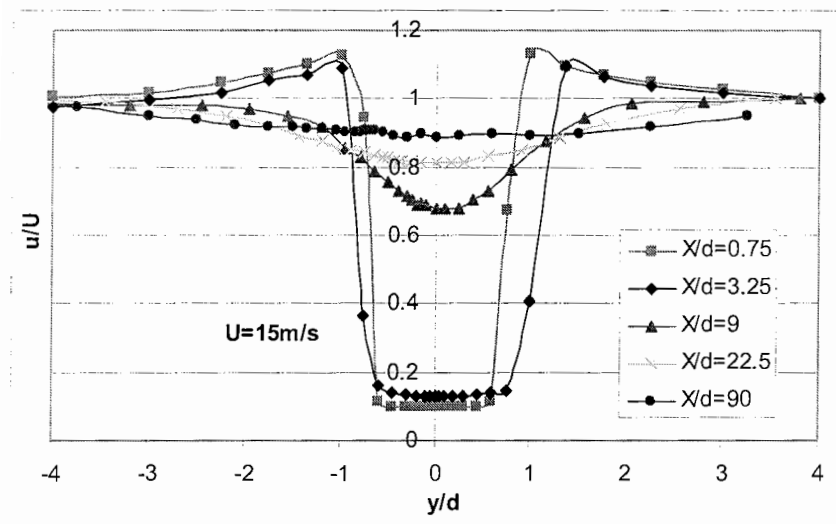
شکل (۵) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=1.5\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$



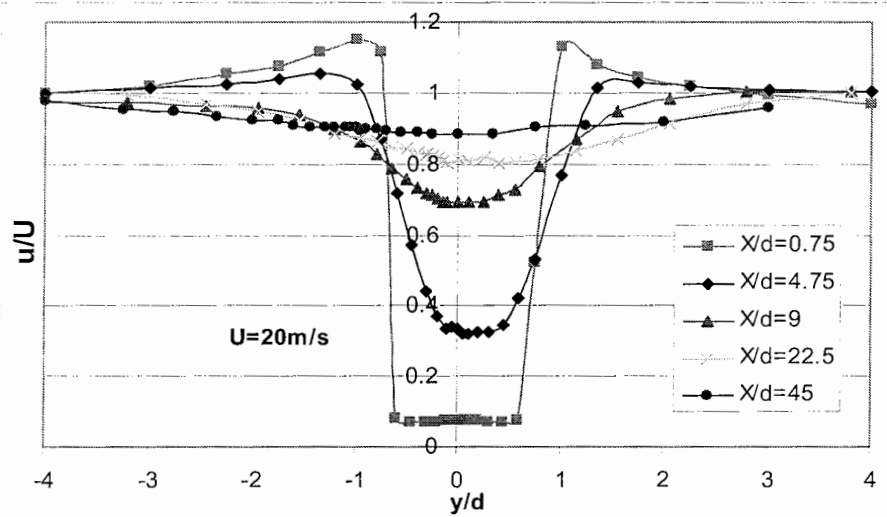
شکل (۶) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=1.5\text{mm}$ در سرعت $U=10\text{m/s}$



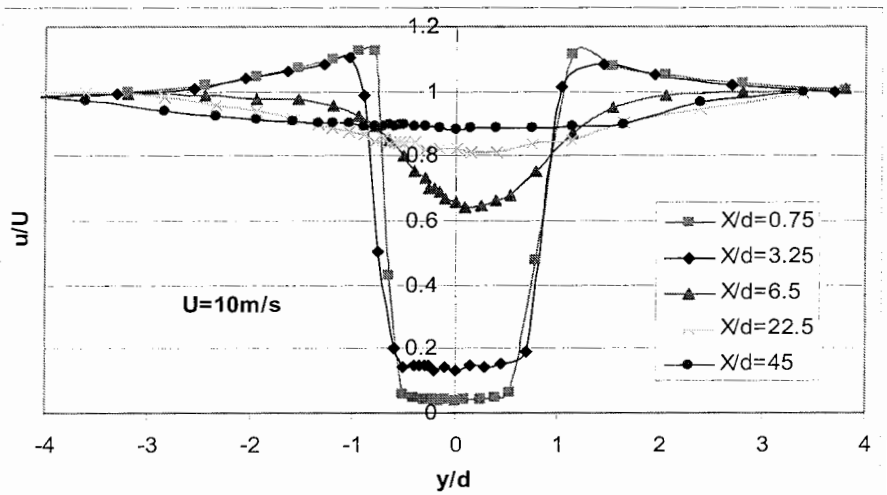
شکل (۷) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=2\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$



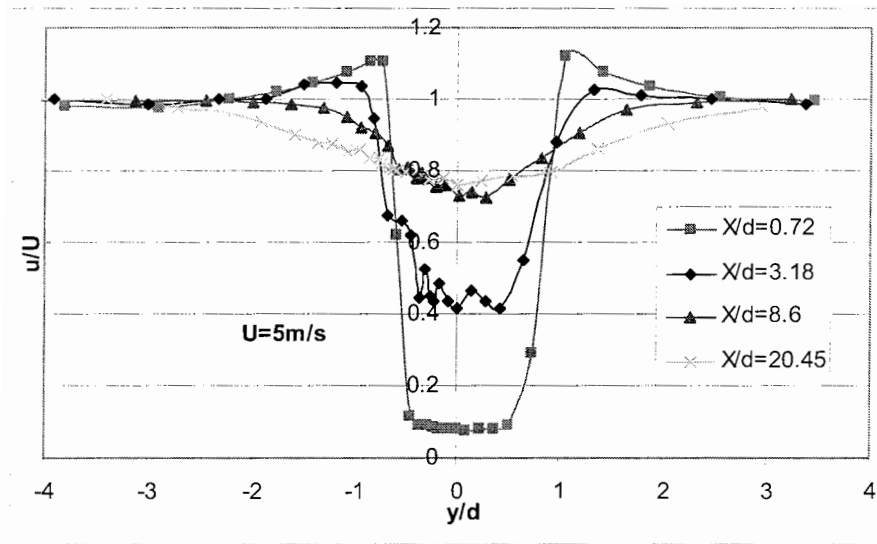
شکل (۸) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=2\text{mm}$ در سرعت $U=10\text{m/s}$



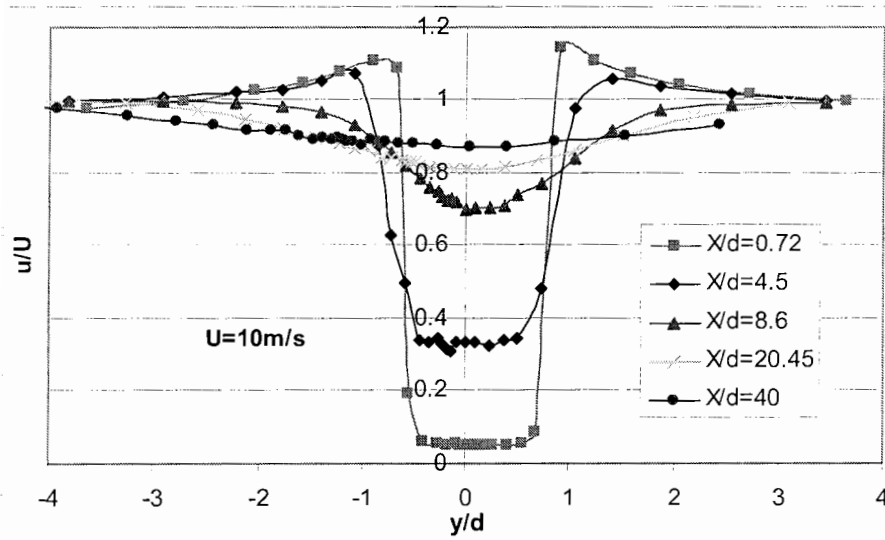
شکل (۹) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=2\text{mm}$ در سرعت $U=15\text{m/s}$



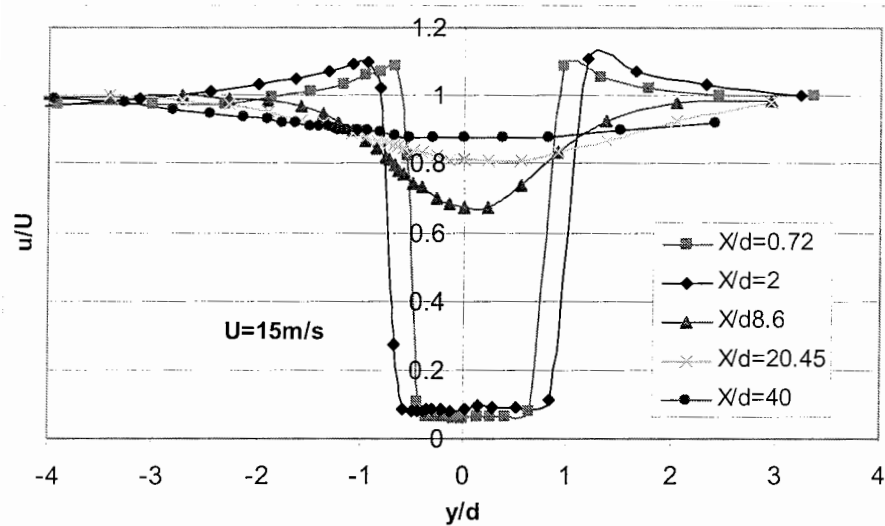
شکل (۱۰) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=2\text{mm}$ در سرعت $U=20\text{m/s}$



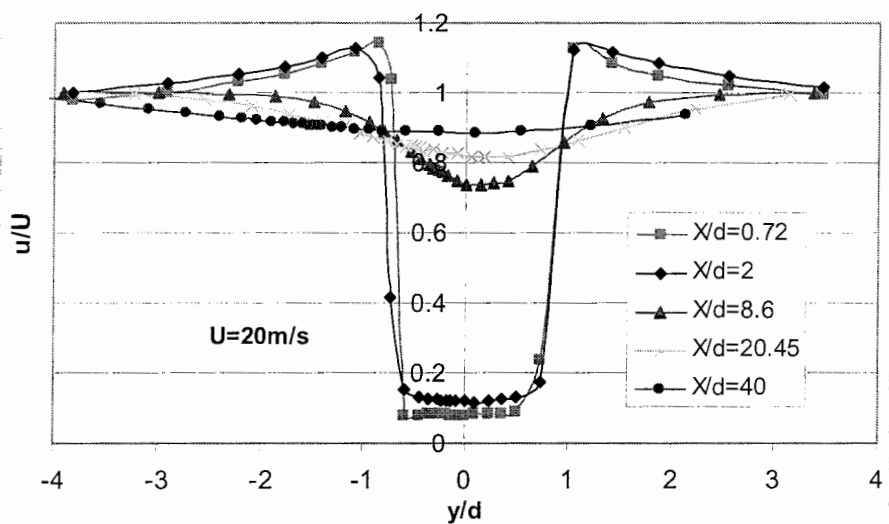
شکل (۱۱) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=2.2\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$



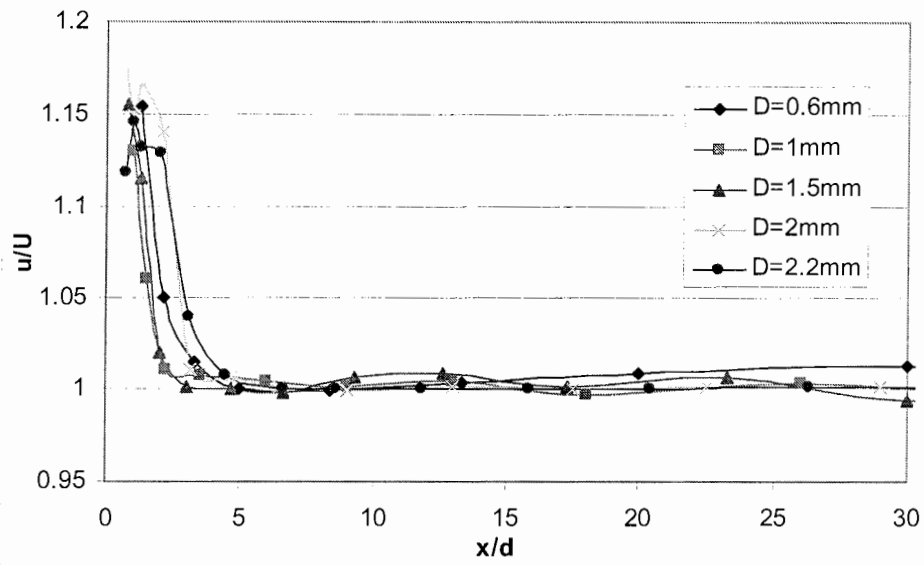
شکل (۱۲) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=2.2\text{mm}$ در سرعت $U=10\text{m/s}$



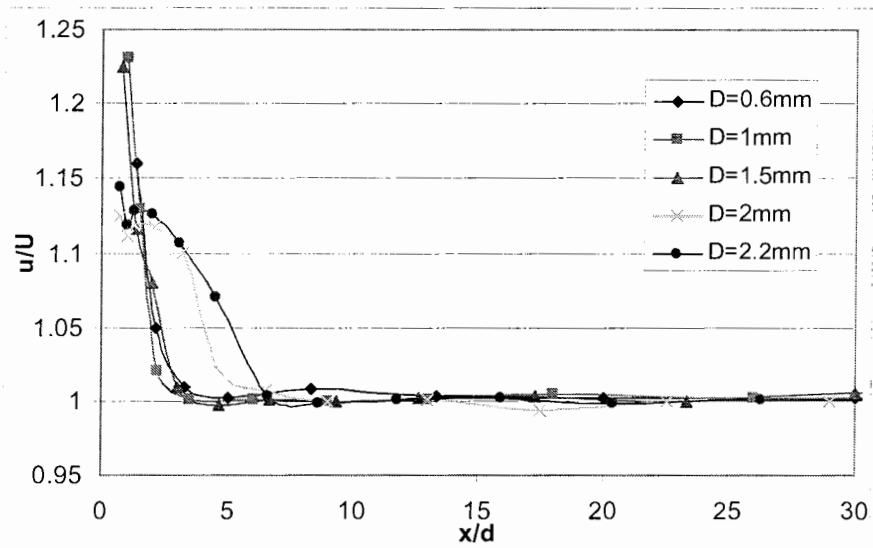
شکل (۱۳) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=2.2\text{mm}$ در سرعت $U=15\text{m/s}$



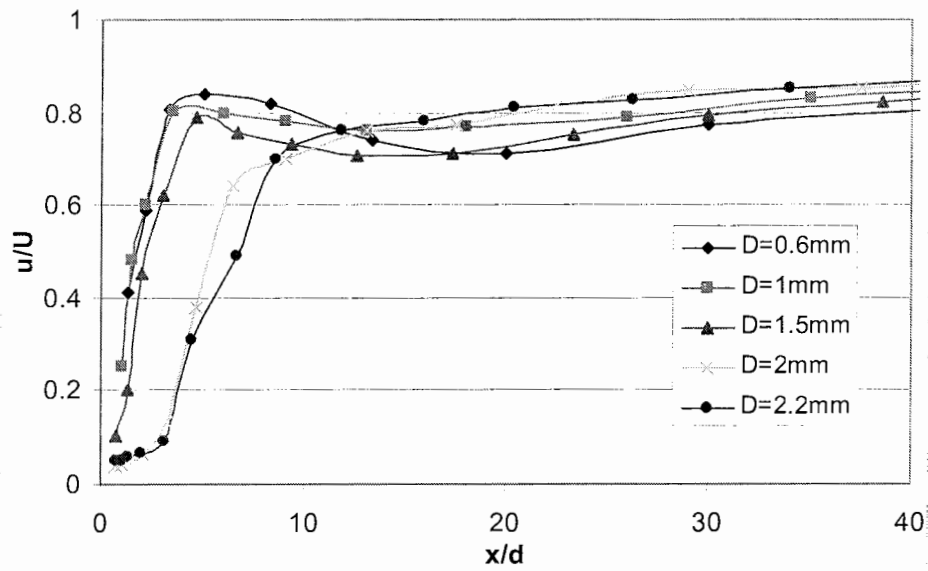
شکل (۱۴) توزیع سرعت متوسط جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=2.2\text{mm}$ در سرعت $U=20\text{m/s}$



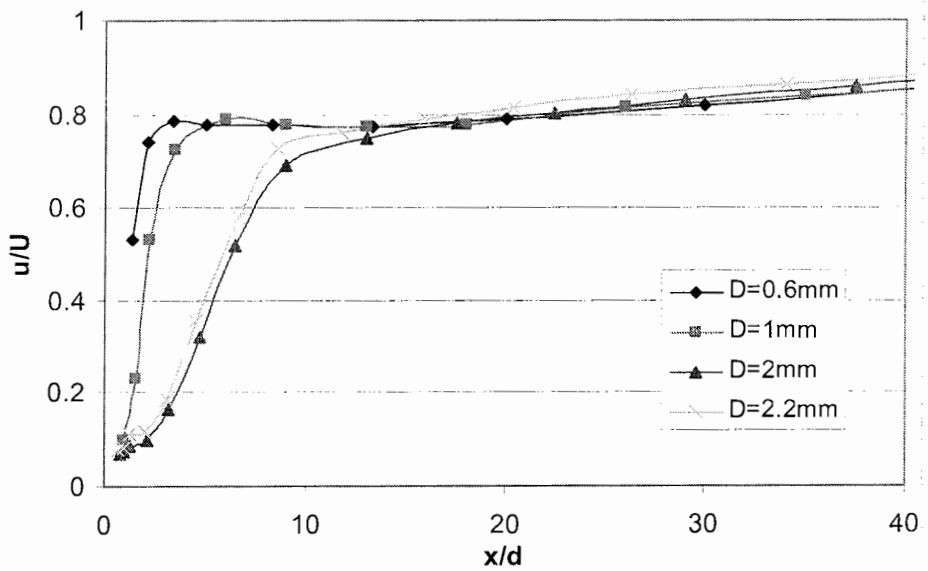
شکل (۱۵) توزیع بیشترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=5\text{m/s}$



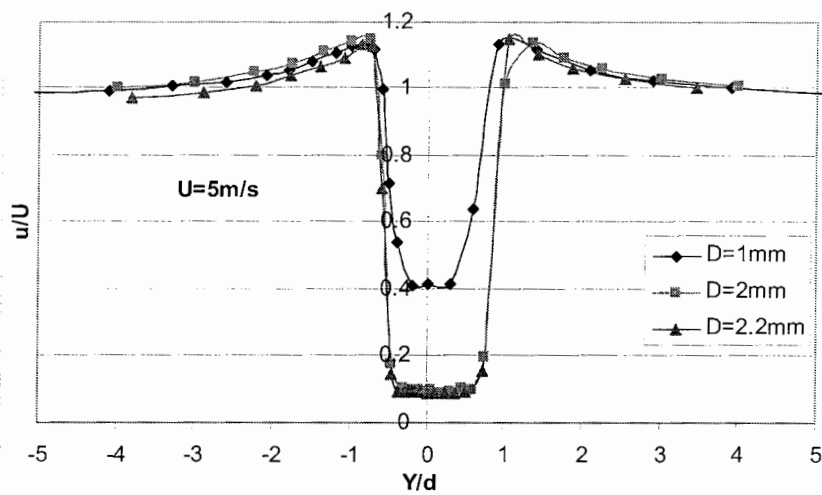
شکل (۱۶) توزیع بیشترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=10\text{m/s}$



شکل (۱۹) توزیع کمترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=10m/s$

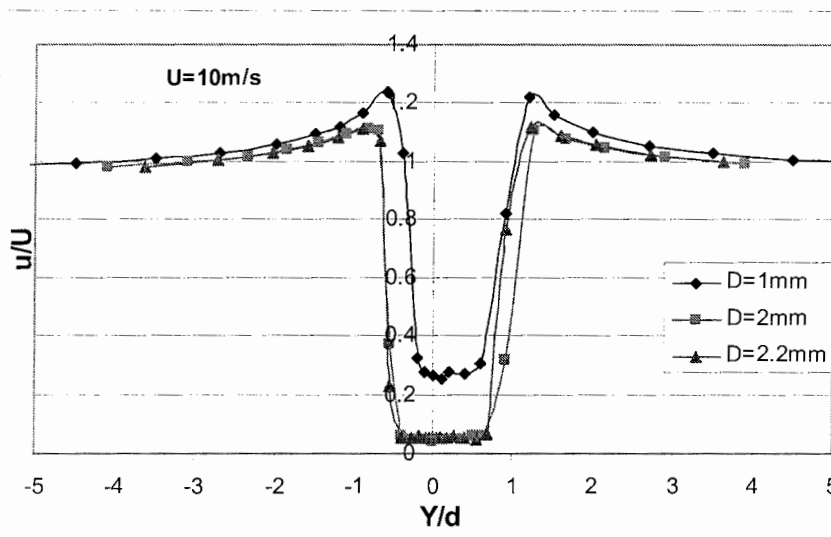


شکل (۲۰) توزیع کمترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=20m/s$



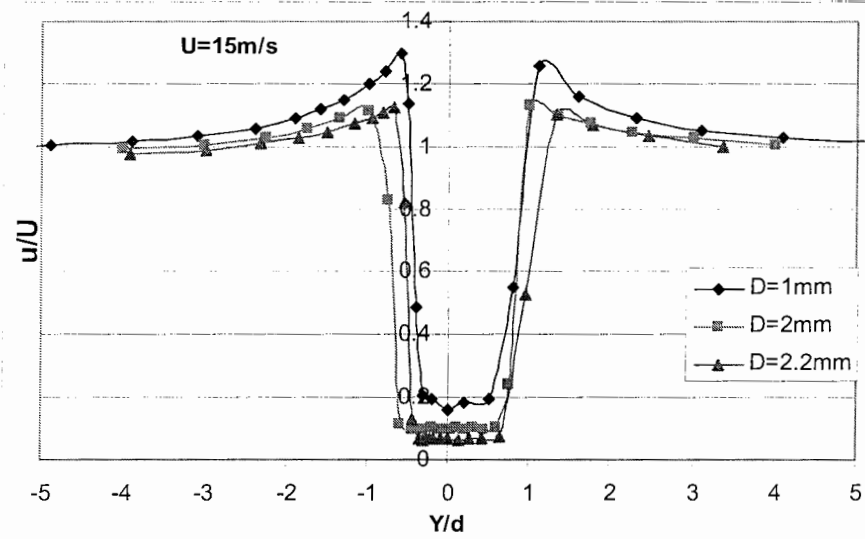
شکل (۲۱) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D=1$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در سرعت

$U=5\text{m/s}$

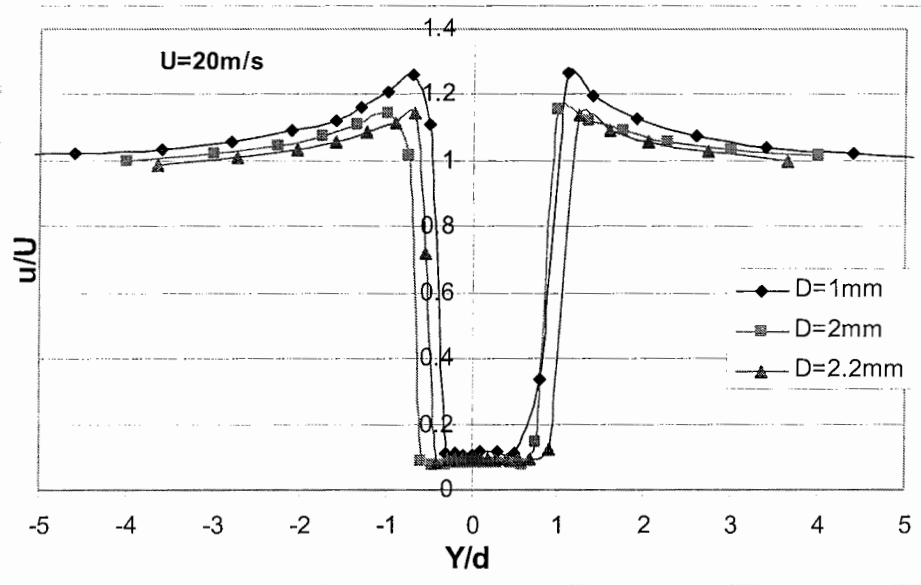


شکل (۲۲) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D=1$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در سرعت

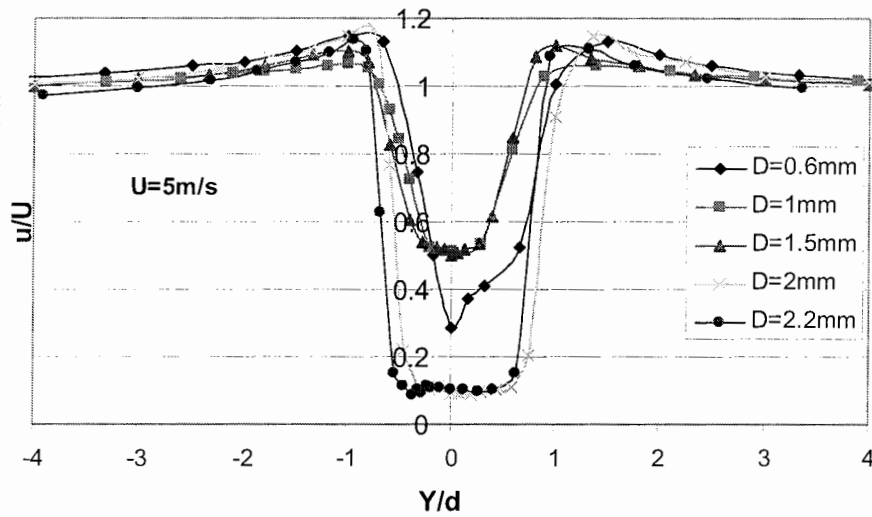
$U=10\text{m/s}$



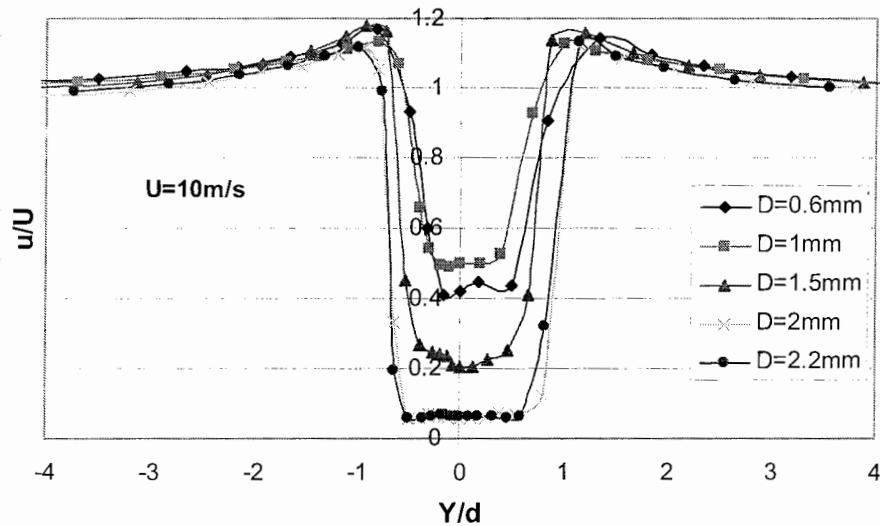
شکل (۲۳) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D=1$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=15\text{m/s}$



