



## بررسی بازه عملکردی پراب دو حسگری فیلم داغ استوانه‌ای موازی در جریان‌های معکوس

محمدعلی اردکانی<sup>۱\*</sup>، پژمان اصغری تهرانی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

۲- کارشناس فنی، شرکت فراسنجش صبا

\*تهران، صندوق پستی ۳۵۳۸ - ۱۵۸۱۵، [ardekani@irost.org](mailto:ardekani@irost.org)

**چکیده** - با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ می‌توان سرعت لحظه‌ای جریان هوا را با فرکانس بسیار بالا اندازه‌گیری کرد. با توجه به این‌که جریان‌سنج سیم‌داغ بر مبنای انتقال حرارت عمل می‌کند، از این‌رو تشخیص جهت جریان هوا مشکل است. در این مقاله برای تعیین جهت جریان هوا از دو حسگر فیلم داغ استوانه‌ای شکل که به‌صورت موازی قرار دارند، استفاده شده که با استفاده از اثر دنباله و حرارت ناشی از حسگر بالادست بر حسگر پایین‌دست جهت جریان هوا را تشخیص می‌دهد اثر دنباله و حرارت حسگر بالادست بر حسگر پایین‌دست بررسی شده و با توجه به نتایج به‌دست آمده، پرابی با دو حسگر موازی به فاصله یک میلی‌متر ساخته شده است. عملکرد این پراب برای زاویه‌های مختلف جریان‌های آرام و آشفته بررسی شده و محدوده عملکرد آن  $\pm 10^\circ$  است.

**کلیدواژه‌گان:** جریان‌سنج سیم‌داغ، حسگر فیلم داغ استوانه‌ای شکل، جریان معکوس، دنباله، اثر حرارتی.

## Evaluation of the Range of Performance for a Probe Consisting of Two Parallel Hot-Film Cylindrical Sensors in Reverse Flows

M. A. Ardekani<sup>1\*</sup>, P. Asghari Tehrani<sup>2</sup>

1- Associate Prof., Department of Mechanical Engineering, Iranian Organization for Science and Technology (IROST)

2- Technical Expert, Farasanjesh Saba

\*P. O. B. 33165-115, Tehran, [ardekani@irost.org](mailto:ardekani@irost.org)

**Abstract-** Hot wire Anemometer (CTA) can be used to measure instantaneous flow velocity with high frequency. Since the principle of operation of CTA is based on convective cooling, determination of the air flow direction is difficult. In this Research paper, we have used two cylindrical hot-film sensors placed in parallel to determine the flow direction. The wake effect and the heat due to the upstream sensor on the downstream sensor has been used to identify the flow direction. Effect of wake and presence of the upstream sensor on the downstream sensor has been studied. The results have been used to construct a probe consisting of two parallel sensors, separated by 1mm distance. Performance of the probe has been evaluated at various flow angles for laminar and turbulent flows. Findings of this study show that this probe provides the best performance at  $\pm 10^\circ$  flow angles.

**Keywords:** Hot Wire Anemometer, Cylindrical Hot Film Sensor, Reverse Flow, Wake, Thermal Effect.

## ۱- مقدمه

اندازه‌گیری جریان سیال نقش مهمی در صنایع دارد. برای اندازه‌گیری جریان سیال از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد. مانند: لوله استاتیکی پیتوت، جریان‌سنج سیم‌داغ، جریان‌سنج لیزری و جریان‌سنج.