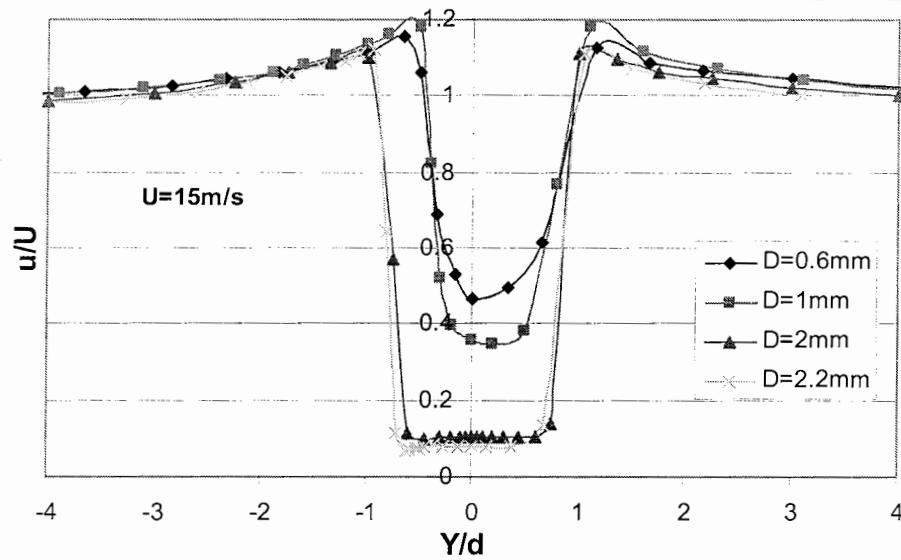
شکل (۲۴) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D=1$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=20\text{m/s}$



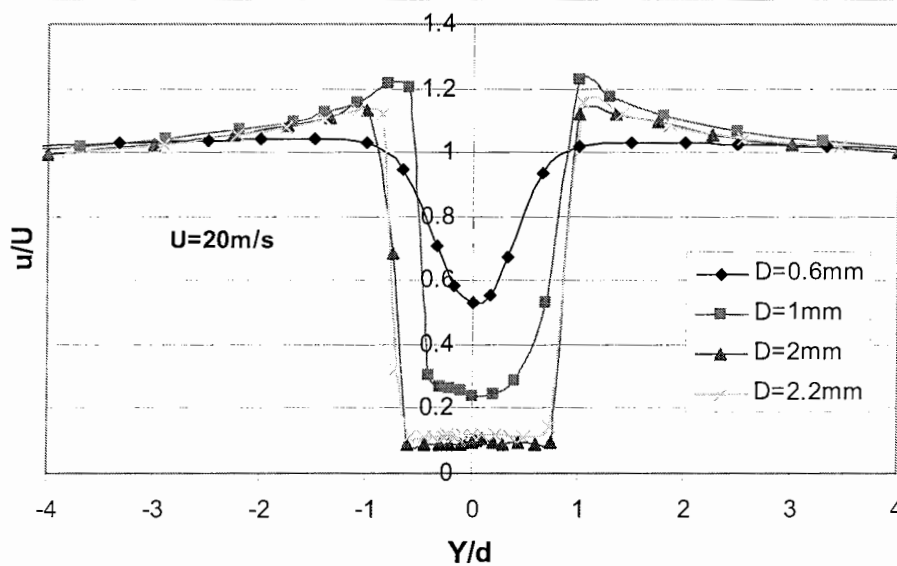
شکل (۲۵) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D=1.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=5\text{m/s}$



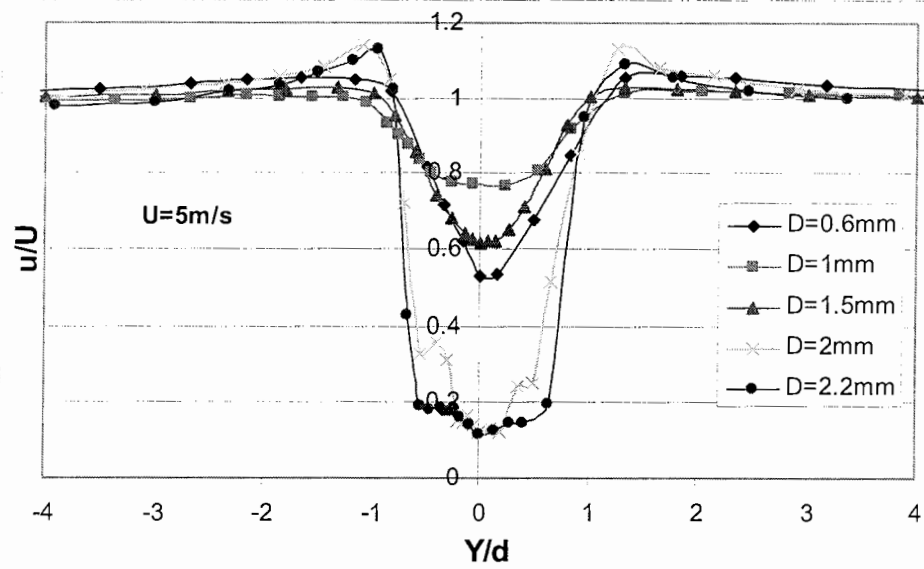
شکل (۲۶) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D=1.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=10\text{m/s}$



شکل (۲۷) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D=1.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در
 سرعت $U=15\text{m/s}$

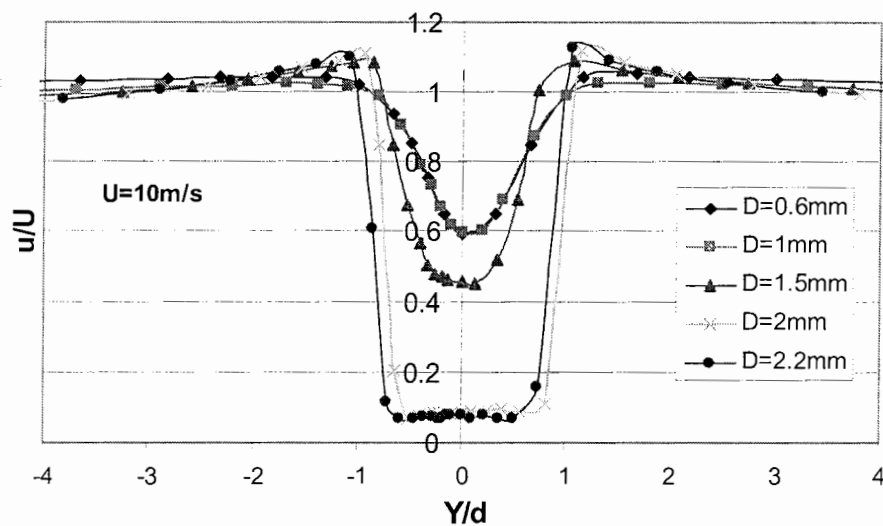


شکل (۲۸) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D=1.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در
 سرعت $U=20\text{m/s}$



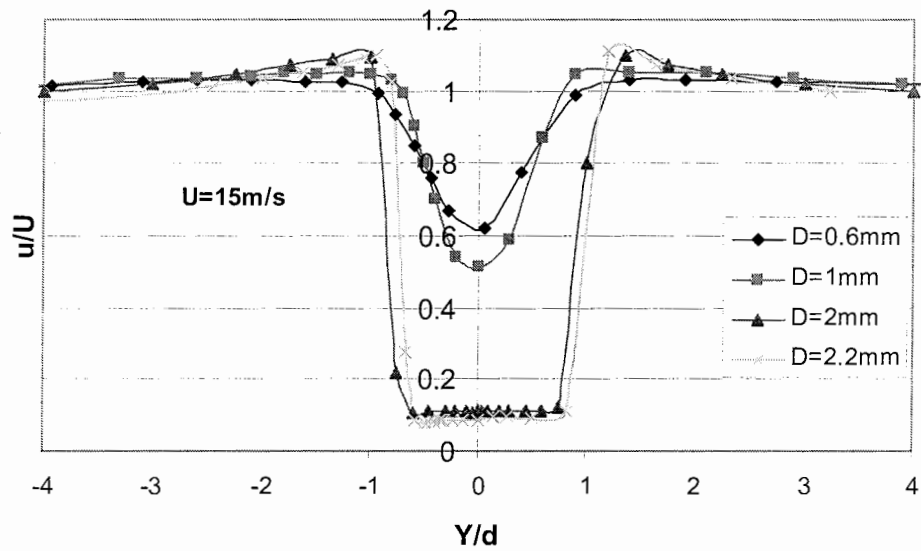
شکل (۲۹) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D=2$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در

سرعت $U=5\text{m/s}$



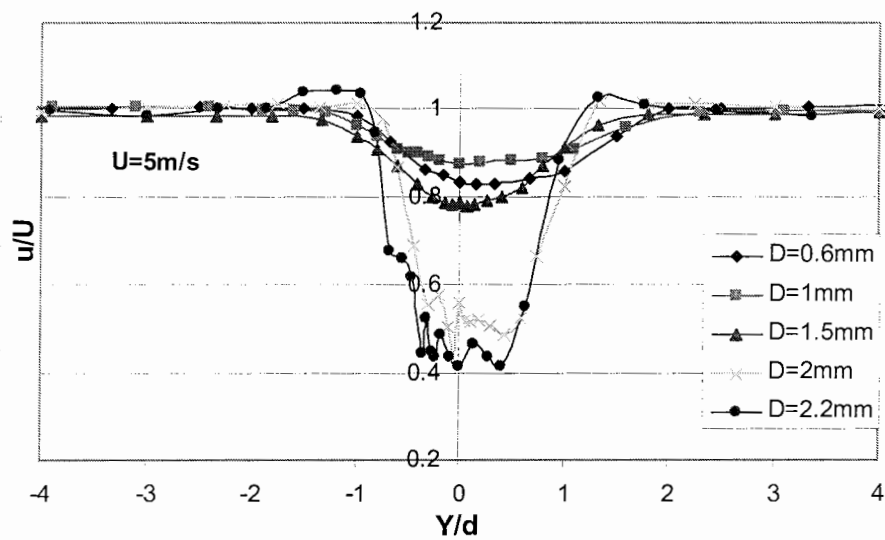
شکل (۳۰) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D=2$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در

سرعت $U=10\text{m/s}$



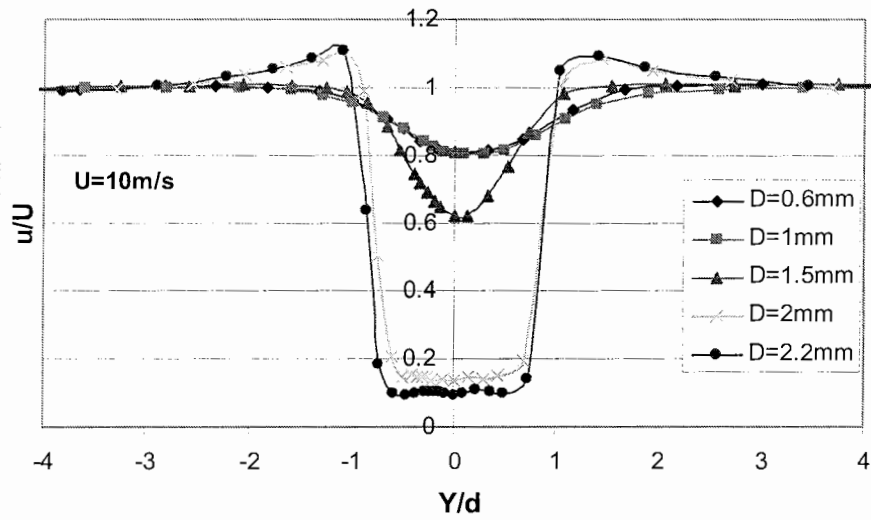
شکل (۳۱) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 2$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در

سرعت $U=15\text{m/s}$

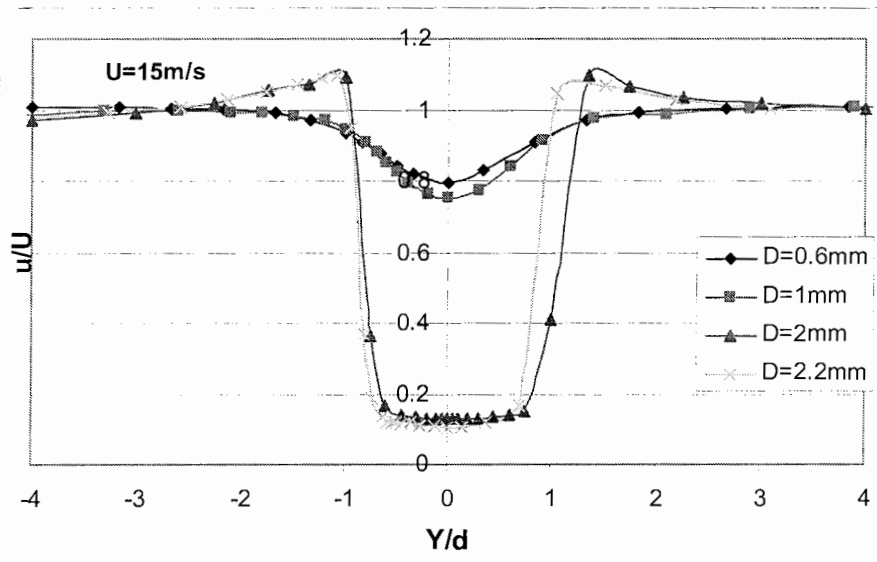


شکل (۳۲) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 3.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در

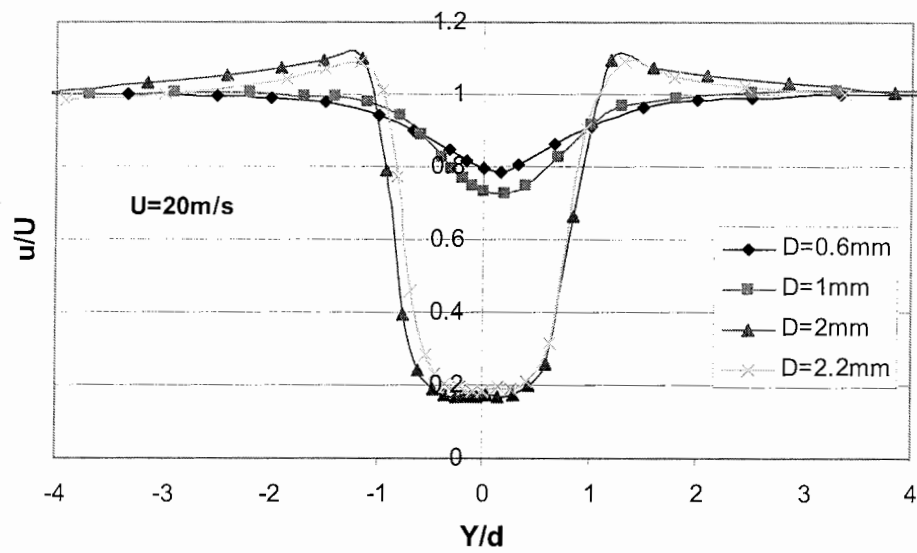
سرعت $U=5\text{m/s}$



شکل (۳۳) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 3.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در $U=10\text{m/s}$ سرعت

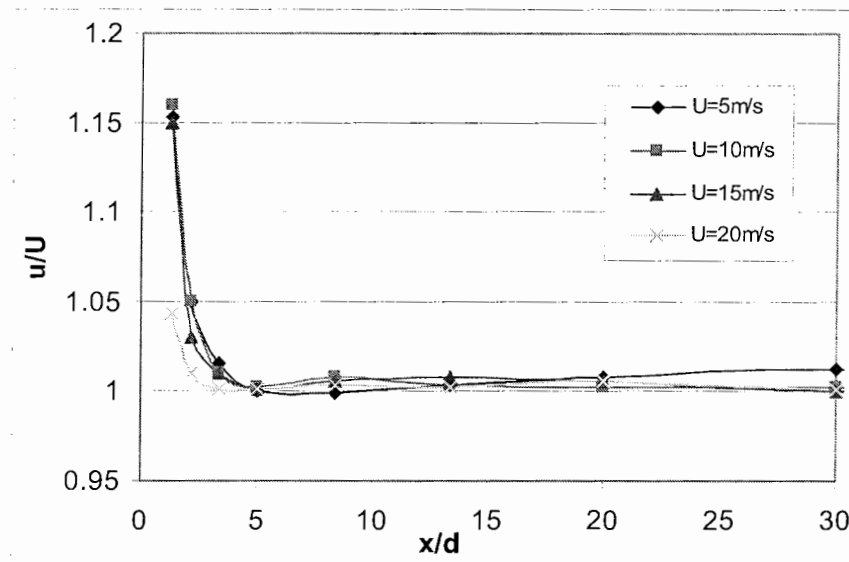


شکل (۳۴) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 3.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در $U=15\text{m/s}$ سرعت



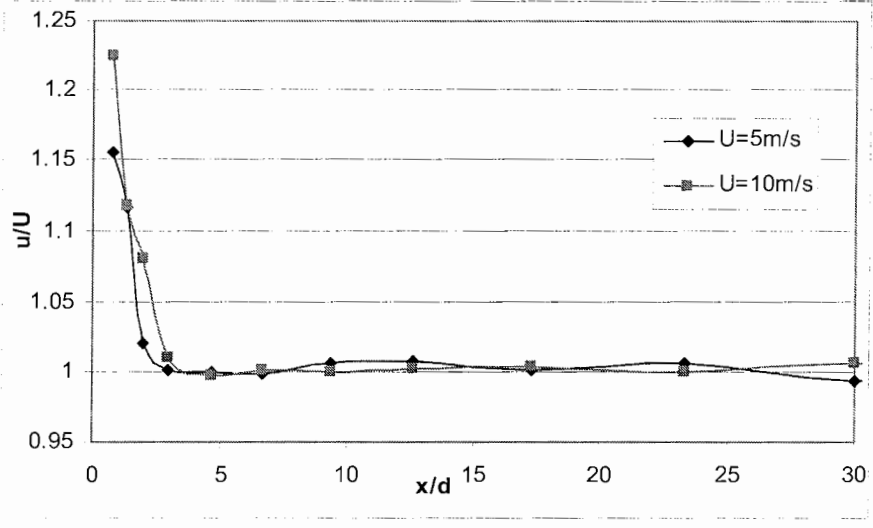
شکل (۳۵) توزیع سرعت بر حسب Y/D در فاصله $X/D=3.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در

سرعت $U=20\text{m/s}$

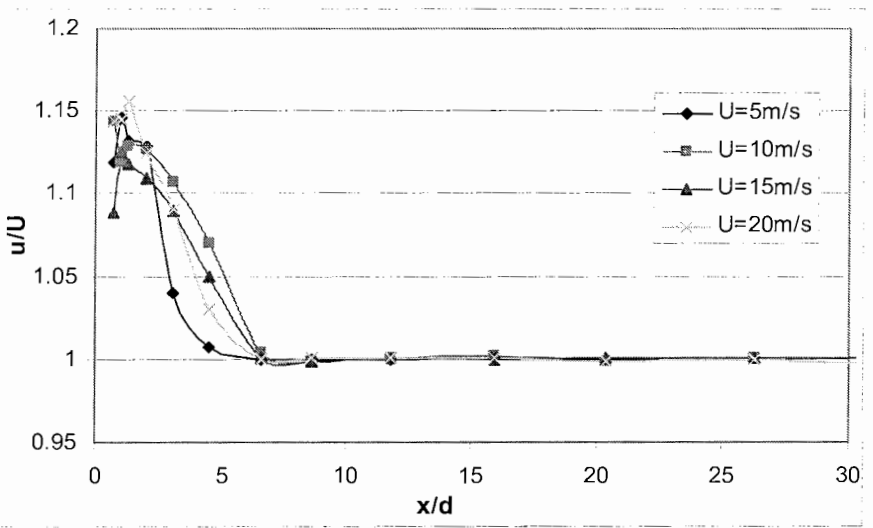


شکل (۳۶) توزیع بیشترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول به قطر $D=0.6\text{mm}$ در سرعت‌های

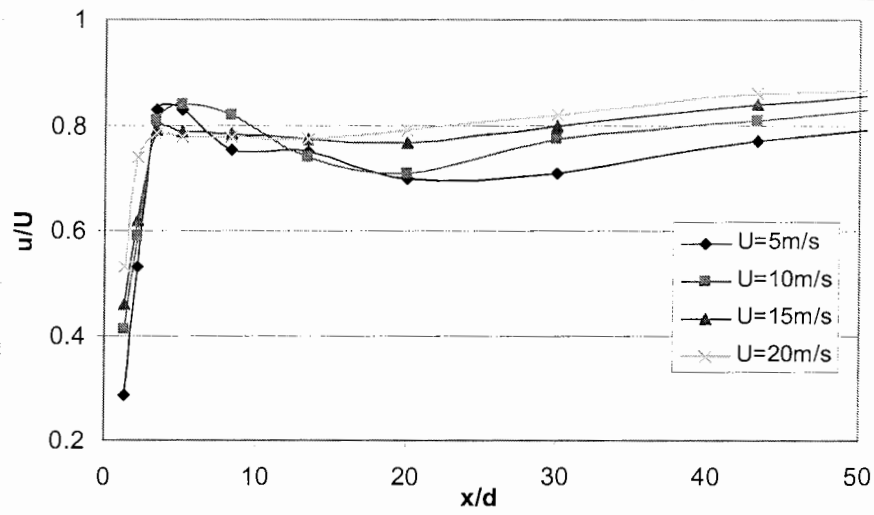
مختلف



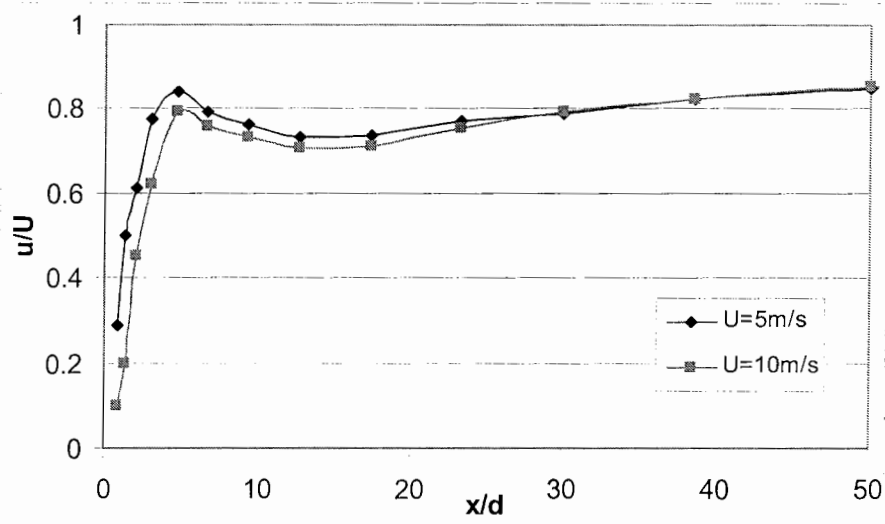
شکل (۳۷) توزیع بیشترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول به قطر $D=1.5\text{mm}$ در سرعت‌های مختلف



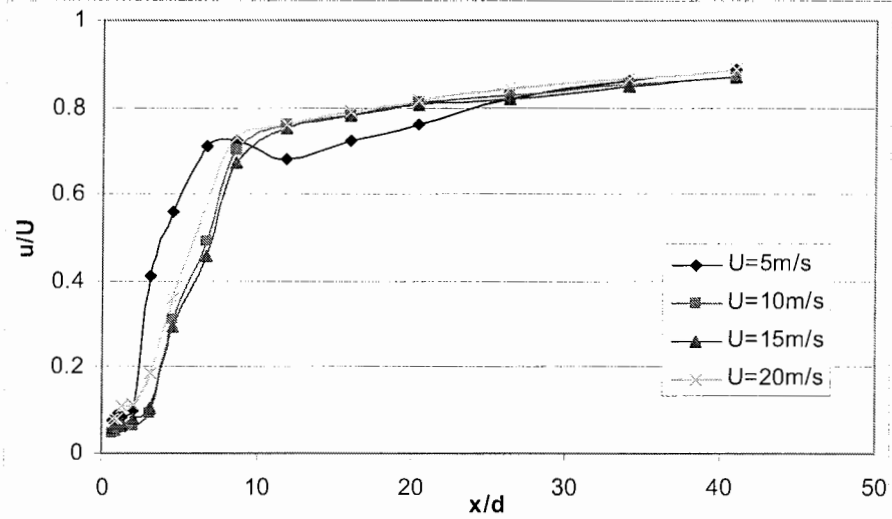
شکل (۳۸) توزیع بیشترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول به قطر $D=2.2\text{mm}$ در سرعت‌های مختلف



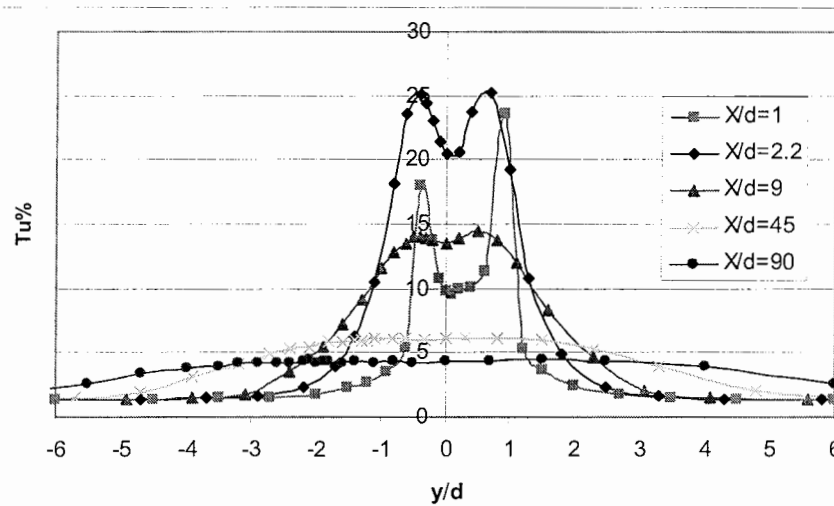
شکل (۳۹) توزیع کمترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول به قطر $D=0.6\text{mm}$ در سرعت‌های مختلف



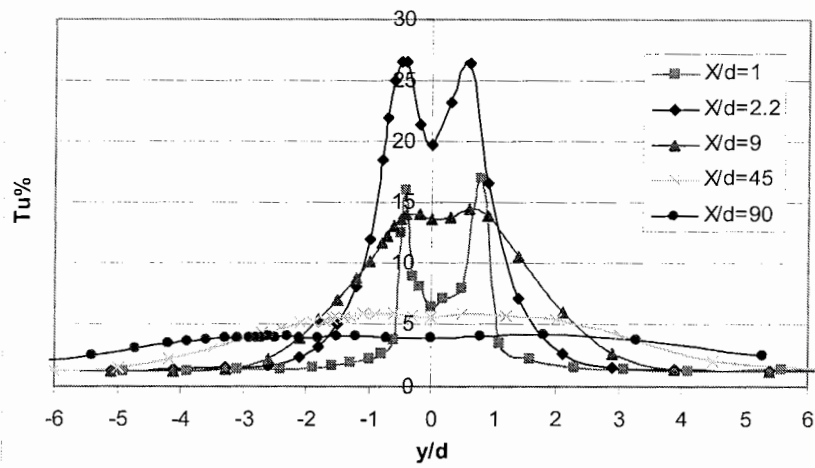
شکل (۴۰) توزیع کمترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول به قطر $D=1.5\text{mm}$ در سرعت‌های مختلف



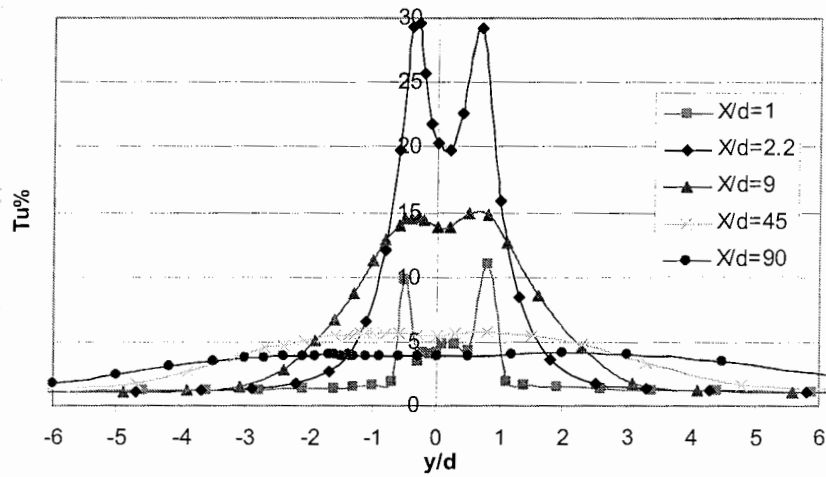
شکل (۴۱) توزیع کمترین سرعت در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول به قطر $D=2.2\text{mm}$ در سرعت‌های مختلف



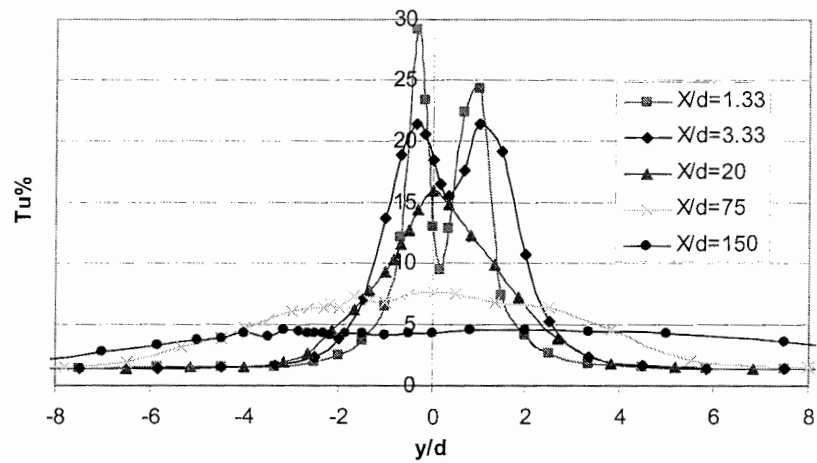
شکل (۴۲) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=1\text{mm}$ در سرعت $U=10\text{m/s}$



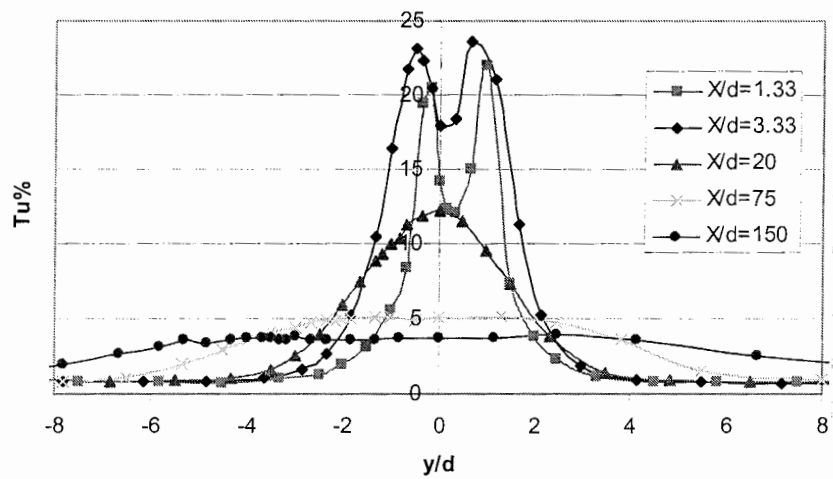
شکل (۴۳) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=1\text{mm}$ در سرعت $U=15\text{m/s}$



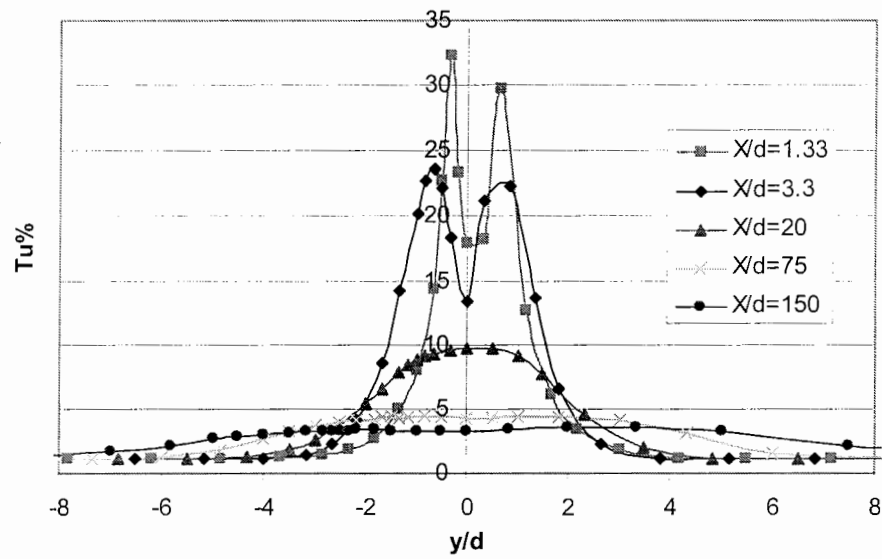
شکل (۴۴) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=1\text{mm}$ در سرعت $U=20\text{m/s}$



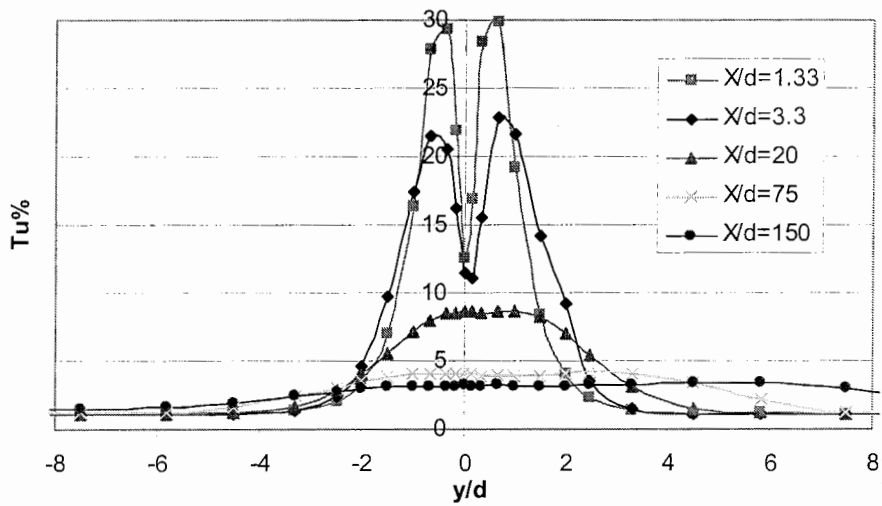
شکل (۴۵) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=0.6\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$



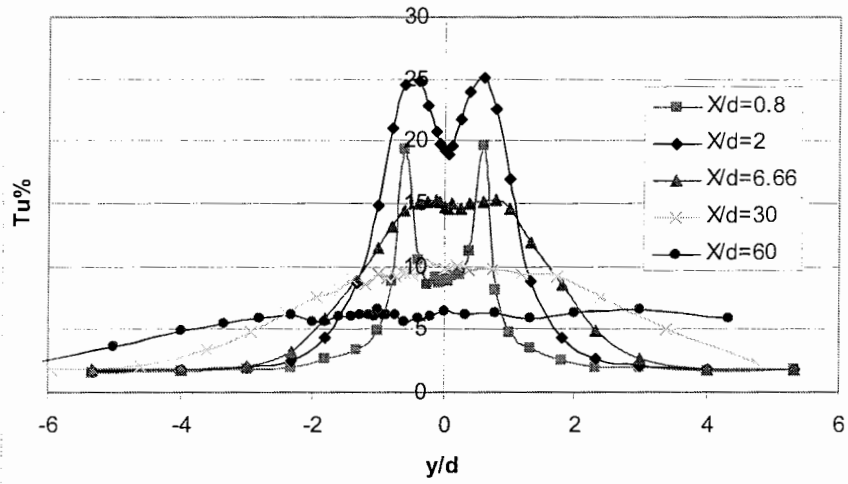
شکل (۴۶) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=0.6\text{mm}$ در سرعت $U=10\text{m/s}$



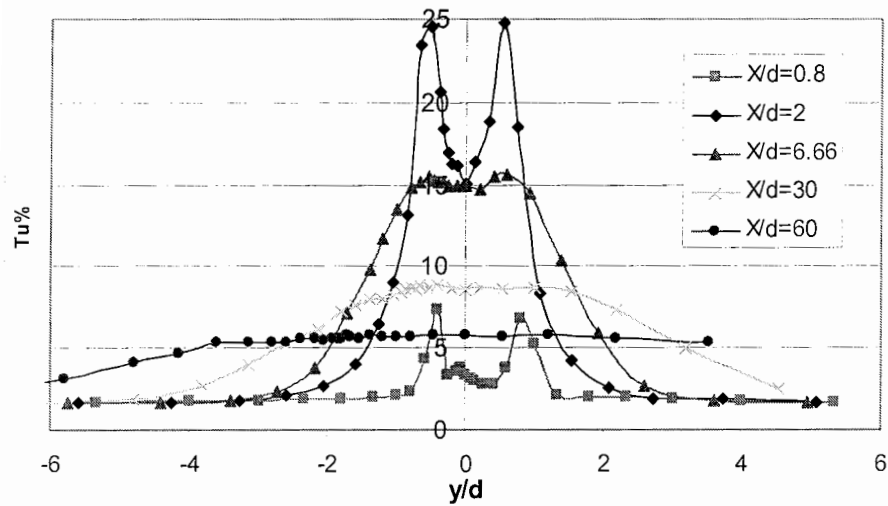
شکل (۴۷) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=0.6\text{mm}$ در سرعت $U=15\text{m/s}$



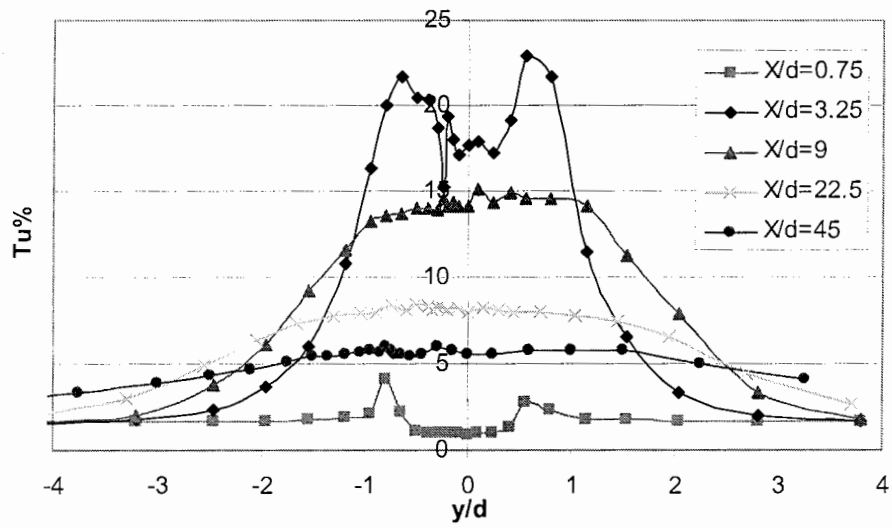
شکل (۴۸) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=0.6\text{mm}$ در سرعت $U=20\text{m/s}$



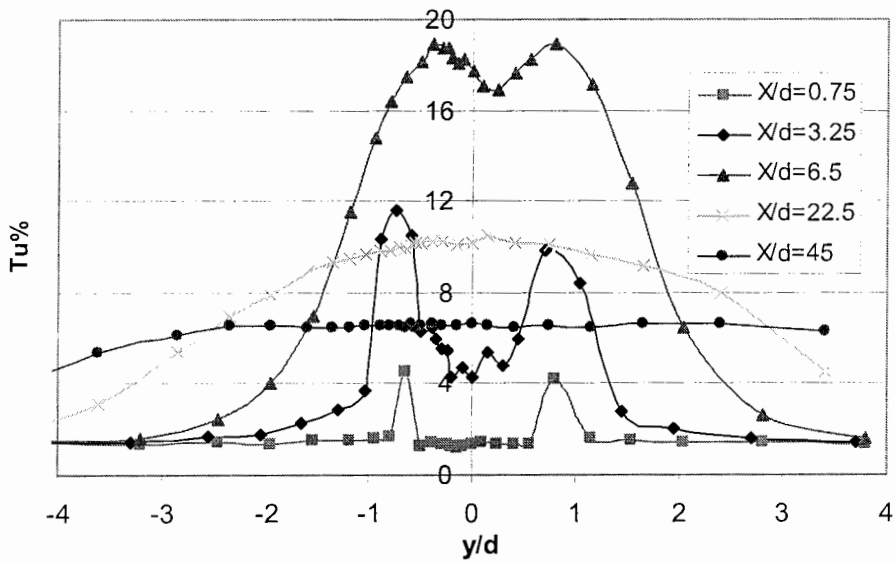
شکل (۴۹) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=1.5\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$



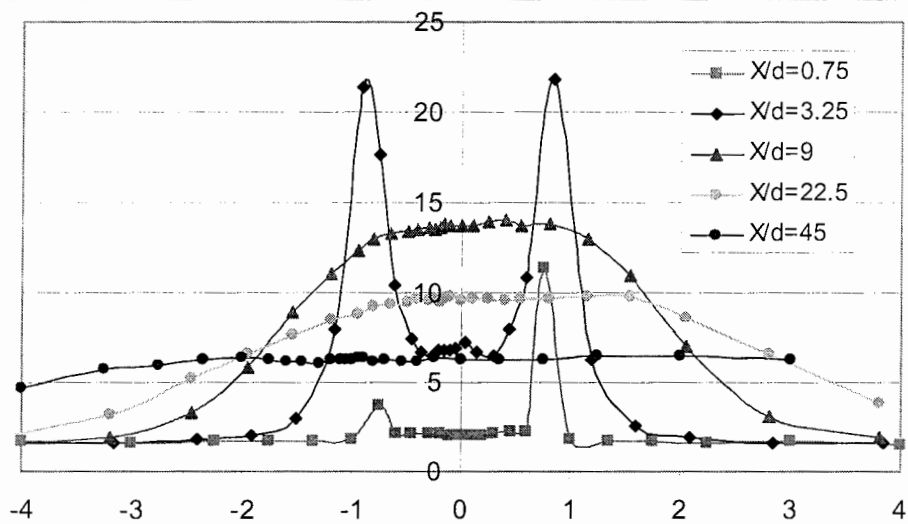
شکل (۵۰) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=1.5\text{mm}$ در سرعت $U=10\text{m/s}$



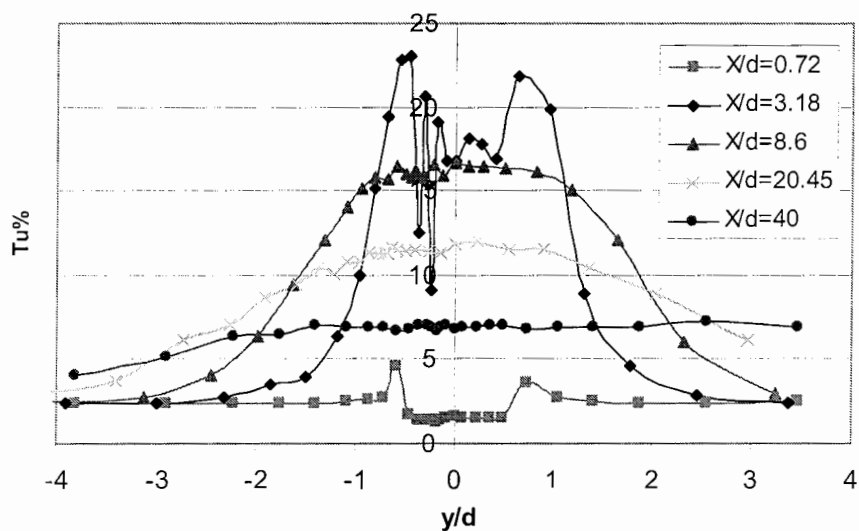
شکل (۵۱) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=2\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$



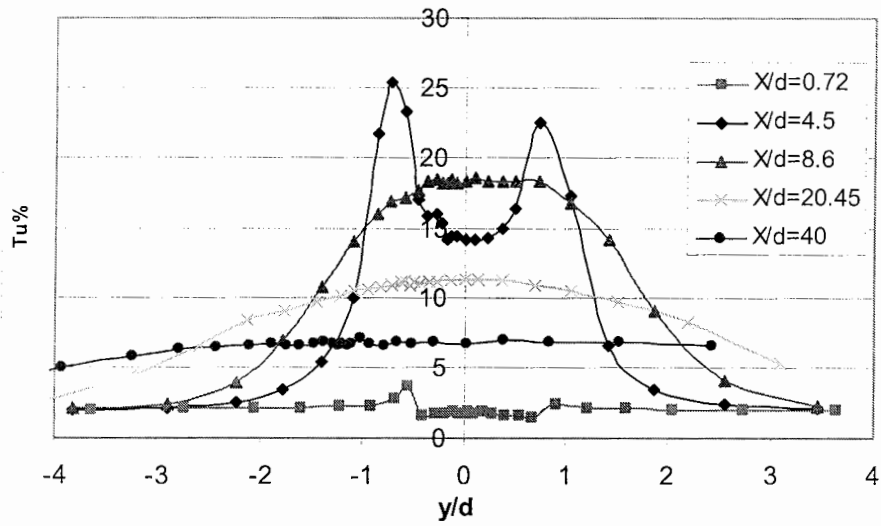
شکل (۵۲) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=2\text{mm}$ در سرعت $U=10\text{m/s}$



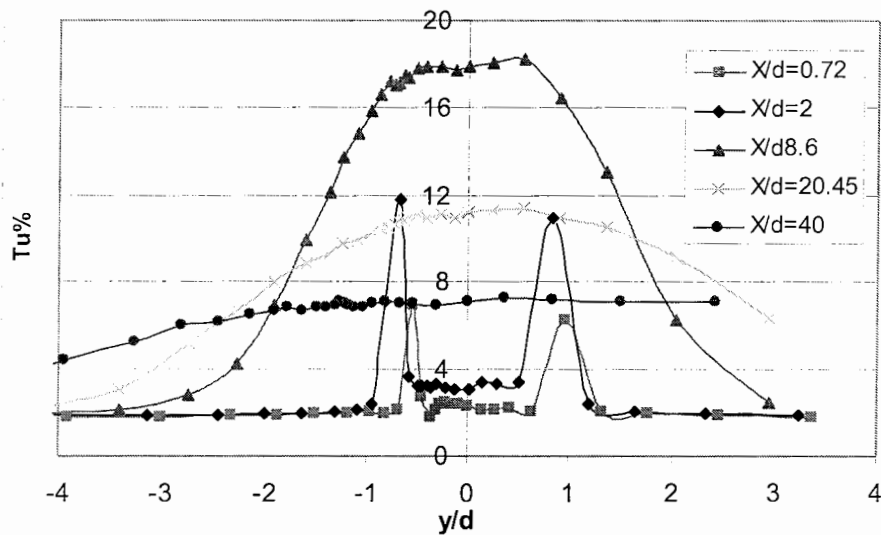
شکل (۵۳) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=2\text{mm}$ در سرعت $U=20\text{m/s}$



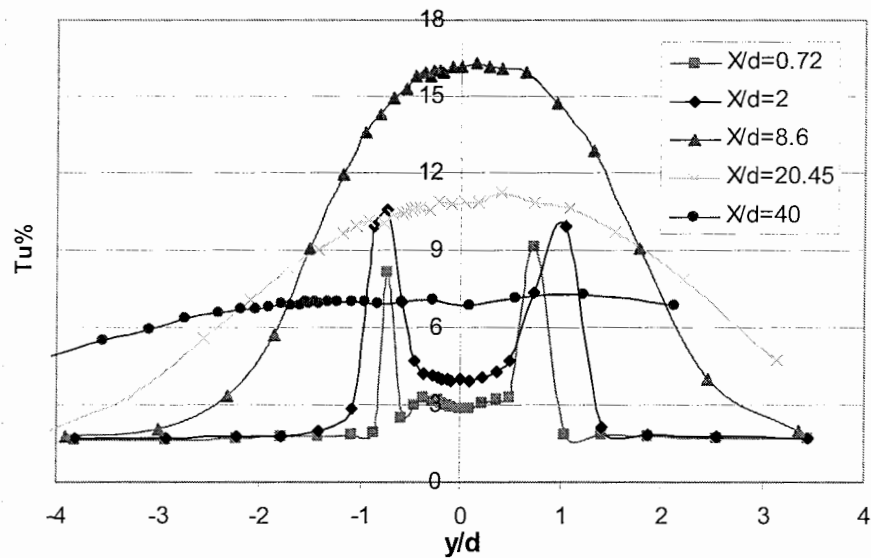
شکل (۵۴) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=2.2\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$



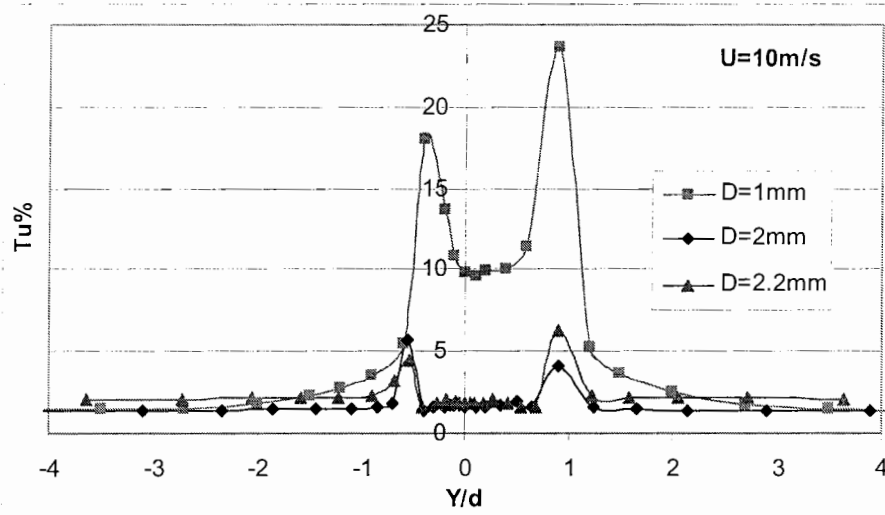
شکل (۵۵) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=2.2\text{mm}$ در سرعت $U=10\text{m/s}$



شکل (۵۶) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=2.2\text{mm}$ در سرعت $U=15\text{m/s}$

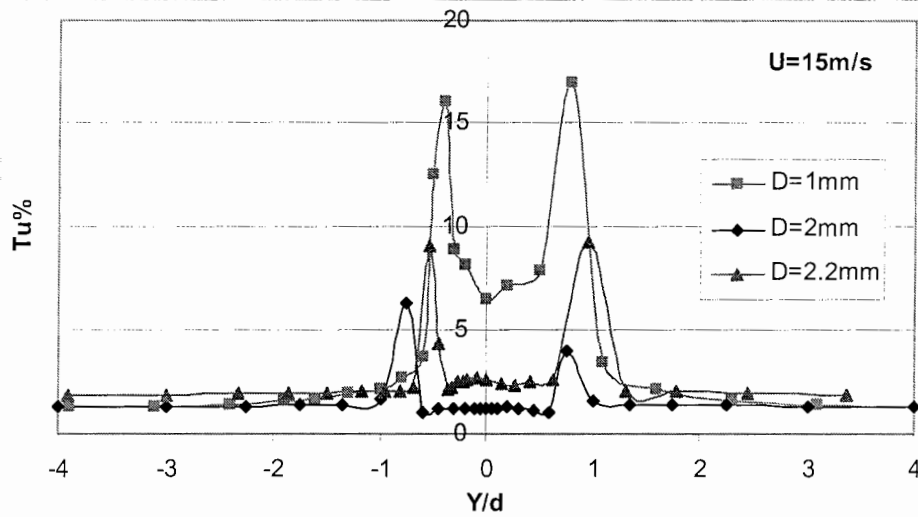


شکل (۵۷) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست مفتول به قطر $D=2.2\text{mm}$ در سرعت $U=20\text{m/s}$