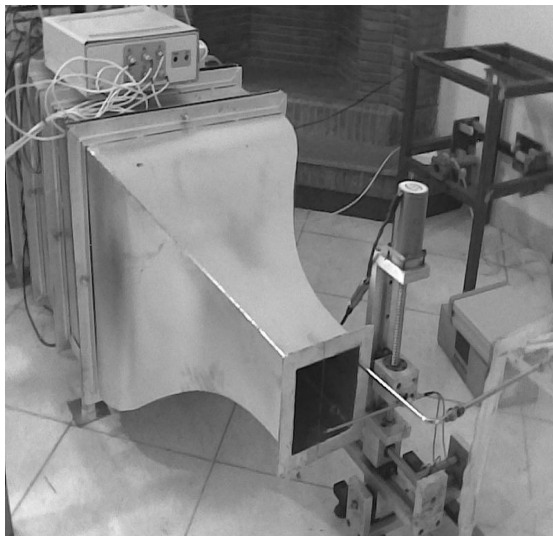
اگر تغییرات سرعت لحظه‌ای شدید باشد و بخواهیم اغتشاش‌های جریان سیال را اندازه‌گیری کنیم، یکی از بهترین دستگاه‌های اندازه‌گیری، جریان‌سنج سیم‌داغ است [۱]. جریان‌سنج سیم‌داغ توانایی اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال را با فرکانس بیش از ۳۰ kHz داشته و برای اندازه‌گیری جریان‌های آشفته و ناپایا مناسب است. با توجه به این‌که جریان‌سنج سیم‌داغ بر اساس انتقال حرارت از حسگر به محیط عمل می‌کند و نرخ انتقال حرارت کمیتهی اسکالر است، لذا جهت جریان سیال را با استفاده از یک جریان‌سنج سیم‌داغ نمی‌توان اندازه‌گیری کرد. بنابراین اندازه‌گیری جریان‌های معکوس مشکلاتی روبه‌رو بوده و جریان‌سنج سیم‌داغ توانایی اندازه‌گیری جریان معکوس (برگشتی) را ندارد. لازم است ذکر شود که احتمال وقوع جریان معکوس در برخی از جریان‌ها - از جمله انبساط ناگهانی در لوله‌ها و کانال‌ها، جدایش جریان بر روی سطوح منحنی شکل، جریان‌های چرخشی و مانند آن - وجود دارد و بنابراین اندازه‌گیری جریان معکوس با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ مهم است.

برای اندازه‌گیری جریان معکوس با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ روش‌ها و پراب‌های مختلفی توسط پژوهشگران ارائه شده است. با اندازه‌گیری‌های سرعت و دما نیز می‌توان جهت جریان هوا را تشخیص داد. در این روش با استفاده از یک حسگر سیم‌داغ می‌توان سرعت جریان هوا را اندازه‌گیری کرد و با استفاده از دو حسگر سیم‌سرد (برای اندازه‌گیری دما) که در بالادست و پایین‌دست حسگر سیم‌داغ قرار دارد می‌توان جهت جریان را تشخیص داد. هنگامی که جریان از بالادست به سمت پایین‌دست باشد، اثر گرمای ناشی از حسگر داغ در جهت جریان بوده و در این حالت حسگر سیم‌سرد پایین‌دست حسگر