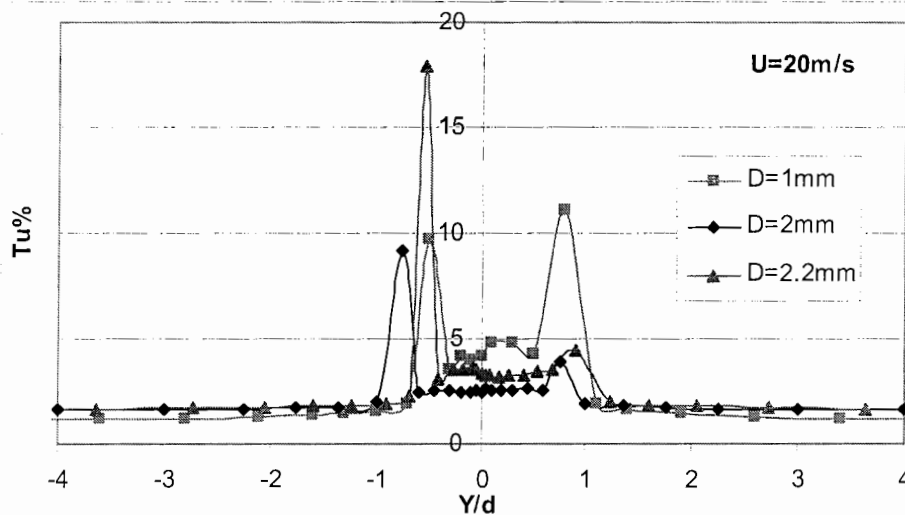
شکل (۵۸) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D در فاصله $X/D=1$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در

سرعت $U=10\text{m/s}$



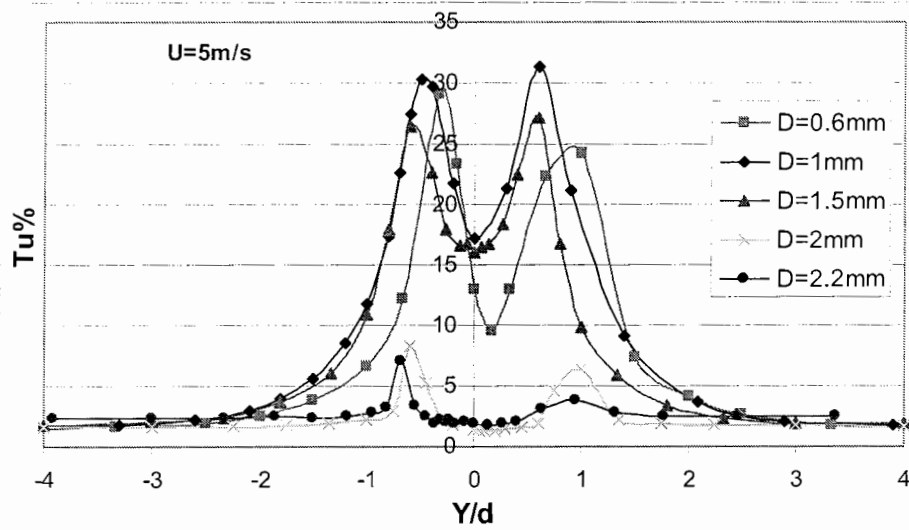
شکل (۵۹) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/d در فاصله $X/D=1$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در

سرعت $U=15\text{m/s}$



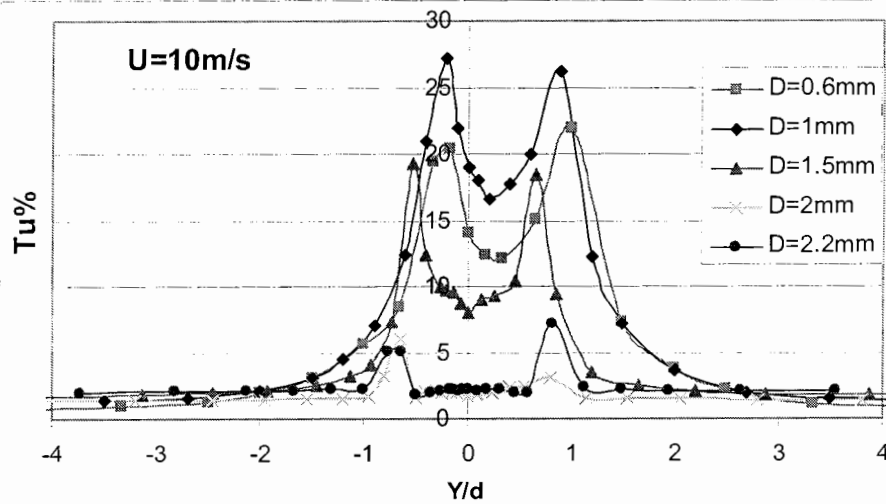
شکل (۶۰) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/d در فاصله $X/D=1$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده

در سرعت $U=20\text{m/s}$



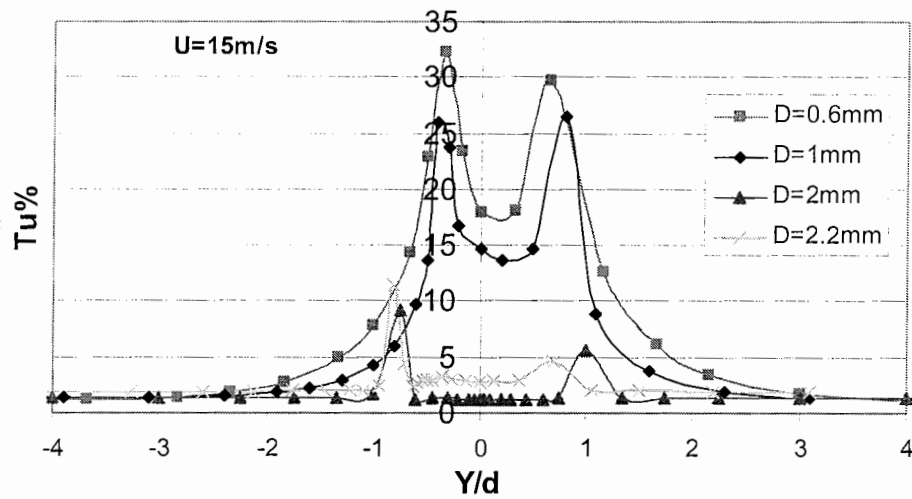
شکل (۶۱) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 1.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در

سرعت $U=5\text{m/s}$

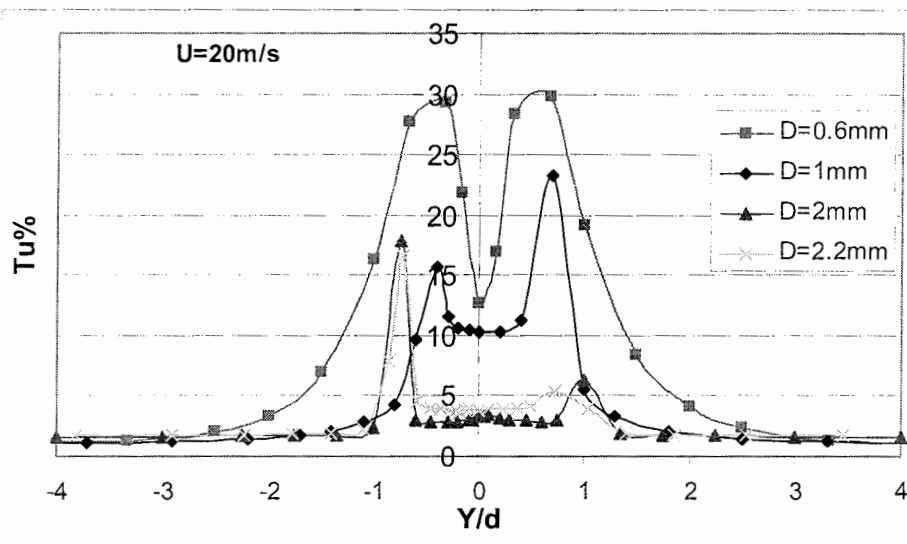


شکل (۶۲) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 1.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در سرعت

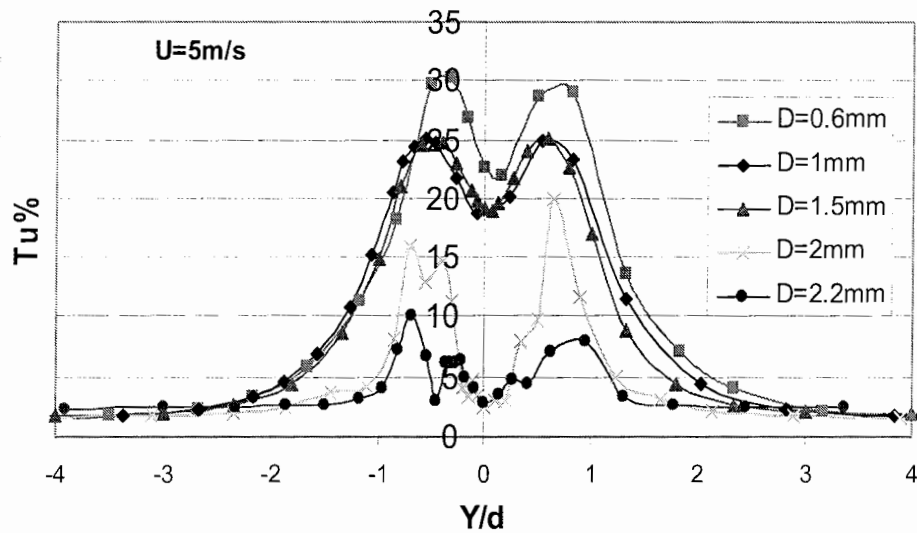
$U=10\text{m/s}$



شکل (۶۳) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 1.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=15\text{m/s}$

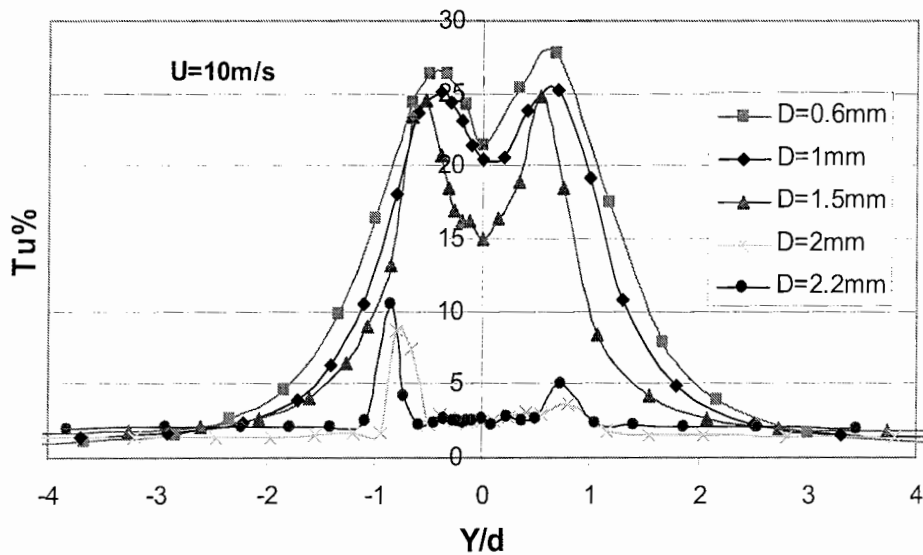


شکل (۶۴) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 1.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=20\text{m/s}$



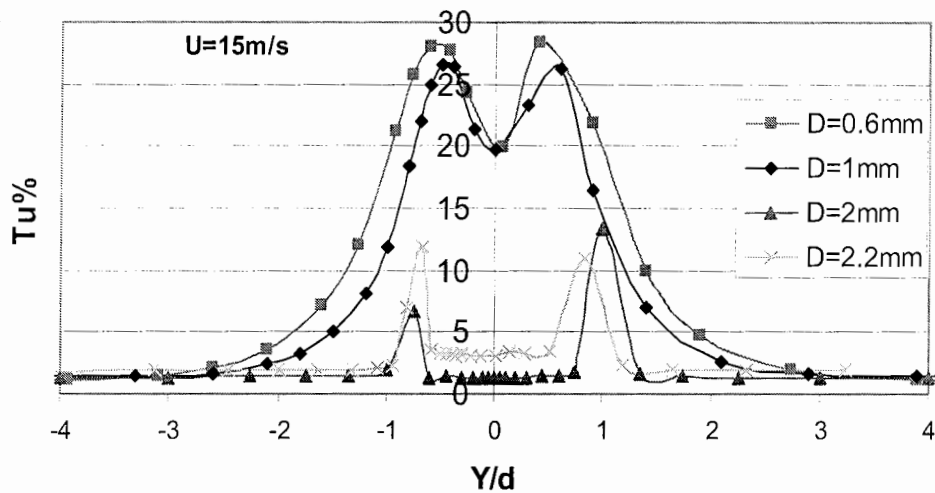
شکل (۶۵) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 2$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده

در سرعت $U=5\text{m/s}$



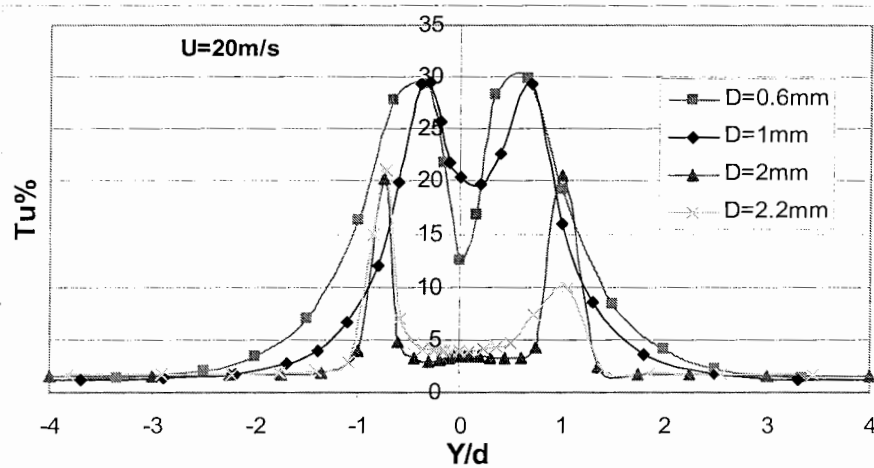
شکل (۶۶) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 2$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده

در سرعت $U=10\text{m/s}$



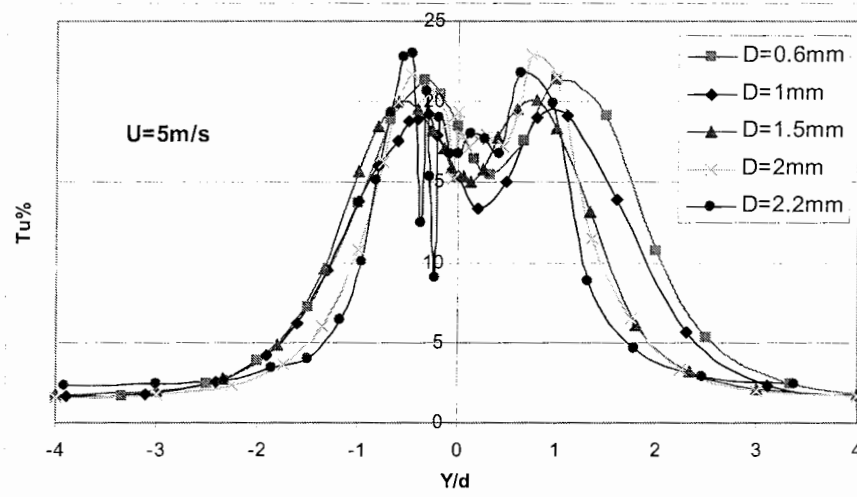
شکل (۶۷) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 2$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده

در سرعت $U=15\text{m/s}$



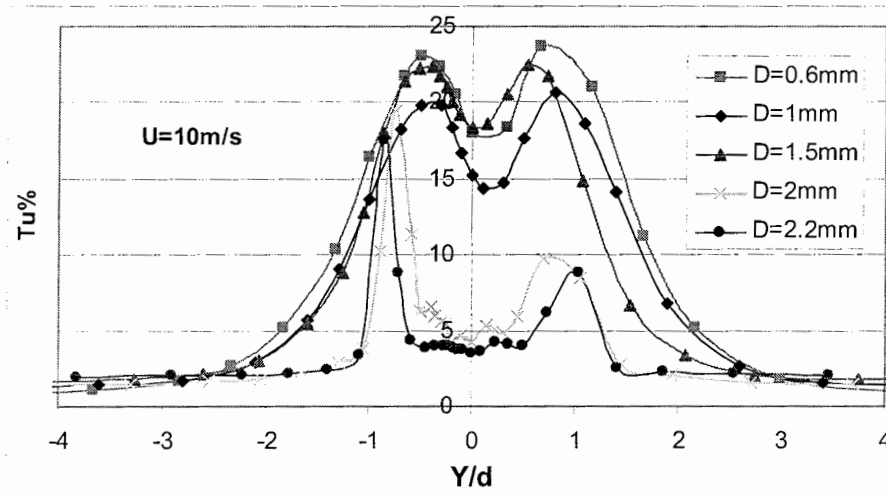
شکل (۶۸) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 2$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده

در سرعت $U=20\text{m/s}$



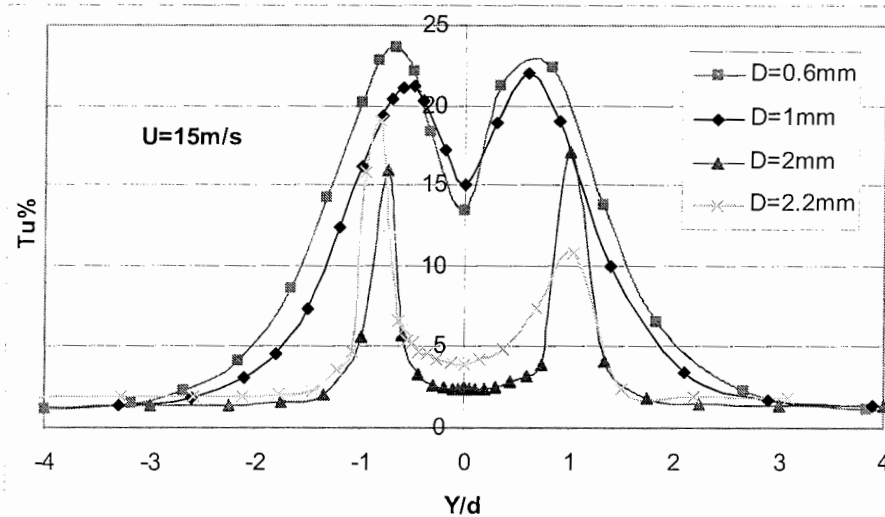
شکل (۶۹) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 3.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر شده در سرعت

$U=5\text{m/s}$



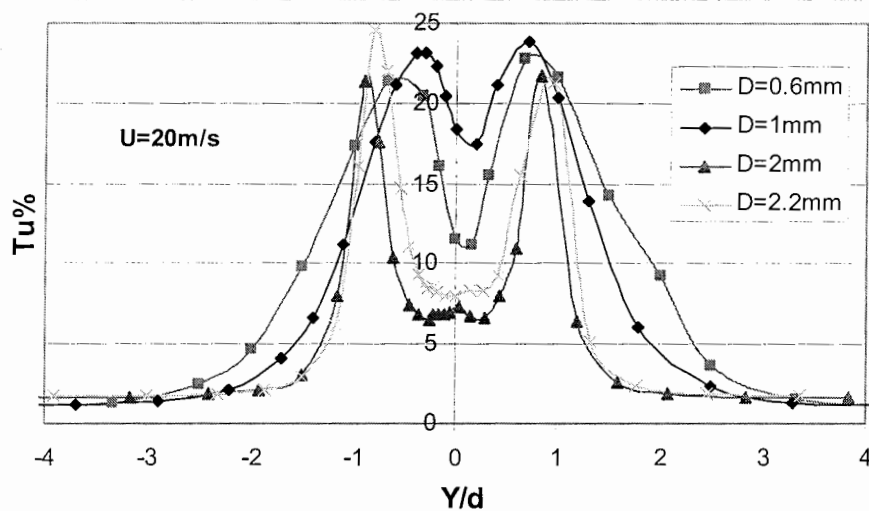
شکل (۷۰) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 3.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر

شده در سرعت $U=10\text{m/s}$



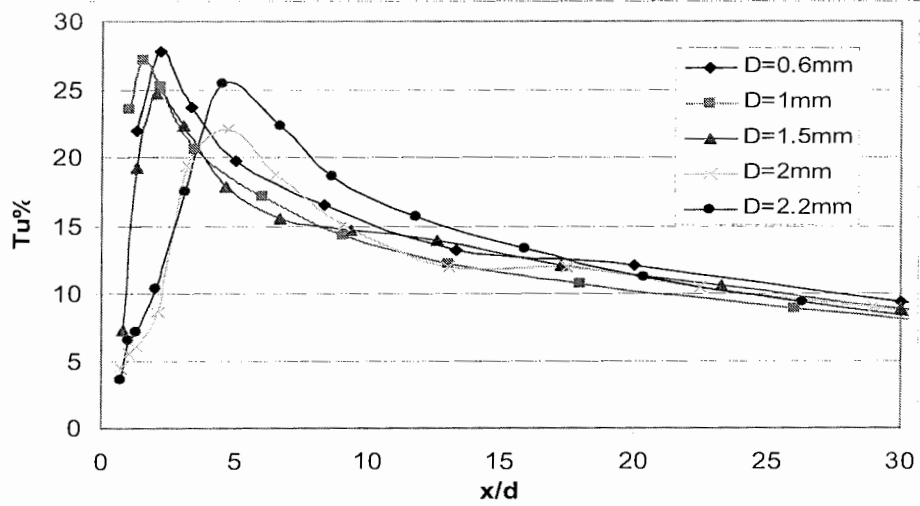
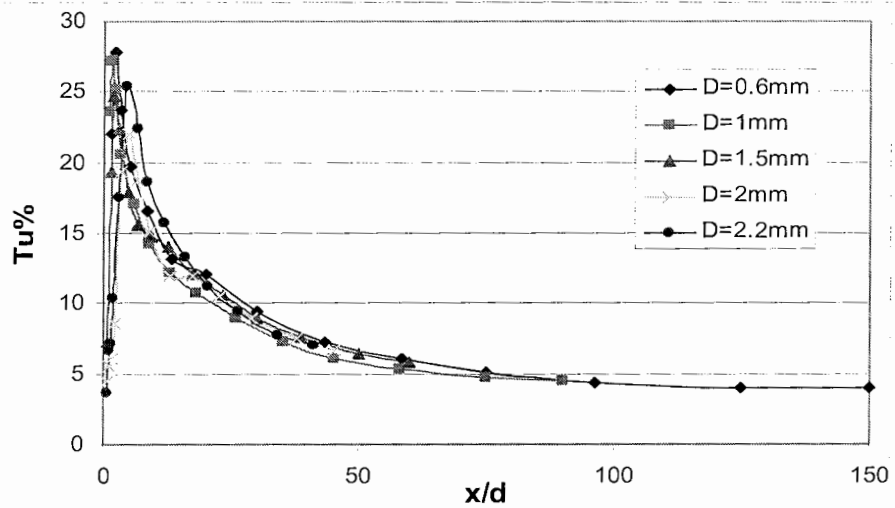
شکل (۷۱) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 3.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر

شده در سرعت $U=15\text{m/s}$



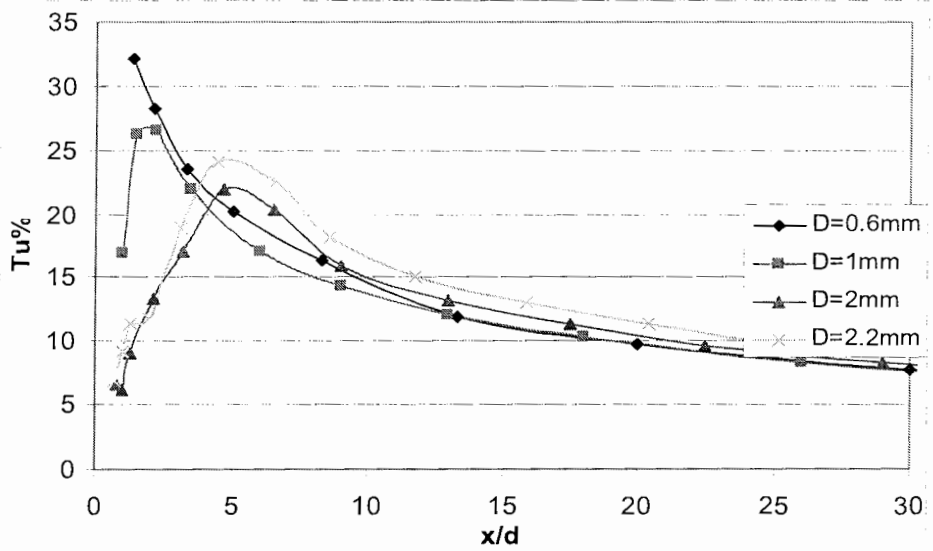
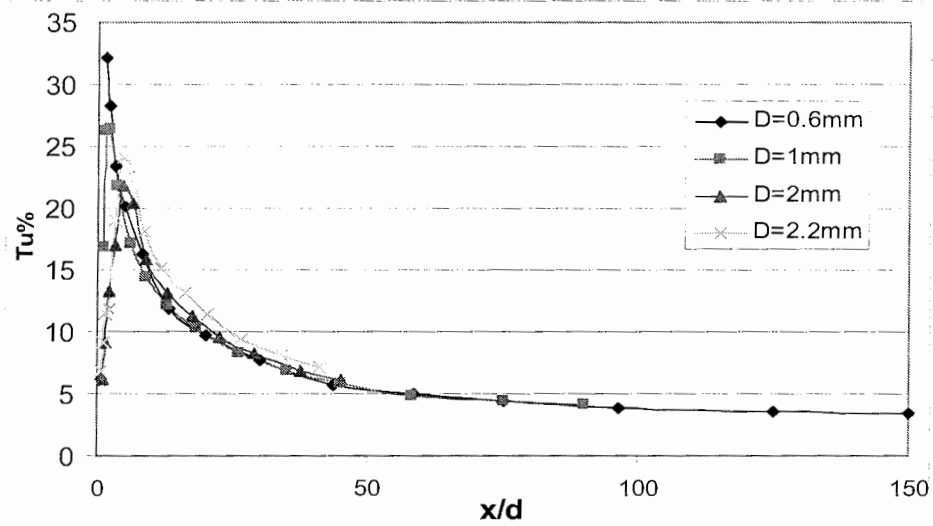
شکل (۷۲) توزیع شدت اغتشاشها بر حسب Y/D در فاصله $X/D = 3.3$ پایین دست مفتول‌هایی با قطرهای ذکر

شده در سرعت $U=20\text{m/s}$



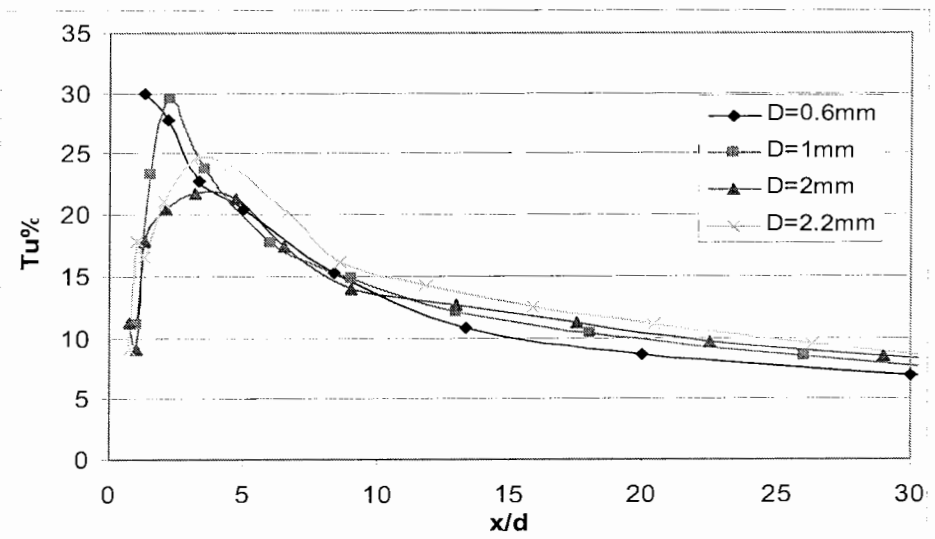
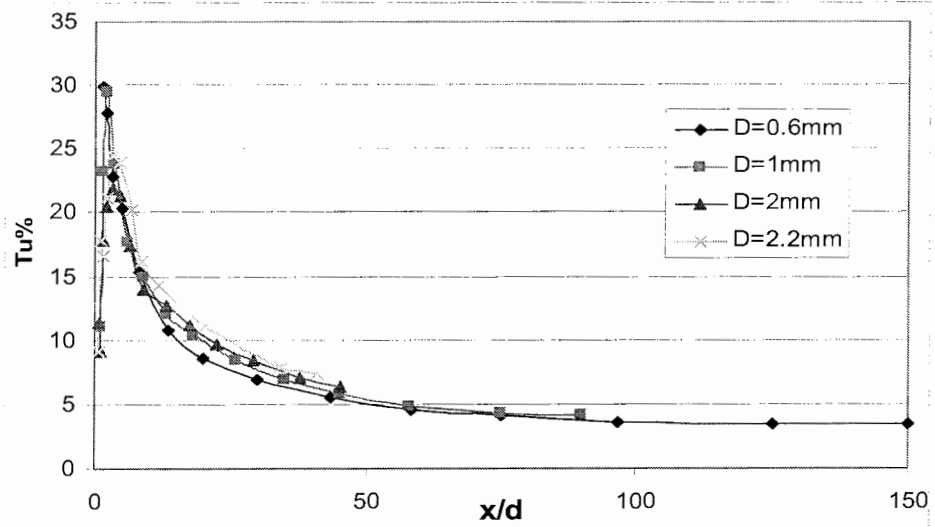
شکل (۷۳) توزیع بیشترین شدت اغتشاشها در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول با قطرهای ذکر شده در سرعت

$$U=10\text{m/s}$$

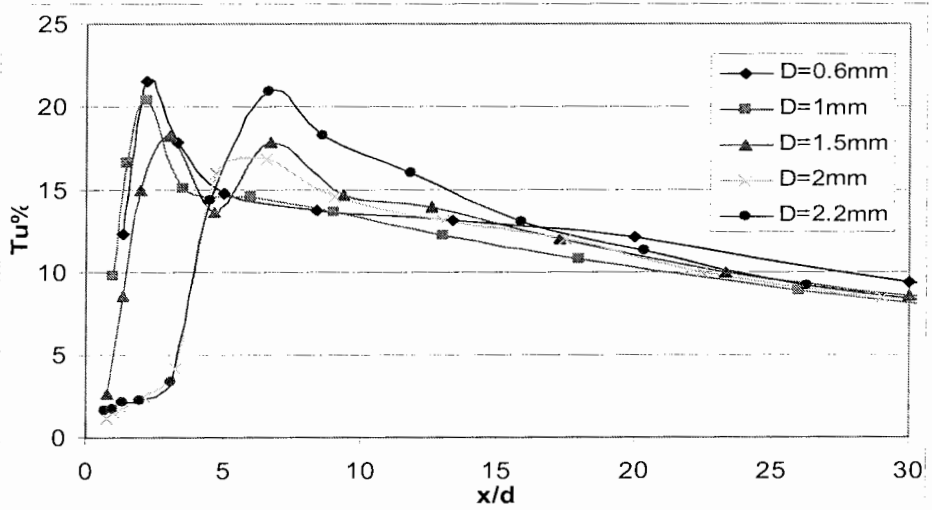
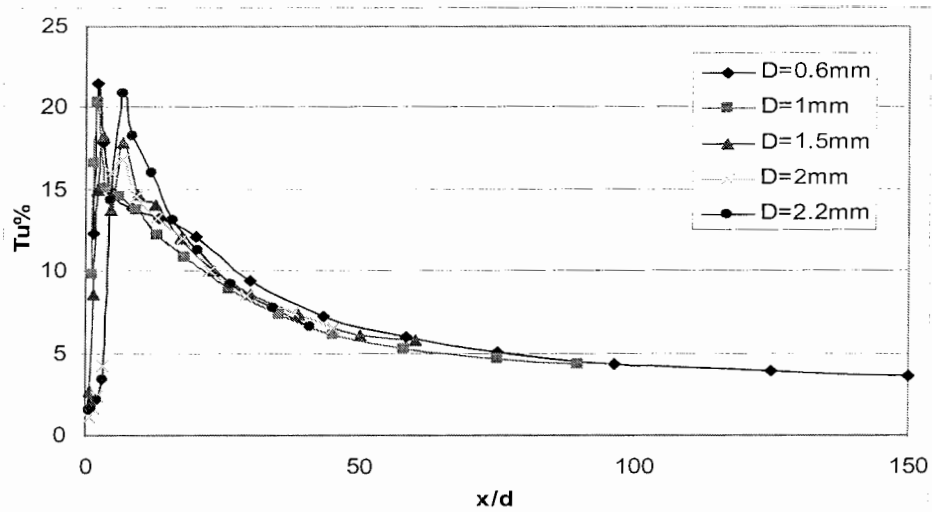


شکل (۷۴) توزیع بیشترین شدت اغتشاشها در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول با قطرهای ذکر شده در سرعت

$U=15\text{m/s}$

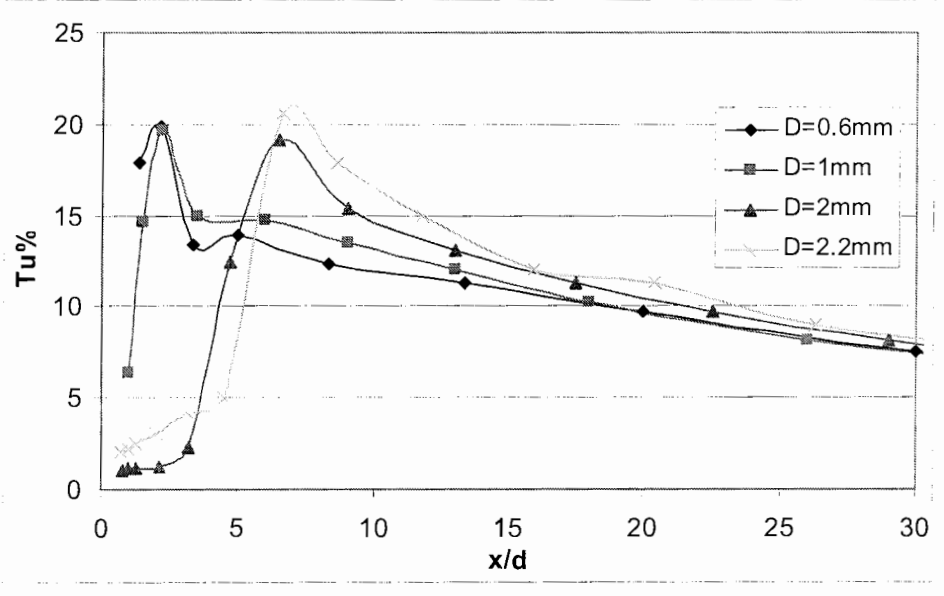
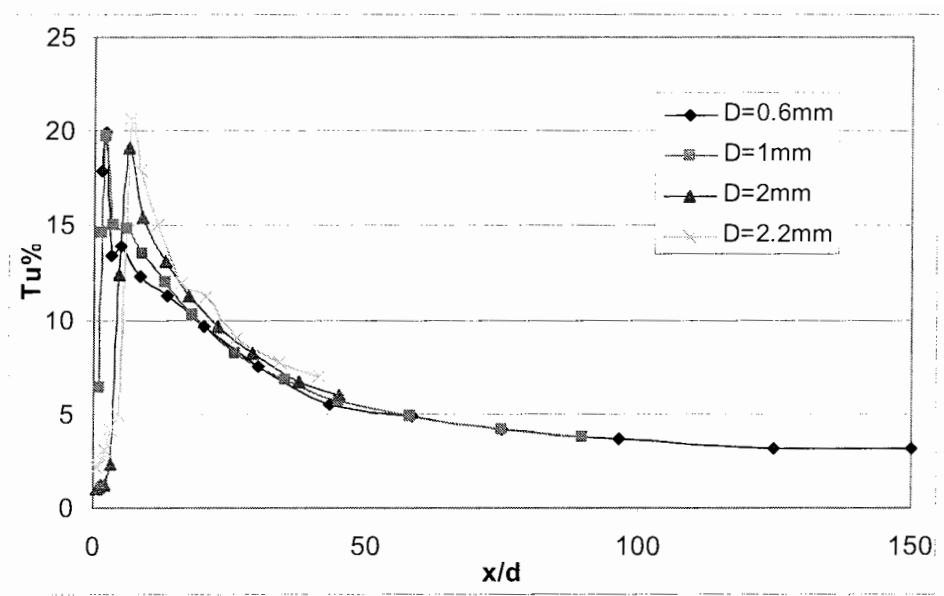


شکل (۷۵) توزیع بیشترین شدت اغتشاشها در ناحیه دنباله بر حسب طول پایین دست مفتول با قطرهای ذکر شده در سرعت $U=20\text{m/s}$

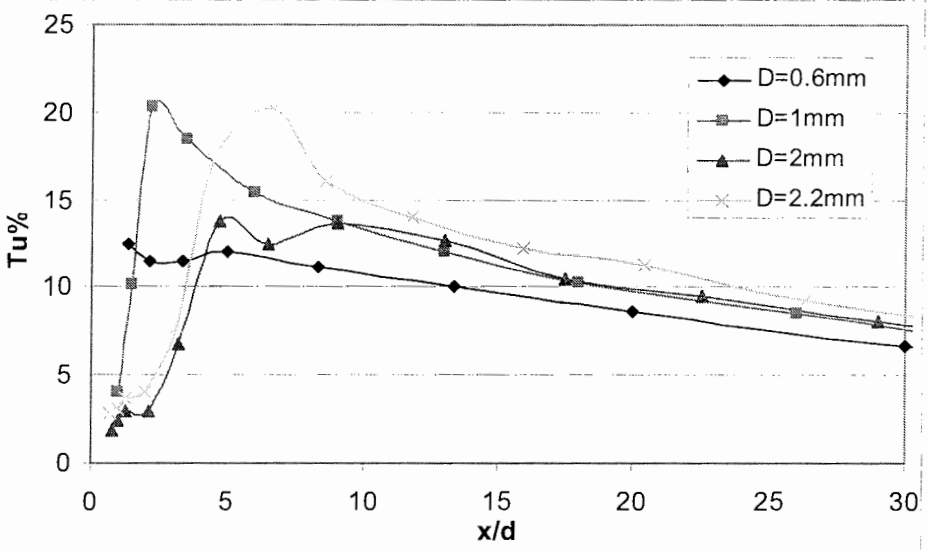
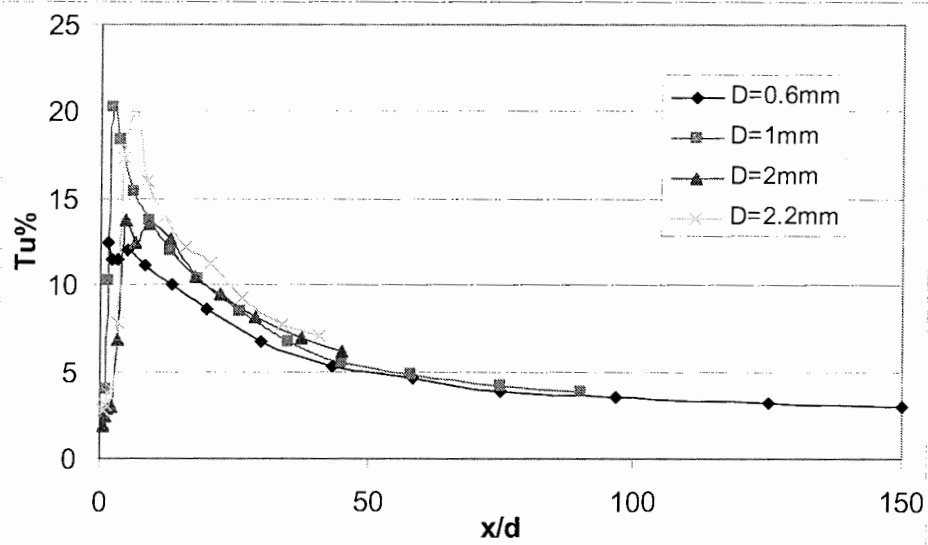


شکل (۷۶) تغییرات شدت اغتشاشهای پایین دست مفتول در نقطه $Y/D=0$ وسط مفتول بر حسب X/D برای سرعت

$U=10\text{ m/s}$ را در قطرهای مختلف

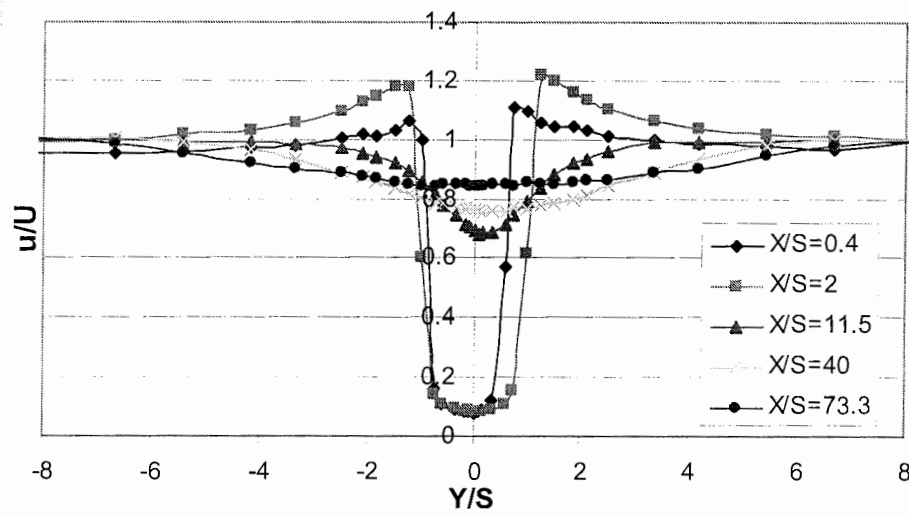


شکل (۷۷) تغییرات شدت اغتشاشهای پایین دست مفتول در نقطه $Y/D=0$ وسط مفتول بر حسب X/D برای سرعت $U=15\text{ m/s}$ را در قطرهای مختلف

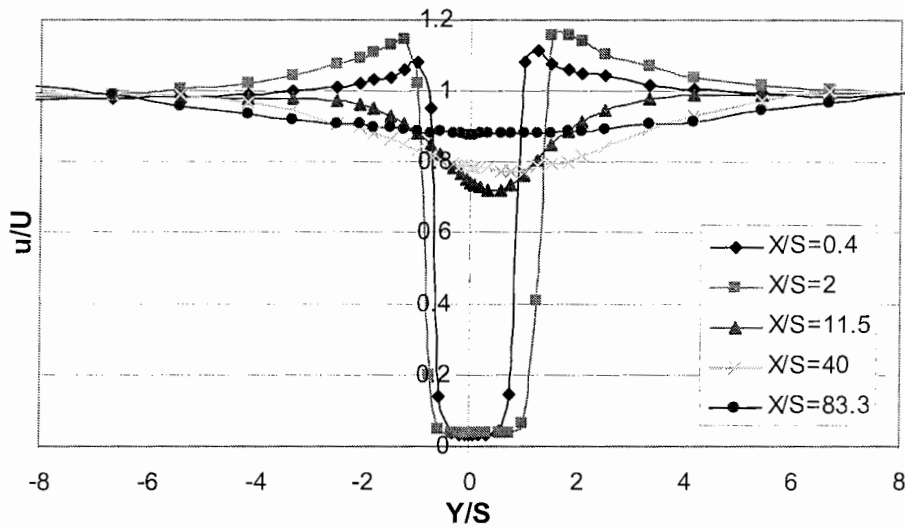


شکل (۷۸) تغییرات شدت اغتشاشهای پایین دست مفتول در نقطه $Y/D=0$ وسط مفتول بر حسب X/D برای سرعت

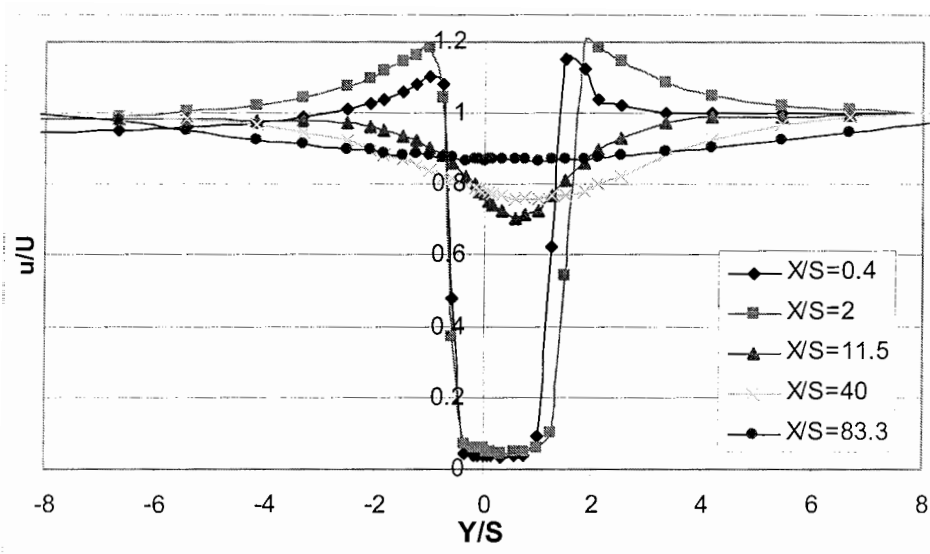
$U=20\text{ m/s}$ را در قطرهای مختلف



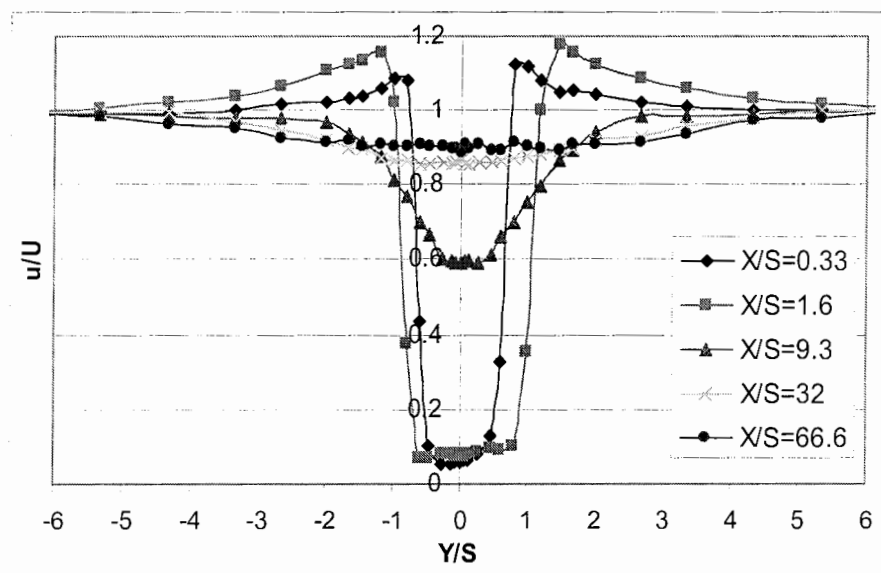
شکل (۷۹) توزیع سرعت پایین دست صفحه به پهنای $S=1/2 \text{ mm}$ در سرعت $U=1.0 \text{ m/s}$



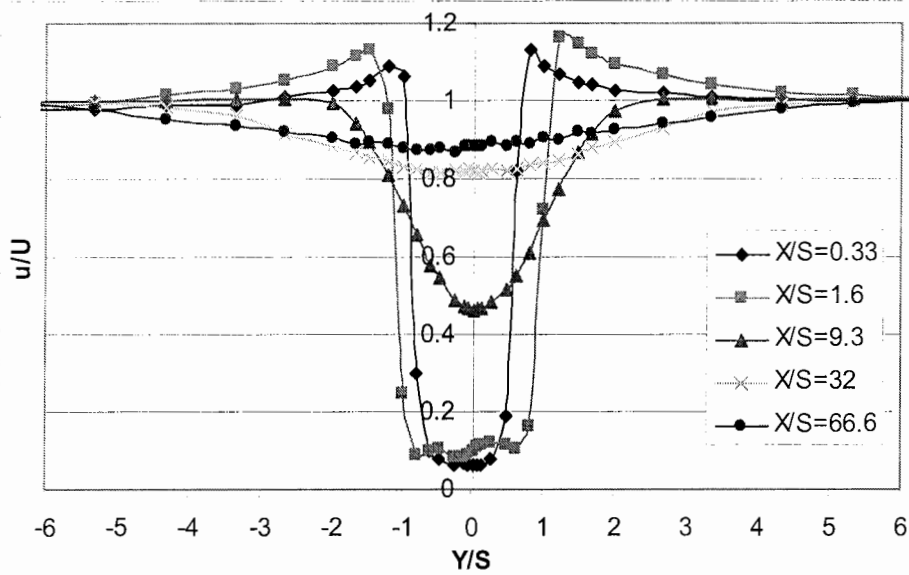
شکل (۸۰) توزیع سرعت پایین دست صفحه به پهنای $S=1/2 \text{ mm}$ در سرعت $U=1.5 \text{ m/s}$



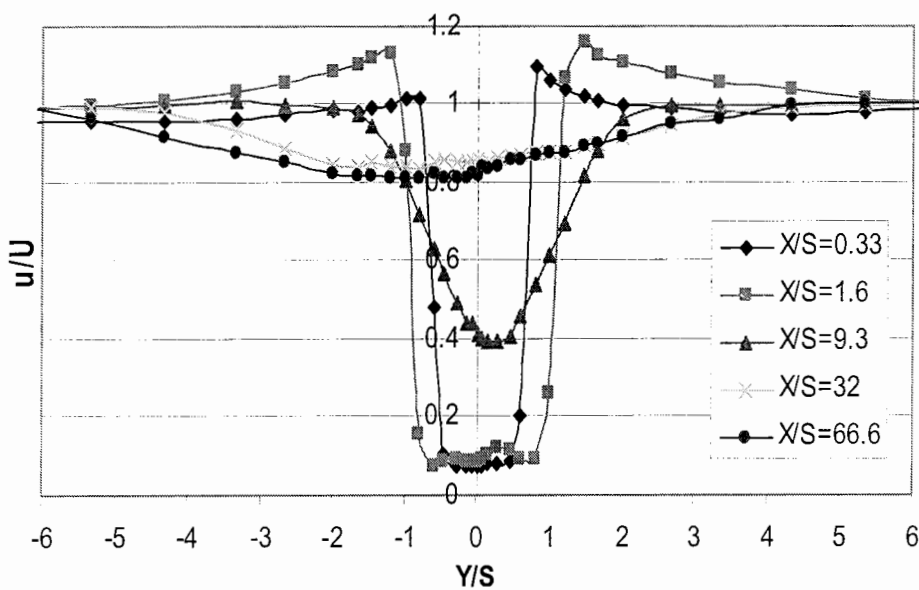
شکل (۸۱) توزیع سرعت پایین دست صفحه به پهنای $S = 1/2 \text{ mm}$ در سرعت $U = 2.0 \text{ m/s}$



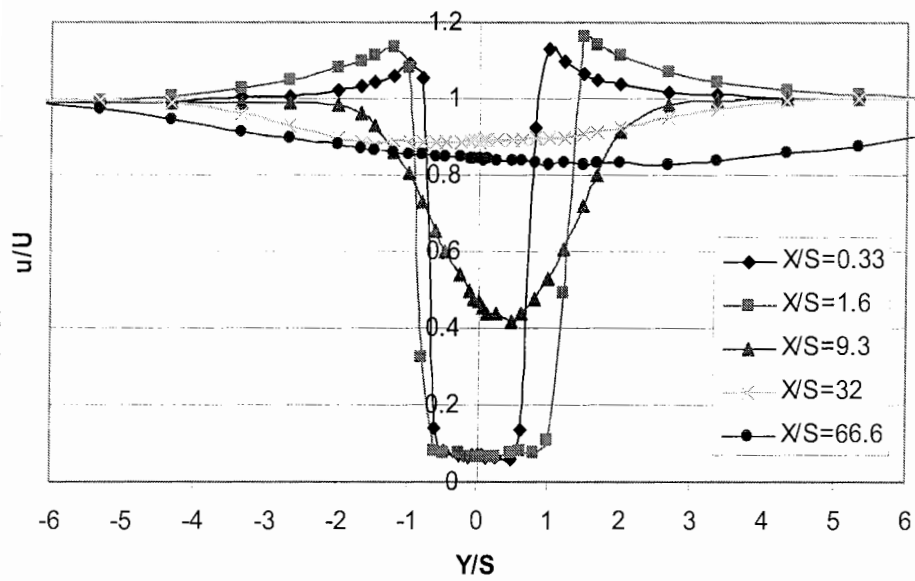
شکل (۸۲) توزیع سرعت پایین دست صفحه به پهنای $S = 1/5 \text{ mm}$ در سرعت $U = 5 \text{ m/s}$