سیم‌داغ، دمای بیشتری را اندازه‌گیری می‌کند که بیانگر جهت جریان هوا است [۲]. روش دیگر اندازه‌گیری جریان در دو جهت استفاده از دو حسگر سیم‌داغ است که به‌صورت موازی با یکدیگر قرار گرفته‌اند و بین دو حسگر سیم‌داغ استوانه‌ای با قطر  $d$  قرار می‌گیرد. در این حالت با اندازه‌گیری فرکانس گردابه ناشی از استوانه می‌توان سرعت و جهت جریان را تشخیص داد [۳]. همچنین با در نظر گرفتن کاهش سرعت اندازه‌گیری شده در ناحیه جدایش استوانه می‌توان جهت و سرعت جریان را تشخیص داد [۴]. در روش دیگر از دو حسگر سیم‌سرد موازی با سیمی که به‌صورت ضربانی گرم می‌شود، برای اندازه‌گیری سرعت جریان سیال و جهت آن استفاده می‌شود [۵-۶]. در این حالت سیم گرم به‌صورت لحظه‌ای گرم می‌شود. این ضربان‌ها با فاصله زمانی چند میکروثانیه ایجاد و در جریان سیال منتشر می‌شوند، با استفاده از مدت زمانی که طول می‌کشد تا این حرارت به حسگر سیم‌سرد پایین‌دست، برسد می‌توان سرعت جریان سیال و جهت آن را اندازه‌گیری کرد. یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری جهت جریان استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ با پراب متحرک است [۷-۸]. در این روش دستگاه جریان‌سنج سیم‌داغ سرعت نسبی را اندازه‌گیری می‌کند و با دانستن سرعت حرکت پراب می‌توان سرعت جریان و جهت آن را تشخیص داد. در روشی دیگر با استفاده از پرابی شامل دو حسگر موازی و نزدیک به هم در داخل یک لوله می‌توان جهت جریان را تشخیص داد [۹]. در این روش لوله سبب می‌شود که جریانی یک بعدی از روی حسگرهای سیم‌داغ عبور کند. هر یک از روش‌های فوق مزایا و معایبی دارد. برخی از آنها پیچیدگی زیادی در انجام آزمایش داشته و برخی در جریان‌های آشفته توانایی اندازه‌گیری جریان معکوس را ندارند.

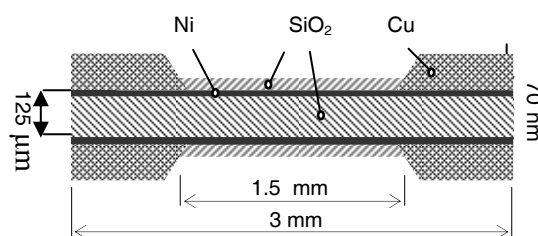
یکی دیگر از روش‌ها استفاده از پرابی است که دو حسگر موازی از نوع سیم‌داغ دارد. در این روش حسگرها درون لوله‌ای قرار دارند که جریان را یک بعدی می‌کند. در تحقیق حاضر، از دو حسگر موازی از نوع فیلم داغ که قطر زیر لایه آن برابر  $125 \mu\text{m}$  است، استفاده شد. حسگر فیلم داغ از

شکل ۲ شکل خروجی نازل تونل باد، لوله پیتوت، پراب جریان سنج سیم داغ و سازوکار انتقال دهنده را نشان می دهد. خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ به صورت ولتاژ است که از طریق کارت DAQ به رایانه ارسال شده و در نرم افزار تحلیل می شود. جریان سنج های سیم داغ از نوع CTA (دما ثابت) ساخت شرکت فراسنجش صبا است.



شکل ۲ شکل خروجی تونل باد، لوله پیتوت، پراب جریان سنج سیم داغ و سازوکار انتقال دهنده پراب

مطابق شکل ۳، حسگرهای مورد استفاده در این تحقیق از نوع فیلم داغ با قطر  $125 \mu m$  و فیلم حسگر از جنس نیکل است که بر روی کوارتز لایه نشانی شده و مشخصات آن به شرح زیر است.

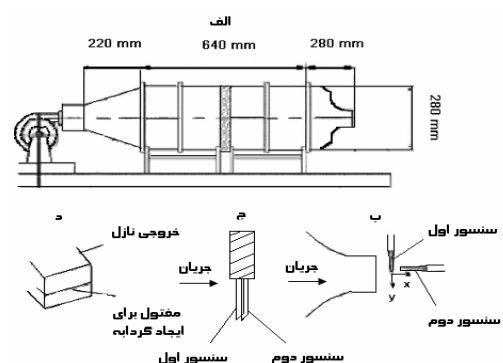


شکل ۳ مشخصات لایه های حسگر فیلم داغ

کوارتز استوانه ای شکل تشکیل شده که بر روی آن به ضخامت  $70 \text{ nm}$  نیکل لایه نشانی شده است. با توجه به قطر بالای حسگر فیلم داغ نیازی به استفاده از لوله برای یک بعدی کردن جریان وجود نداشته و می توان از خود پراب که شامل دو حسگر موازی است برای اندازه گیری جریان معکوس استفاده کرد. در این تحقیق اثر حسگر بالادست را بر حسگر پایین دست، در حالت های روشن و خاموش حسگر بالادست بررسی کرده و پس از ساخت پراب با دو حسگر موازی، تأثیر زاویه جریان و همچنین شدت اغتشاش های جریان، در اندازه گیری جریان معکوس بررسی می شود.