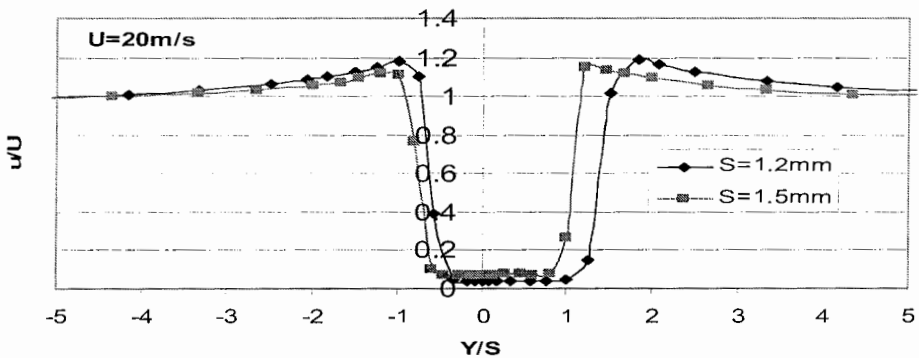
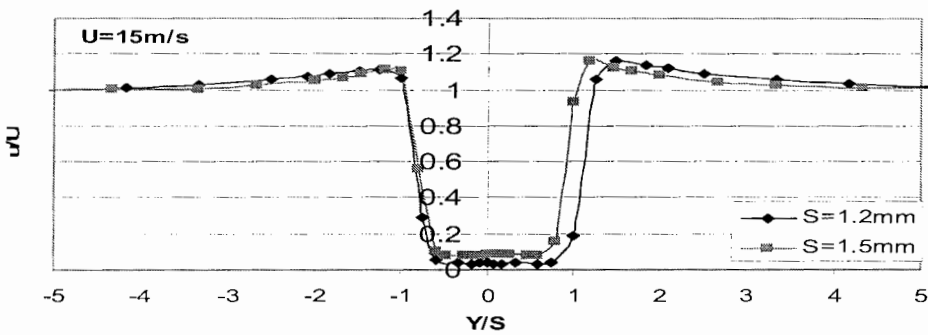
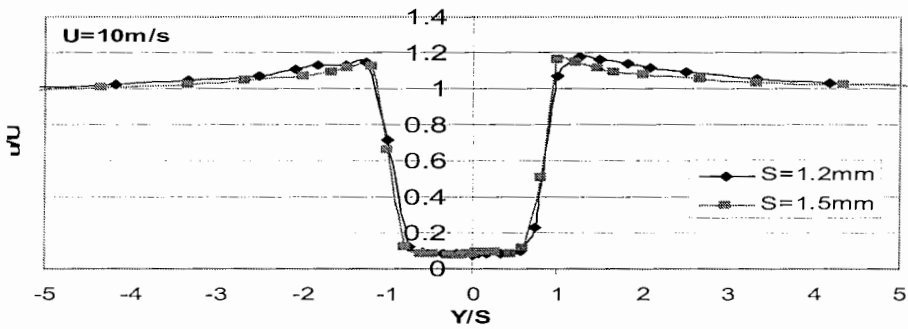
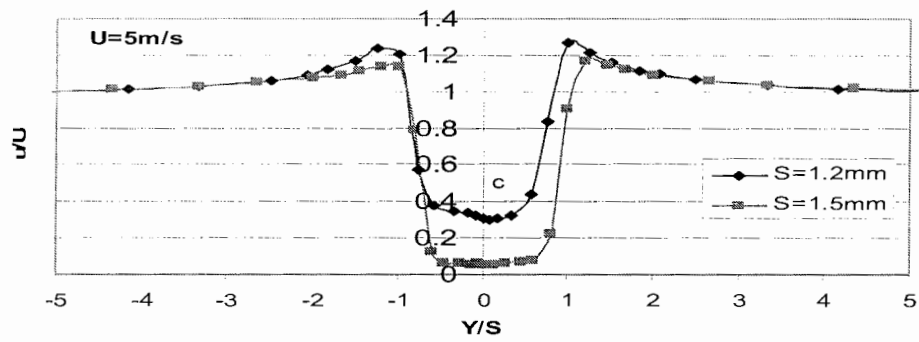
شکل (۸۳) توزیع سرعت پایین دست صفحه به پهنای $S = 1/5 \text{ mm}$ در سرعت $U = 1.0 \text{ m/s}$



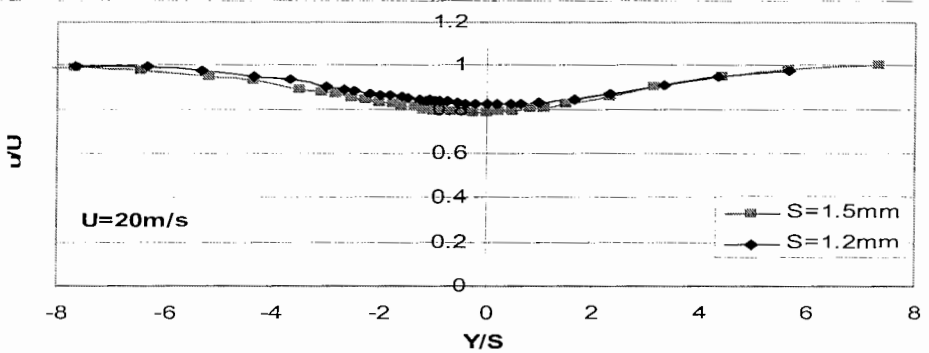
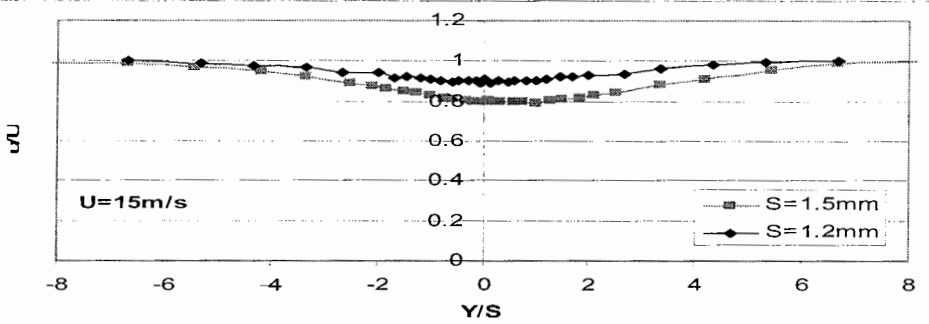
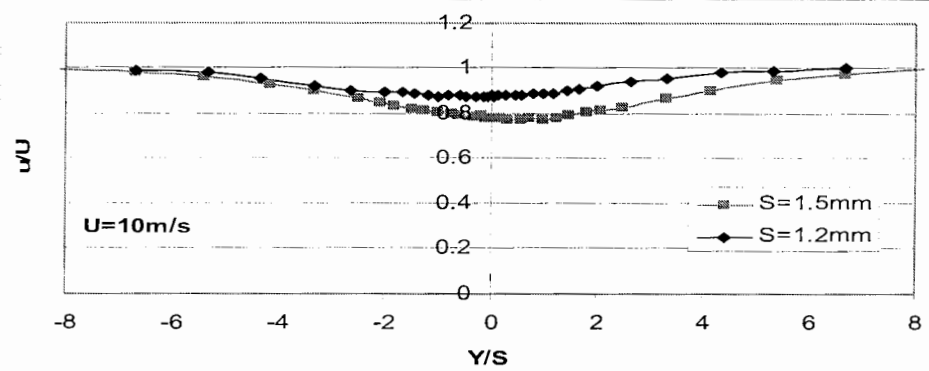
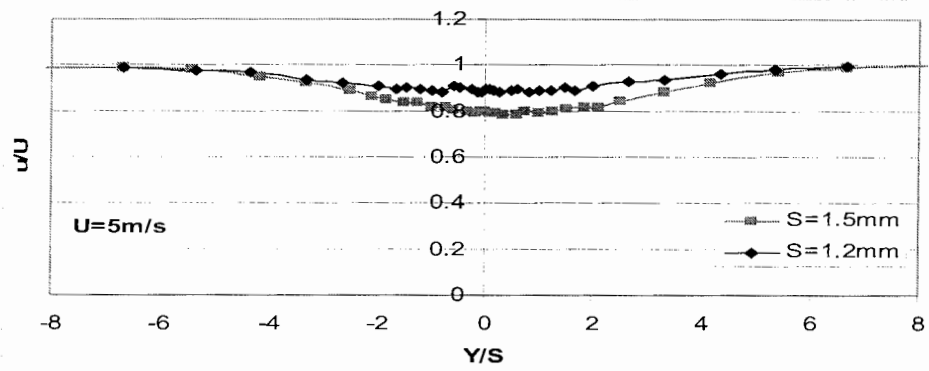
شکل (۸۴) توزیع سرعت پایین دست صفحه به پهنای $S = 1/5 \text{ mm}$ در سرعت $U = 15 \text{ m/s}$



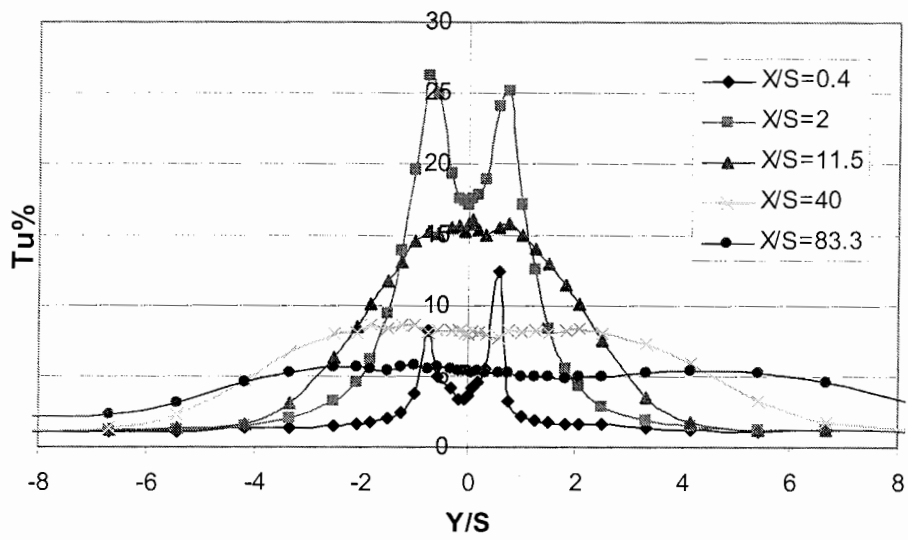
شکل (۸۵) توزیع سرعت پایین دست صفحه به پهنای $S=1/5\text{mm}$ در سرعت $U=2.0\text{m/s}$



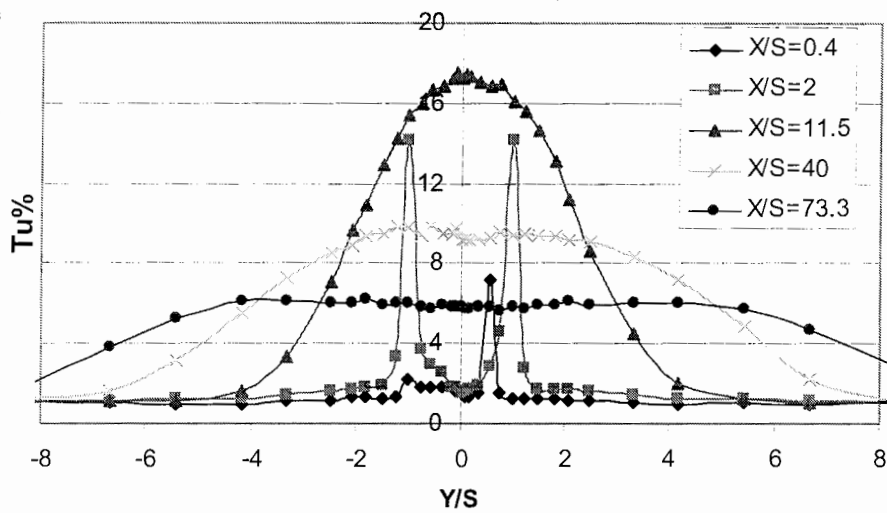
شکل (۸۶) مقایسه توزیع سرعت پایین دست صفحه برای دو صفحه با پهنای $S=1/5\text{mm}$ و $S=1/2\text{mm}$ در فاصله $X/S=1$



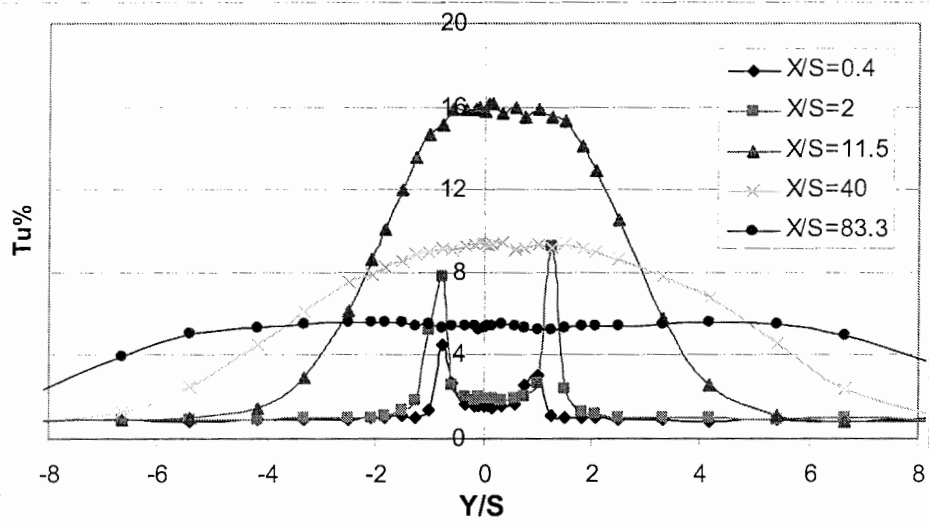
شکل (۸۷) مقایسه توزیع سرعت پایین دست صفحه برای دو صفحه با پهنای $S=1/5\text{mm}$ و $S=1/2\text{mm}$ در فاصله $X/S = 50$



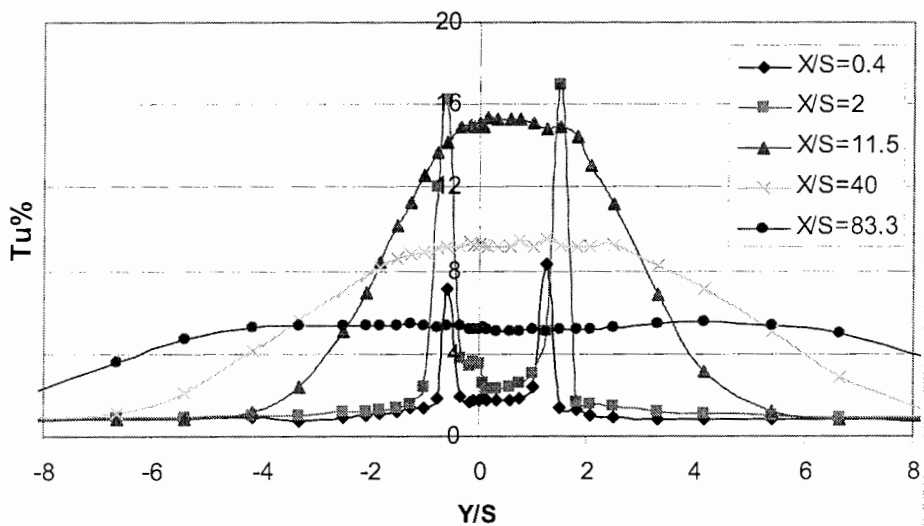
شکل (۸۸) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست صفحه به پهنای $S=1/2\text{mm}$ در سرعت $U=5\text{m/s}$



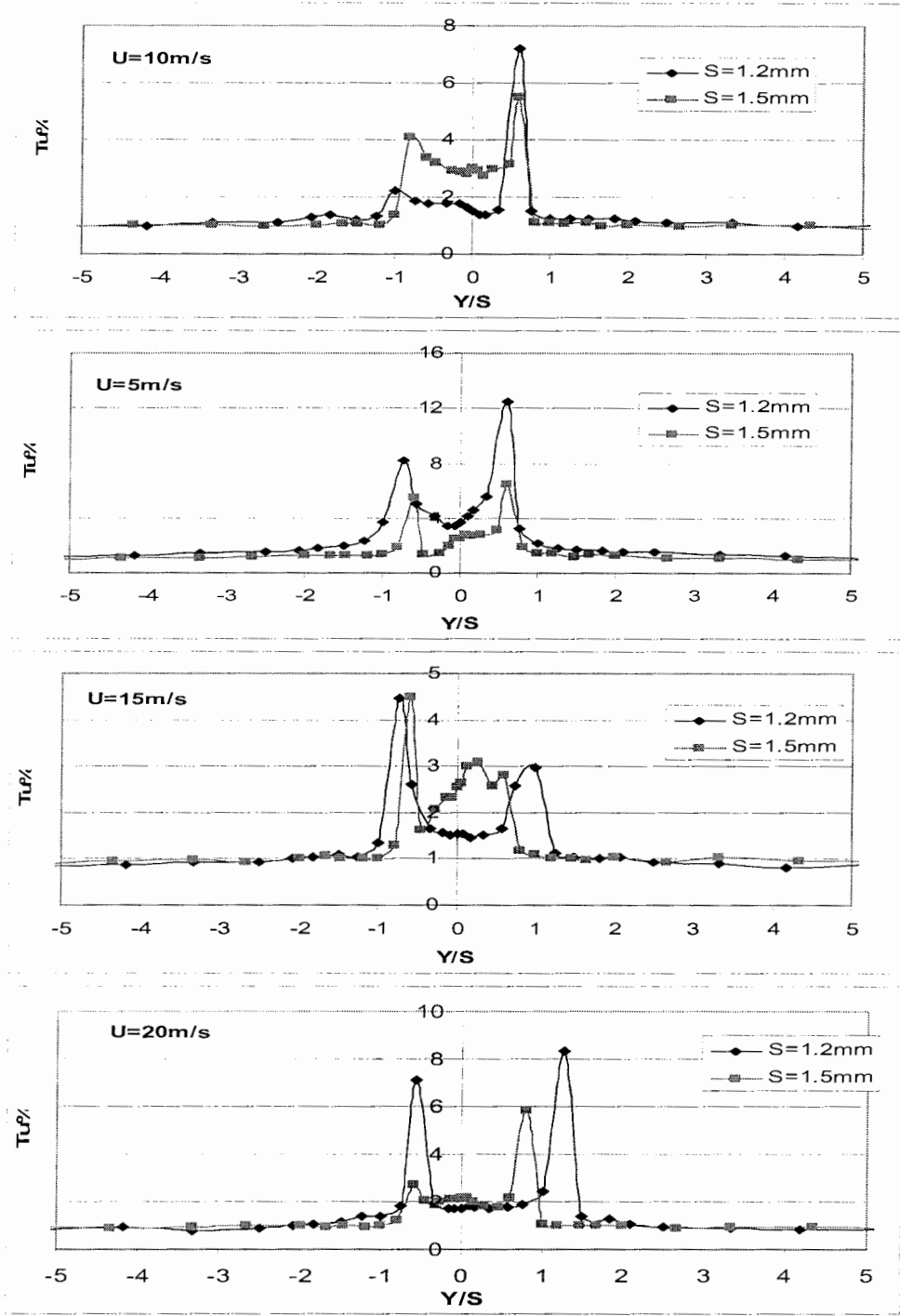
شکل (۸۹) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست صفحه به پهنای $S=1/2\text{mm}$ در سرعت $U=10\text{m/s}$



شکل (۹۰) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست صفحه به پهناي $S=1/2\text{ mm}$ در سرعت $U=15\text{ m/s}$

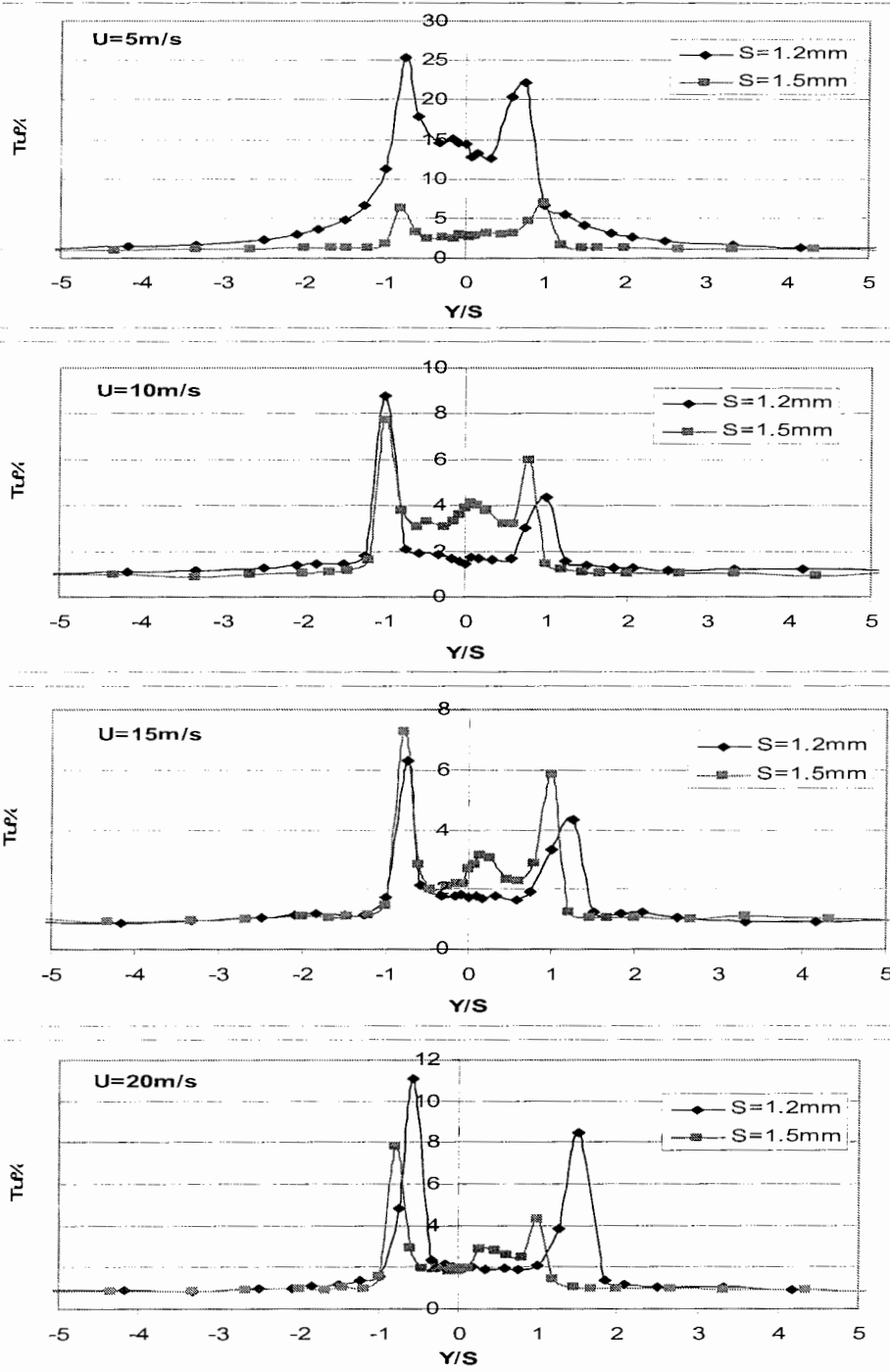


شکل (۹۱) توزیع شدت اغتشاشها پایین دست صفحه به پهناي $S=1/2\text{ mm}$ در سرعت $U=20\text{ m/s}$



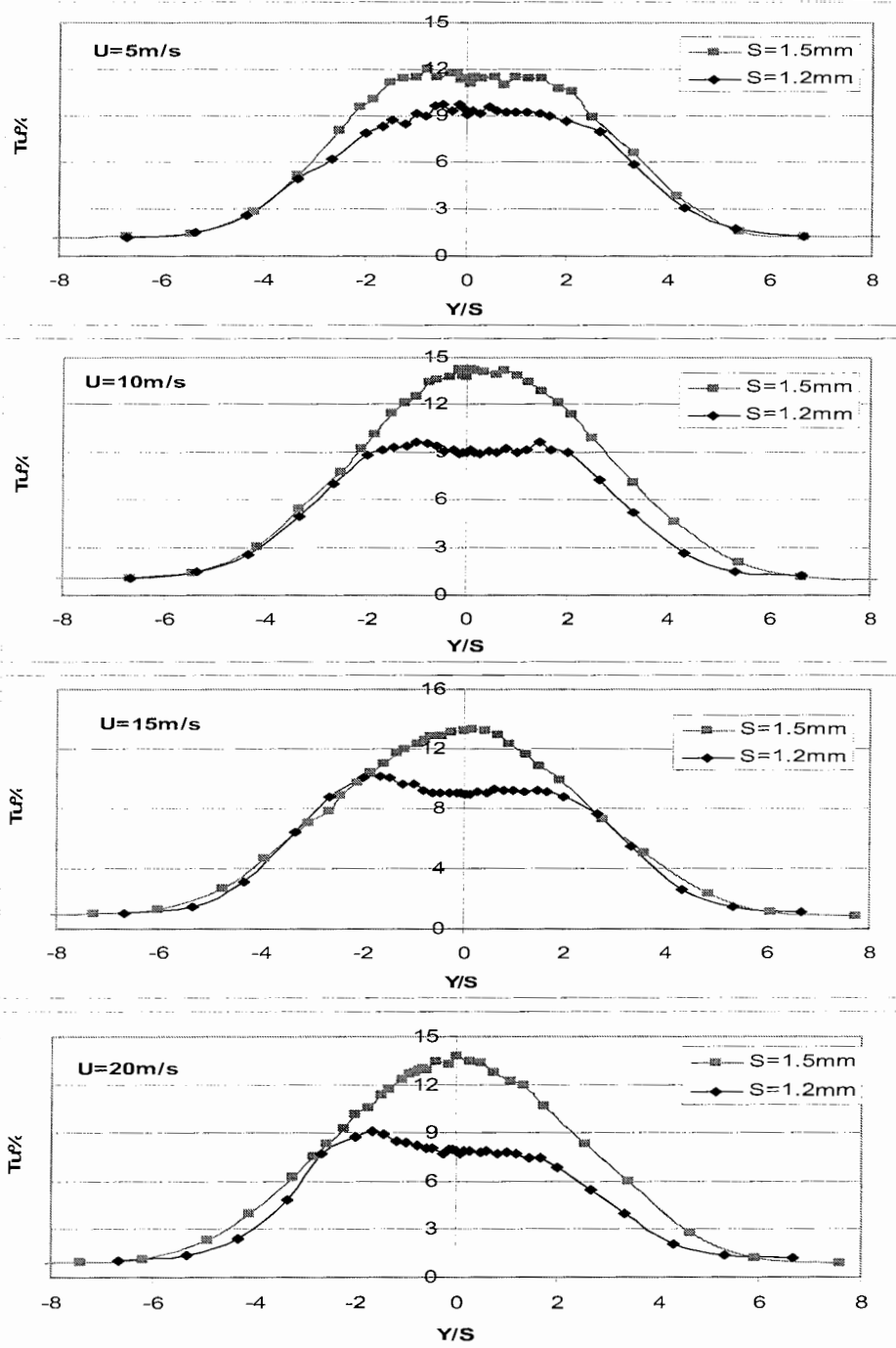
شکل (۹۲) مقایسه توزیع شدت اغتشاش‌ها پایین دست صفحه برای دو صفحه با پهنای $S=1/5\text{mm}$ و $S=1/2\text{mm}$ در فاصله

$$\frac{X}{S} = 0.35$$



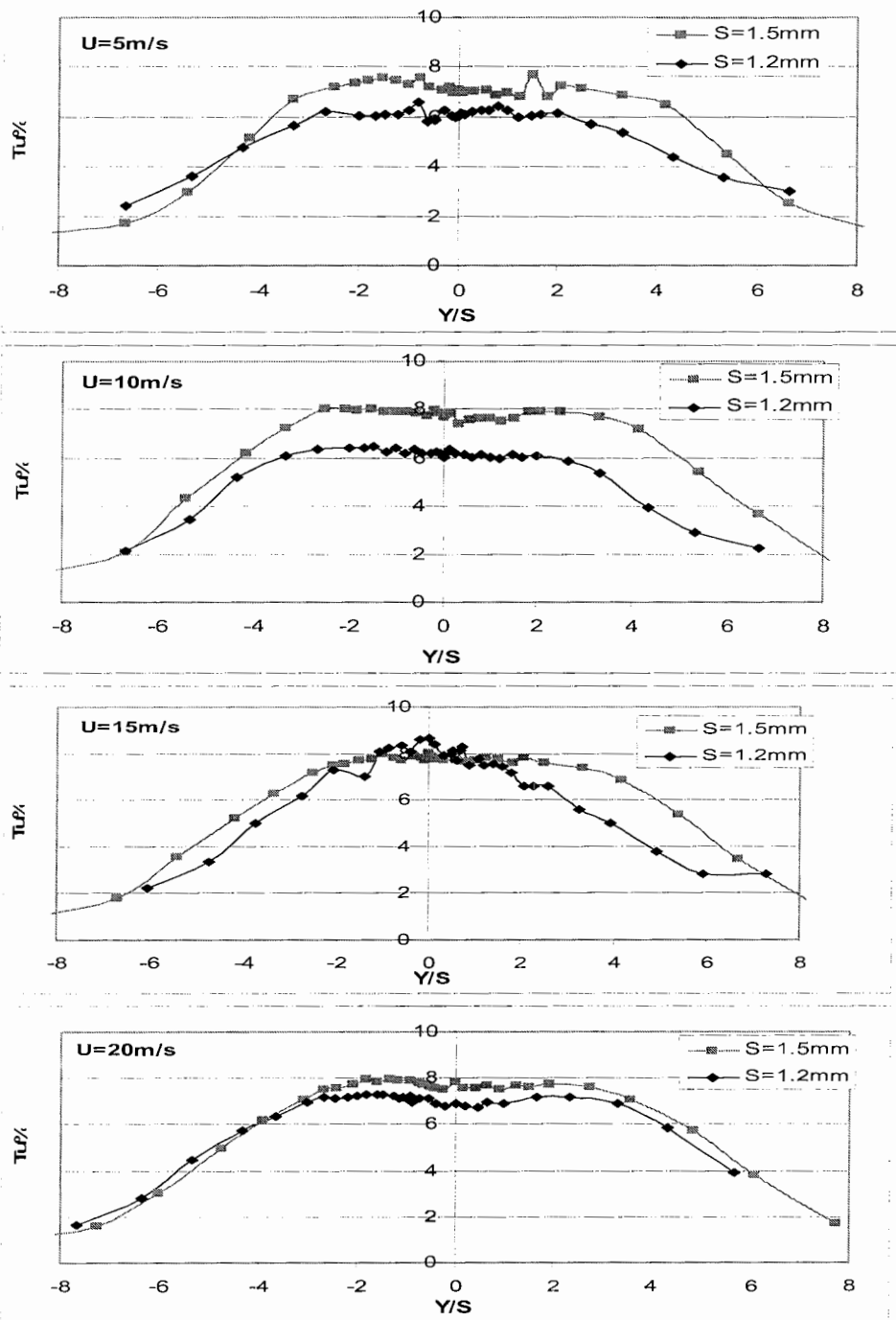
شکل (۹۳) مقایسه توزیع شدت اغتشاش‌ها پایین دست صفحه برای دو صفحه با پهنای $S=1/5\text{mm}$ و $S=1/2\text{mm}$ در فاصله

$$\frac{X}{S} = 1$$



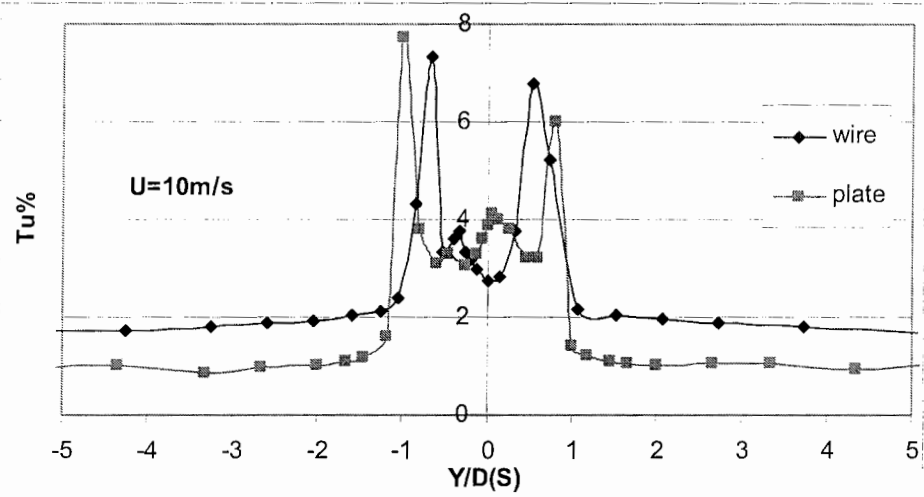
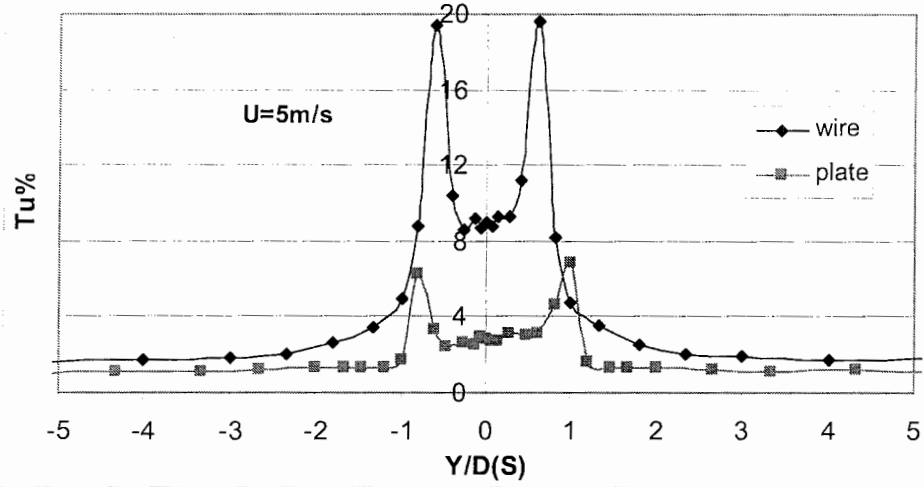
شکل (۹۴) مقایسه توزیع شدت اغتشاش‌ها پایین‌دست صفحه برای دو صفحه با پهنای $S=1/5\text{mm}$ و $S=1/2\text{mm}$ در فاصله

$$\frac{X}{S} = 24$$



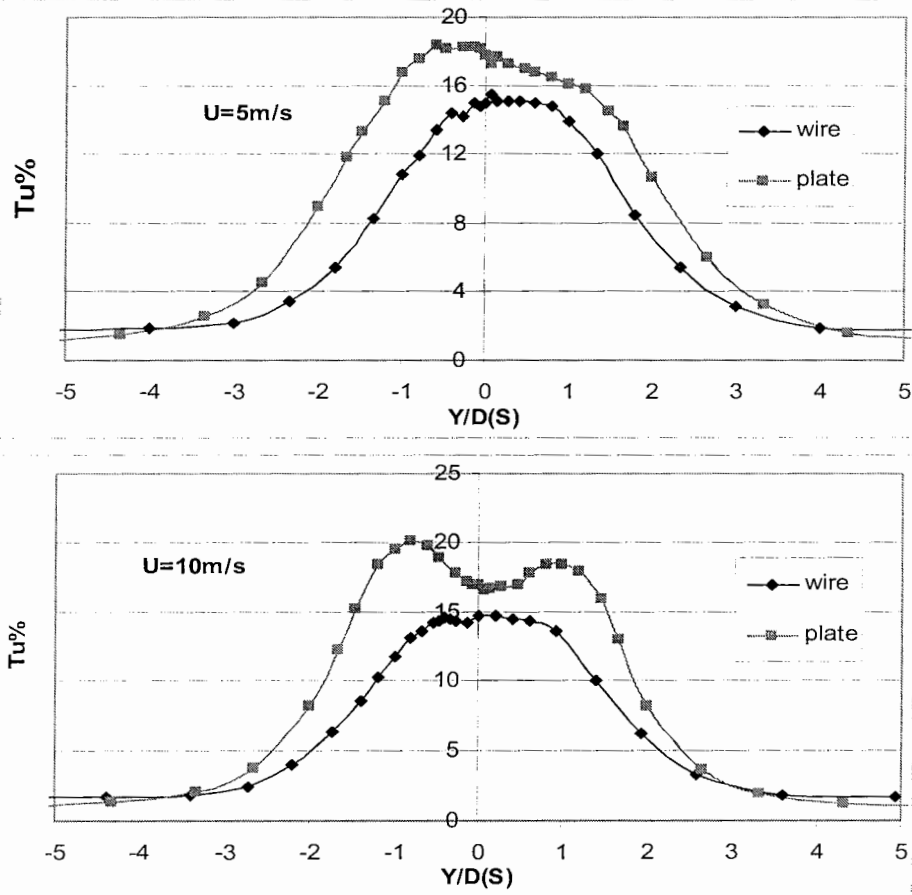
شکل (۹۵) مقایسه توزیع شدت اغتشاش‌ها پایین‌دست صفحه برای دو صفحه با پهنای $S=1/5\text{mm}$ و $S=1/2\text{mm}$ در فاصله

$$\frac{X}{S} = 50$$



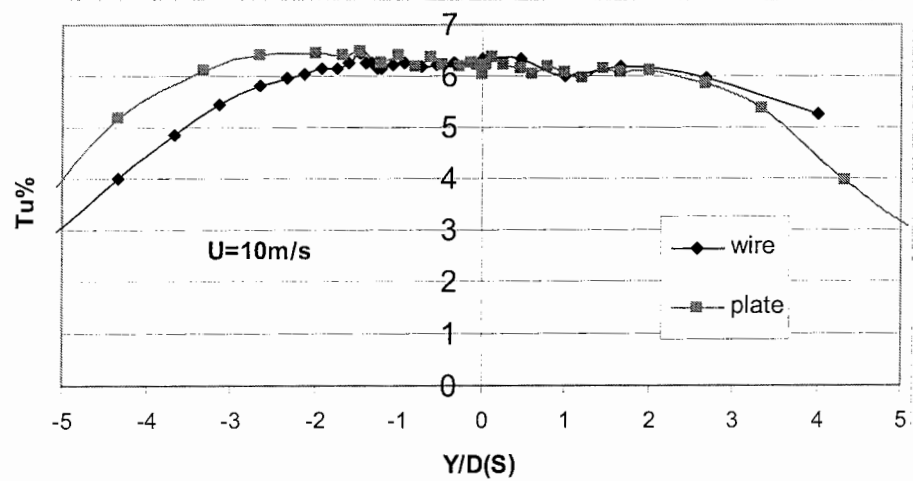
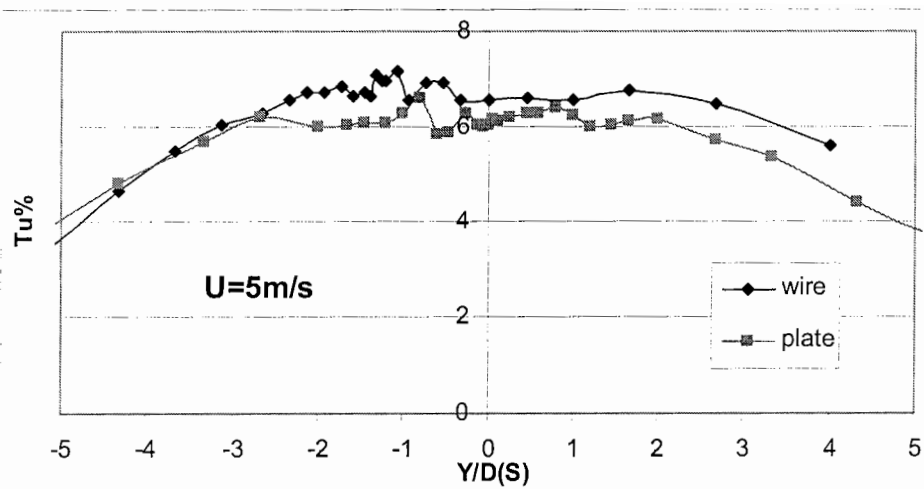
شکل (۹۶) توزیع شدت اغتشاشهای جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=۱/۵\text{mm}$ و صفحه به پهنای $S=۱/۵\text{mm}$ در

سرعتهای $U=۵\text{m/s}$ و $U=۱۰\text{m/s}$ در فاصله $X/D = 1$



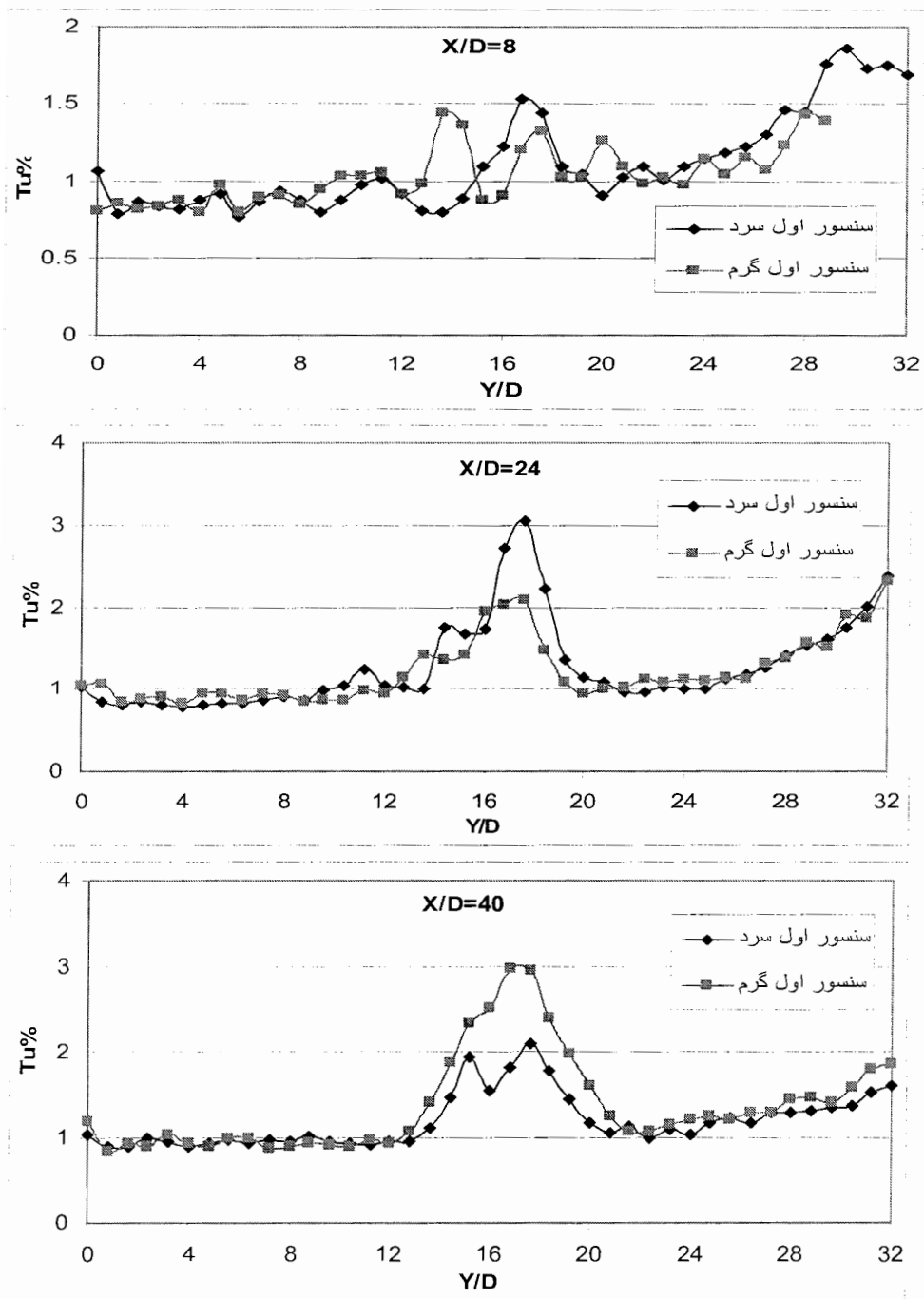
شکل (۹۷) توزیع شدت اغتشاشهای جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=1/8\text{mm}$ و صفحه به پهنای $S=1/8\text{mm}$ در

$$\frac{X}{D} = 9.3 \text{ در فاصله } U=1.0\text{m/s} \text{ و } U=5\text{m/s} \text{ سرعتهای}$$



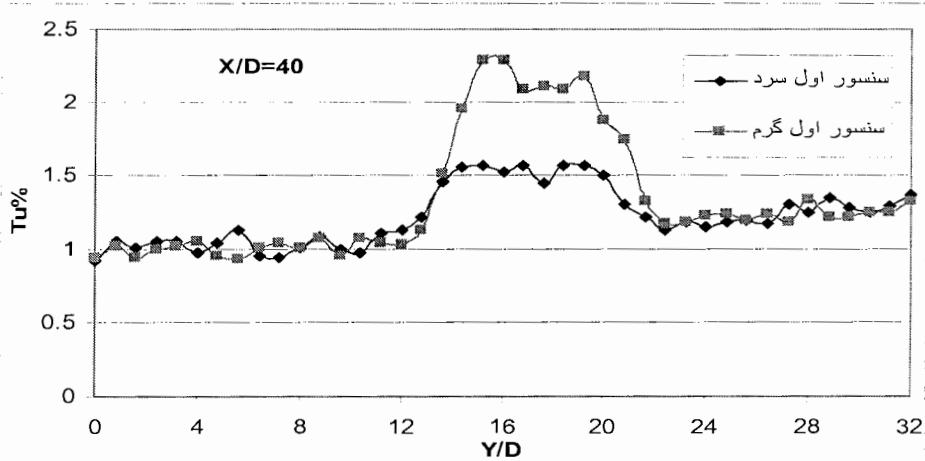
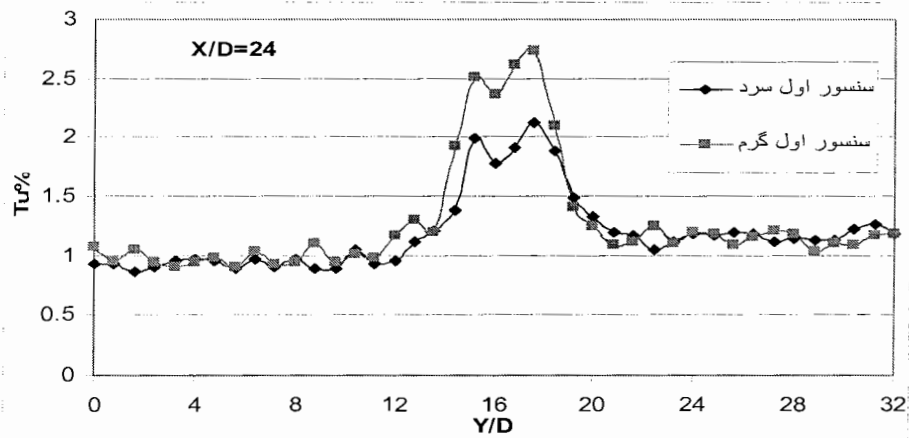
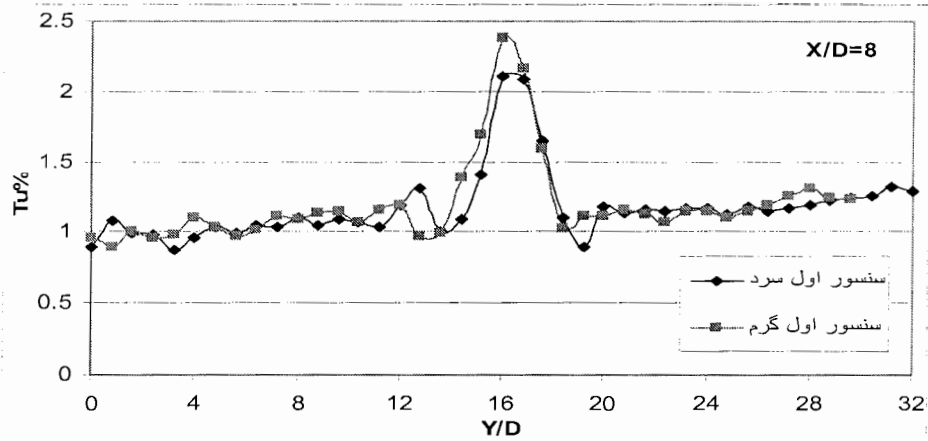
شکل (۹۸) توزیع شدت اغتشاشهای جریان هوا پایین دست مفتول به قطر $D=1/5\text{mm}$ و صفحه به پهنای $S=1/5\text{mm}$ در

سرعتهای $U=5\text{m/s}$ و $U=10\text{m/s}$ در فاصله $X/D = 50$



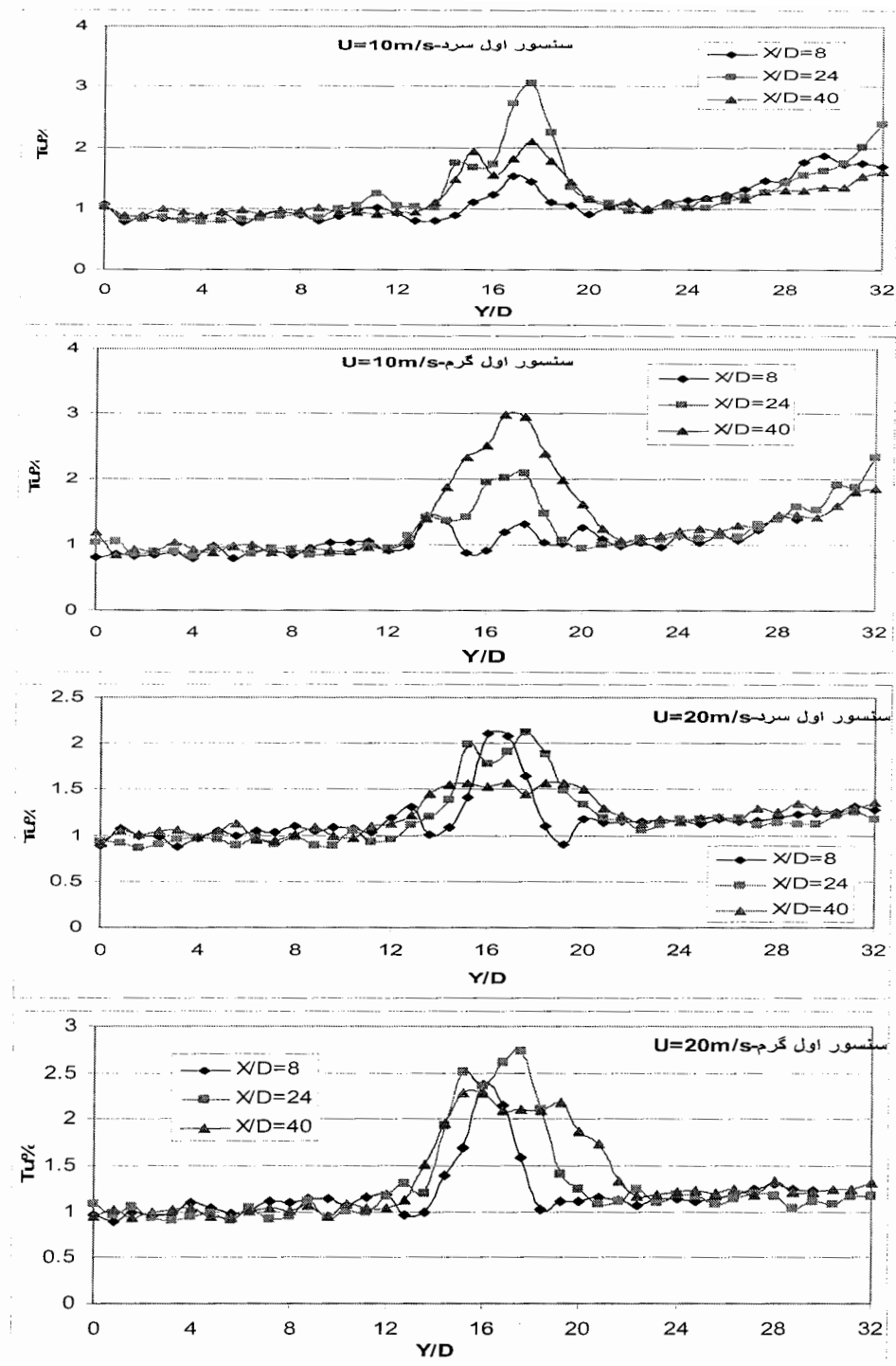
شکل (۹۹) توزیع شدت اغتشاشهای جریان هوای اندازه‌گیری شده بوسیله سنسور دوم در جهت پایین دست سنسور اول

هنگامیکه سرد و گرم است در سرعت $U=10 \text{ m/s}$



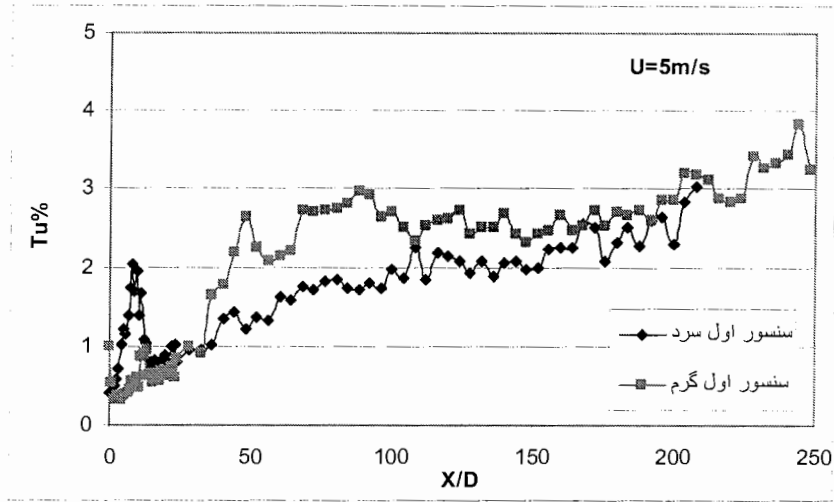
شکل (۱۰۰) توزیع شدت اغتشاشهای جریان هوای اندازه‌گیری شده بوسیله سنسور دوم در جهت پایین‌دست سنسور اول

هنگامیکه سرد و گرم است در سرعت $U=20 \text{ m/s}$

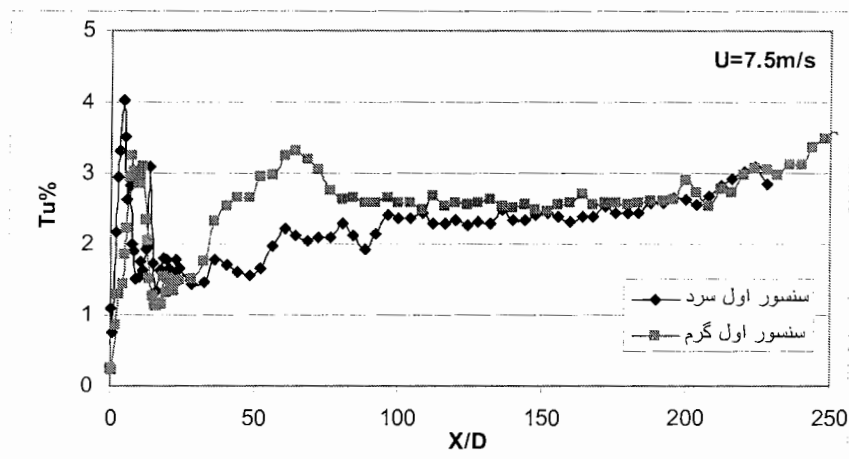


شکل (۱۰۱) توزیع شدت اغتشاشهای جریان هوای در نقاط ذکر شده پایین دست سنسور اول هنگامیکه سرد و گرم است در

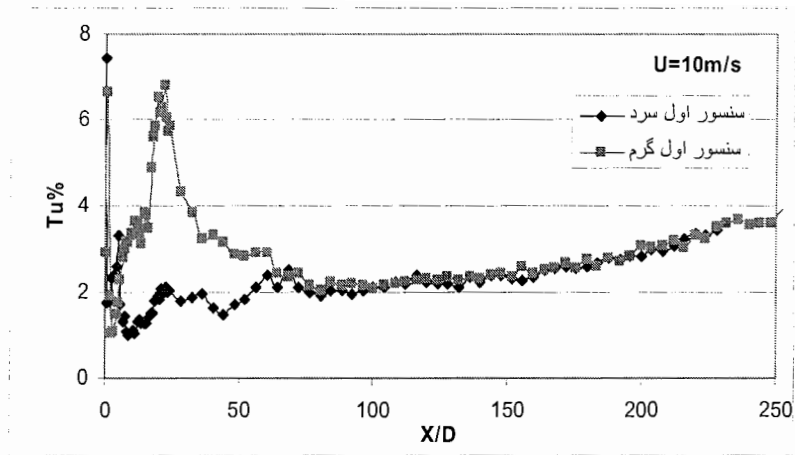
$$\text{سرعت } U=10 \text{ m/s و } U=20 \text{ m/s}$$



شکل (۱۰۲) توزیع شدت اغتشاشهای جریان هوای اندازه‌گیری شده بوسیله سنسور دوم در جهت پایین دست سنسور اول هنگامیکه سرد و گرم است در سرعت $U=5 \text{ m/s}$

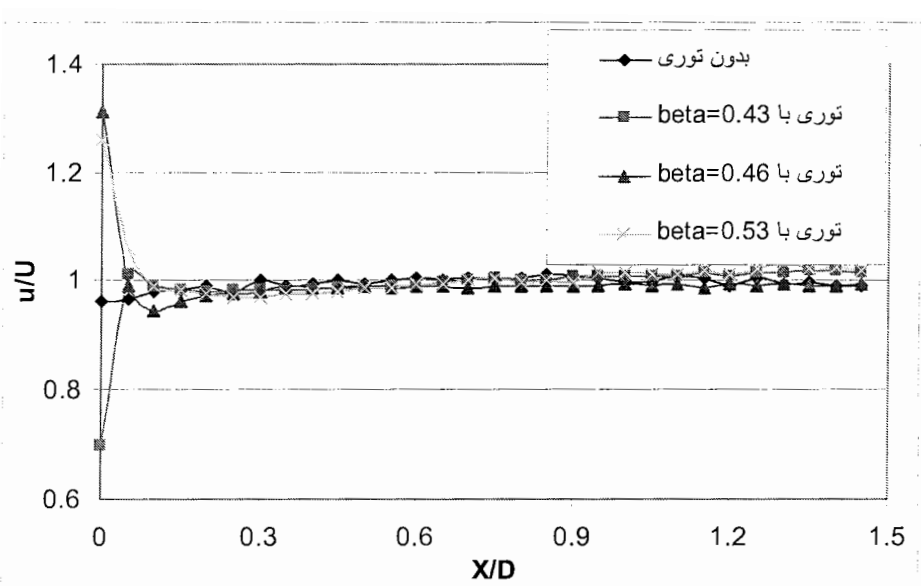


شکل (۱۰۳) توزیع شدت اغتشاشهای جریان هوای اندازه‌گیری شده بوسیله سنسور دوم در جهت پایین دست سنسور اول هنگامیکه سرد و گرم است در سرعت $U=7.5 \text{ m/s}$

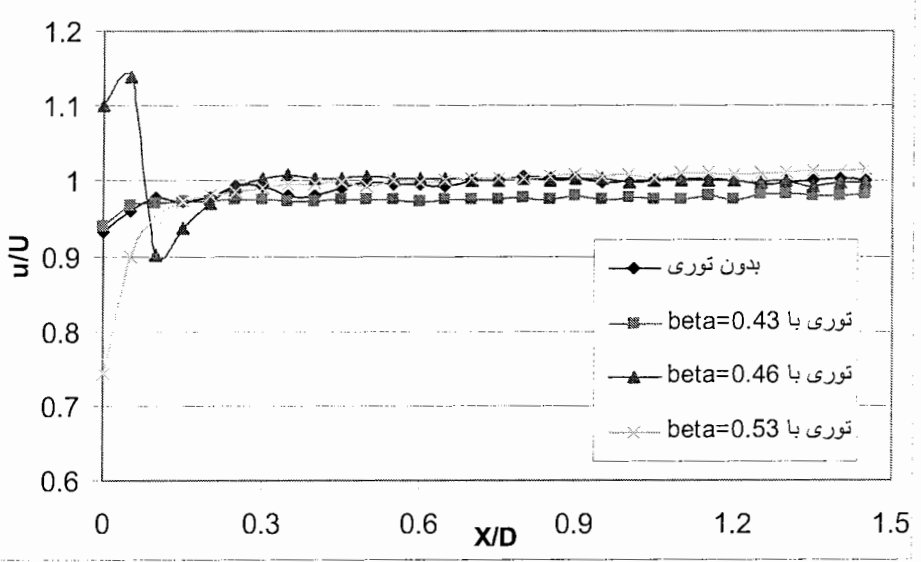


شکل (۱۰۴) توزیع شدت اغتشاشهای جریان هوای اندازه‌گیری شده بوسیله سنسور دوم در جهت پایین دست سنسور اول

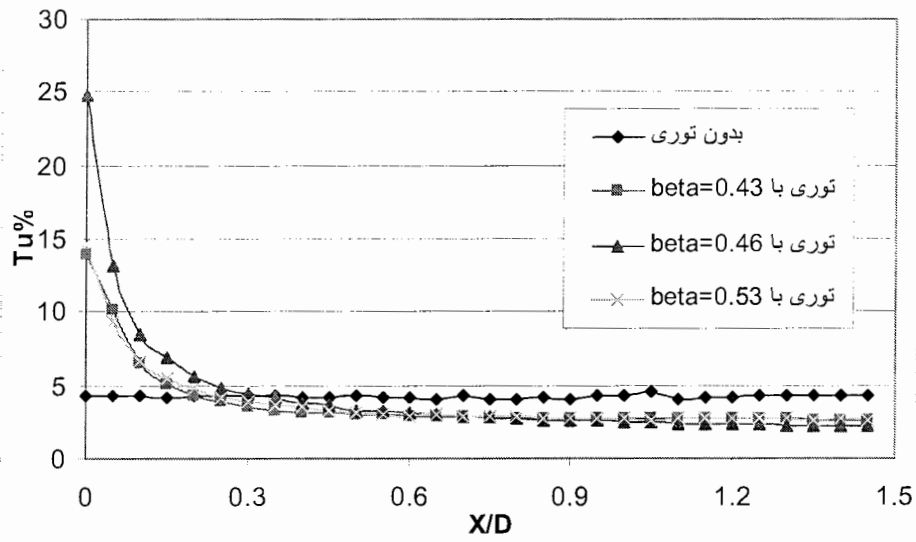
هنگامیکه سرد و گرم است در سرعت $U=10 \text{ m/s}$



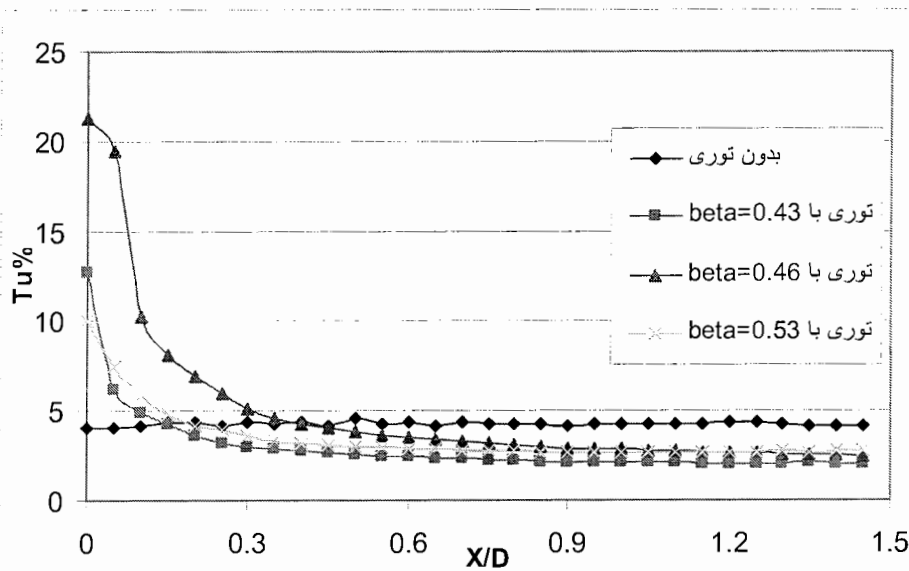
شکل (۱۰۵) تغییرات سرعت جریان هوا در پایین دست توری با مشهای مختلف در سرعت $U=10\text{m/s}$



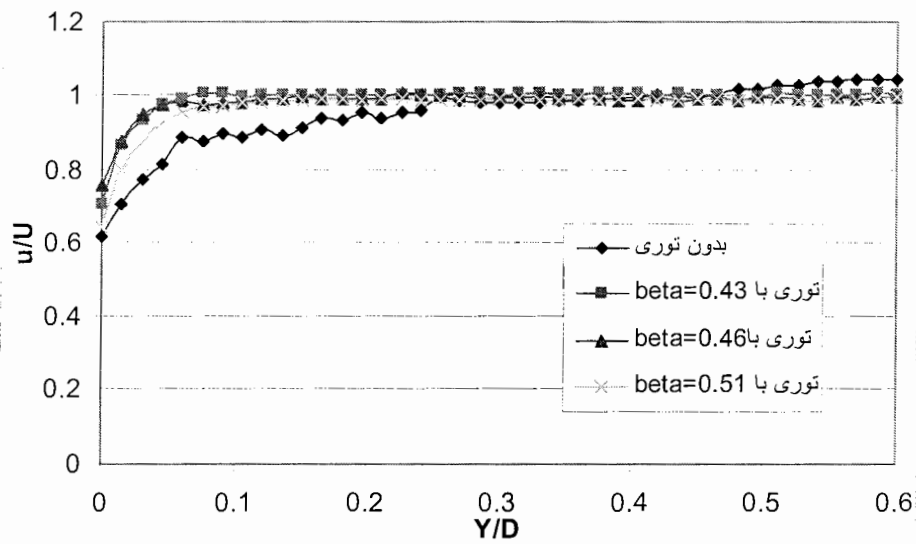
شکل (۱۰۶) تغییرات سرعت جریان هوا در پایین دست توری با مشهای مختلف در سرعت $U=30\text{m/s}$



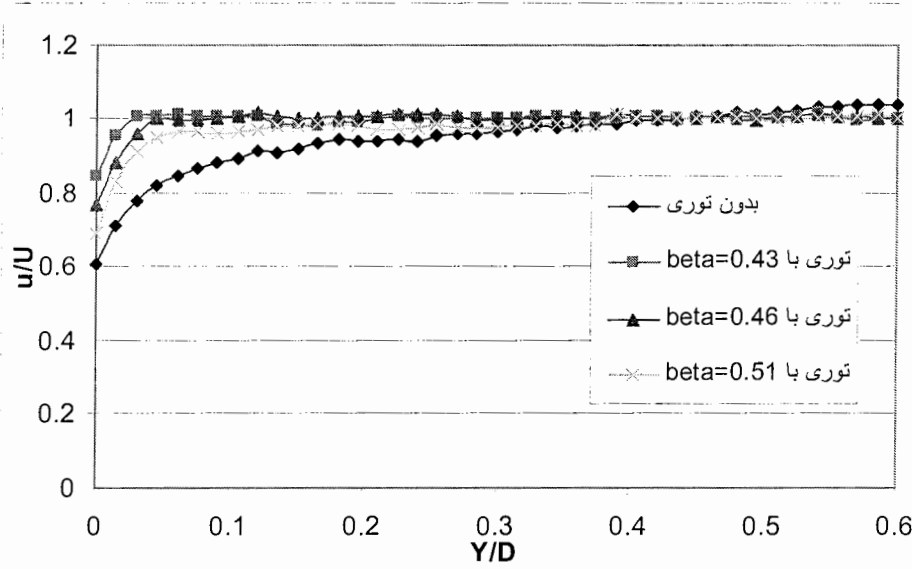
شکل (۱۰۷) تغییرات شدت اغتشاشهای سرعت جریان را در پایین دست توری با مشهای مختلف بر حسب سرعت جریان هوا در سرعت $U=10\text{m/s}$



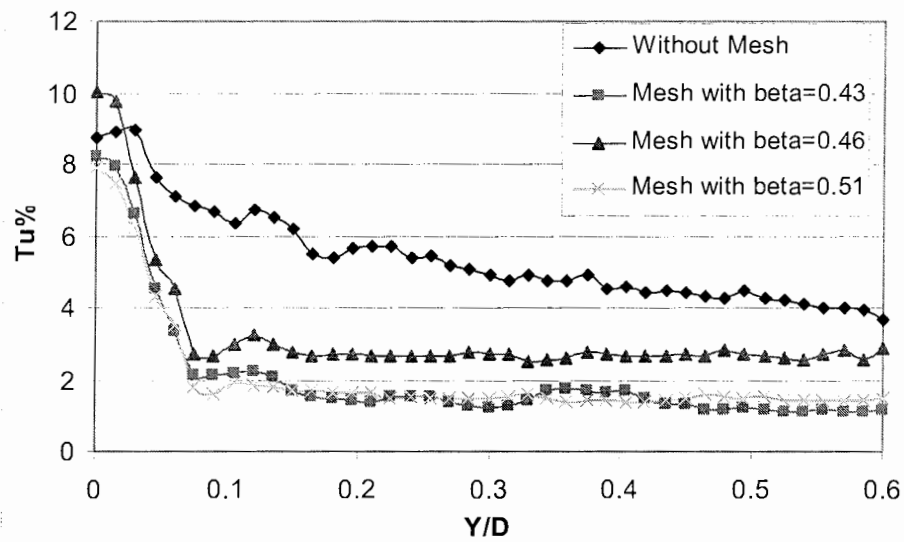
شکل (۱۰۸) تغییرات شدت اغتشاشهای سرعت جریان را در پایین دست توری با مشهای مختلف بر حسب سرعت جریان هوا در سرعت $U=20\text{m/s}$



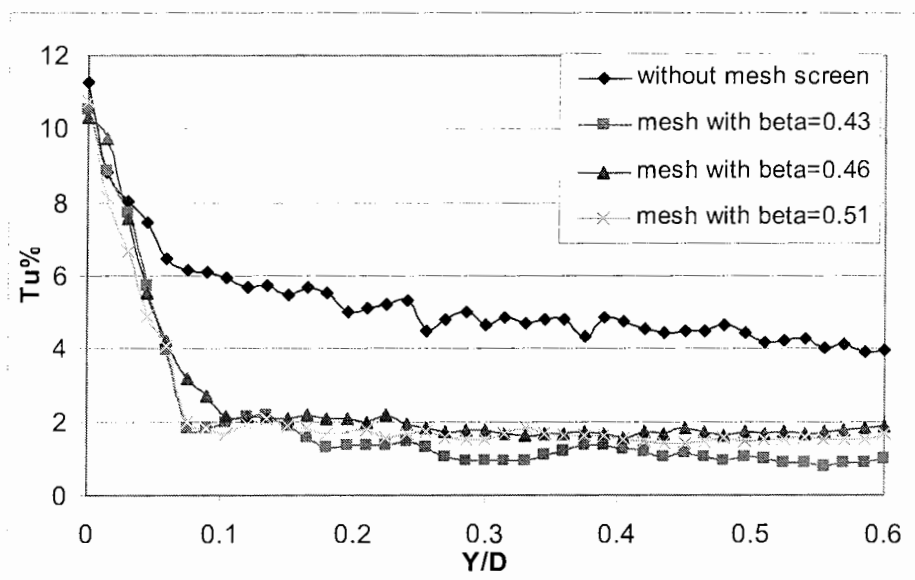
شکل (۱۰۹) توزیع سرعت جریان هوا در پایین دست توری در مقطعی که سنسور قرار دارد در سرعت $U=10\text{m/s}$



شکل (۱۱۰) توزیع سرعت جریان هوا در پایین دست توری در مقطعی که سنسور قرار دارد در سرعت $U=30\text{m/s}$



شکل (۱۱۱) شدت اغتشاشهای جریان هوا در پایین دست توری در مقطعی که سنسور قرار دارد در سرعت $U=20\text{m/s}$



شکل (۱۱۲) شدت اغتشاشهای جریان هوا در پایین دست توری در مقطعی که سنسور قرار دارد در سرعت $U=10\text{m/s}$

Abstract

Airflow velocity can be measured by hot/wire anemometer at high frequencies. So for turbulent flow and unsteady flow measurement, hotwire has its own special abilities. Since the hot wire anemometer(HWA) measures velocity on the basis of heat transfer and since the heat transfer rate is a scalar quantity, so HWA cannot determine the airflow direction, therefore in reverse flow measurements, we have some problems and the HWA cannot measure the reverse flow.

One of the application of HWA is in the spirometer. Spirometer can measure the volume flow of the human lungs and the physicians can recognize. Since the breath and expiration time is short, hotwire is one of the measurement methods is spirometer. But since the hotwire cannot measure the reverse flow, so the investigation of breath and expiration are difficult and we are two HWA for this purpose. When the flow is breath the downstream sensor is effected by the wake and heating from upstream sensor and the velocity measurement drop happens, and vice versa, when the flow is expiration, the upstream sensor is effected by the wake and heating from downstream sensor, the proper positioning of sensors to each other is so important. In this article the effects of wake and heating of the first sensor to the other one are discussed at different velocities and the results are used in spirometer.

مراجع:

کتاب و پایان نامه‌ها:

اردکانی، م.ع. جریان سنج سیم‌داغ (۱۳۸۳)

Bruun, H. H. (1995) Hot-Wire Anemometry, Principles and Signal Analysis. Oxford Science Publications

Miller, R. W. (1996) Flow Measurement Engineering Handbook. MCGRAW-HILL

*Schlichting, H. (1978) Boundary-Layer Theory. MCGRAW-HILL
Pope Low Speed Wind Tunnel*

Sumer (1997) Hydrodynamic around cylindrical structure. Vol.12

مقالات فارسی:

اردکانی، م.ع.، تهرانی، پ. بررسی تجربی منحنی مشخصه و کالیبراسیون سنسورهای سیم‌داغ و فیلم‌داغ دستگاه بادسنج سیم‌داغ (*Hot-Wire Anemometry*)، سیزدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک- دانشگاه صنعتی اصفهان

اردکانی، م.ع.، بهنام، ح.، بایگان، م. صادق، ی. (۱۳۸۴ ج) طراحی و ساخت اسپرومتر با استفاده از روش سیم‌داغ (*Hot-Wire*)

اردکانی، م.ع.، خوشنویس، ع.، قاسمیان، ح. (۱۳۸۴ ب) بررسی اثرات افزایش دمای سیال بر پاسخ دستگاه بادسنج سیم‌داغ (*Hot-Wire Anemometry*)، سیزدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک- دانشگاه صنعتی اصفهان

اردکانی، م.ع.، سالاری، م.، تقوی زنونز، ر. (۱۳۸۴ ج) تحلیل تجربی عملکرد واقعی دستگاه بادسنج سیم‌داغ و مقایسه عملکرد پرابهای سیم‌داغ و فیلم‌داغ در اندازه‌گیری سرعت جریان هوا، سیزدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک- دانشگاه صنعتی اصفهان

- Al-Kayiem, H. H. and Bruun, H. H. (1991). Evaluation of a flying X hot-wire probe system. Meas. Sci. Technol., 2, 374-380.*
- Bauer, A. B. (1965). Direct measurement of velocity by hot-wire anemometry. AIAA J., 3, 1189-1191.*
- Bradbury, L. J. S. and Castro, I. P. (1971). A pulsed-wire technique for measurements in highly turbulent flows. J. Fluid Mech., 49, 657-691.*
- Collis, D. C. and Williams, M. J. (1959). Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers. J. Fluid Mech., 6, 357-384.*
- Dinsdale, S., Roughton, A., and Collings, N. (1988). Length scale and turbulence intensity measurements in a motored internal combustion engine. SAE Paper No. 880380.*
- Downing, P. M. (1972). Reverse flow sensing hot wire anemometer. J. Phys. E.: Sci. Instr., 5, 849-851.*
- Gerich, R. (1975). A study of nonstationary relative velocities at the outlet of a Francis turbine impeller, using a rotating hot-film probe. DISA Info., No. 19, 19-25.*
- Gunkel, A. A., Patel, R. P., and Weber, M. E. (1971). A shielded hot-wire probe for highly turbulent flows and rapidly reversing flows. Ind. Engr. Chem. Fundam., 10, 627-631.*

- Gupta, A. K. and Srivatava, A. (1979). Feasibility study of a reverse flow sensing probe. *J. Phys. E.: Sci. Instr.*, 12, 1029-1030.
- Handford, P. M. and Bradshaw, P. (1989). The pulsed-wire anemometer. *Exp. In Fluids*, 7, 125-132.
- Jacobsen, R. A. (1977). Hot-wire anemometry for in-flight measurement of aircraft wake vortices. *DISA Info.*, No. 21, 21-27.
- Jorgensen, F. E. (1971a). Directional sensitivity of wire and fibre-film probes. *DISA Info.*, No. 11, 31-37.
- Kanevce, G. and Oka, S. (1973). Correcting hot-wire reading for influence of fluid temperature variations. *DISA Info.*, No. 15, 21-24.
- Mahler, D. S. (1982). Bidirectional hot-wire anemometer. *Rev. Sci. Instr.*, 53, 1465-1466.
- Mahler, O., Mastullo, R., and Mazzei, P. (1988). Calibration of hot-wire probes at low velocities in air with variable temperature. *DANTEC Info.*, No. 6, 6-8.
- Mayle, R. E. and Anderson, A. (1991). Velocity and temperature profiles for stagnation film cooling. *ASME, J. Turbomachinery*, 113, 457-462.
- Roshko, A. (1954). On the development of turbulent wakes from vortex streets. *NACA Report*, 1191.
- Swaminathan, M. K., Rankin, G. W., and Sridhar, K. (1986a). A note on the response equations for hot-wire anemometry. *ASME, J. Fluids Eng.*, 108, 115-118.