## ۲- روش آزمایش

آزمایش های مربوط به این تحقیق در آزمایشگاه تونل باد پژوهشکده مکانیک سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران انجام شده است. شکل ۱ طرحواره تونل باد، محور مختصات و نحوه قرارگیری حسگرها، جهت جریان، پراب ساخته شده و همچنین خروجی نازل را همراه با مفتول ایجاد گردابه ها نشان می دهد. این تونل باد از نوع مدار باز بوده (شکل ۱-الف) و با استفاده از دستگاه کنترل از راه دور سرعت آن تنظیم می شود. تونل باد دارای اتاق آرامش شامل چهار گروه توری و یک لانه زنبوری برای یکنواخت سازی جریان سیال است. برای کالیبره سازی سرعت جریان سنج سیم داغ از لوله استاتیکی پیتوت استفاده شده است.



شکل ۱ طرحواره تونل باد و بستر آزمایش

جدول ۱ مشخصات حسگرهای مورد استفاده در این تحقیق

حسگر ۲ (پایین دست)	حسگر ۱ (بالادست)	
نیکل	نیکل	جنس
۵Ohm	۴/۵Ohm	مقاومت
۰/۸	۰,۰/۸	نسبت فرا گرمایی
۱۲۵ μm	۱۲۵ μm	قطر زیر لایه کوارتز
۱/۲۵mm	۱/۲۵mm	طول فعال حسگر
≅ ۰/۰۷ μm	≅ ۰/۰۷ μm	ضخامت فیلم
۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۳۵	ضریب دمایی مقاومت (α)

بر اندازه‌گیری‌ها بررسی شده و با تغییر زاویه پراب نیز اندازه‌گیری‌ها تکرار می‌شوند.

### ۳- بحث و بررسی نتایج آزمایش

ابتدا سرعت جریان هوا در پایین دست حسگر فیلم داغ، هنگامی که حسگر فوق سرد یا گرم است، مطالعه می‌شود. در حالتی که حسگر بالادست (اول) گرم است، سرعت جریان هوا تحت تأثیر دنباله حسگر بالادست قرار گرفته و همچنین دنباله گرمایی ناشی از حسگر بالادست بر نرخ انتقال حرارت حسگر پایین دست (دوم) تأثیر می‌گذارد. رابطه ولتاژ خروجی دستگاه جریان سنج سیم داغ (E) و سرعت جریان هوا با معادله زیر توصیف می‌شود [۱۰]:

$$\frac{E^2}{R_w} = I^2 R_w = (A + BU^n)(T_w - T_a) \quad (2)$$

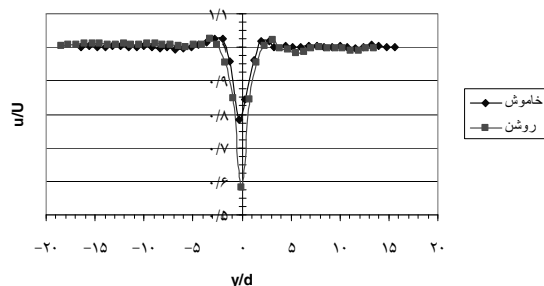
در این معادله  $T_w$  دمای حسگر،  $T_a$  دمای محیط،  $R_w$  مقاومت حسگر در دمای  $T_w$ ،  $U$  سرعت جریان هوا و  $A$ ،  $B$  و  $n$  ضرایب کالیبره‌سازی جریان سنج سیم داغ است. بر طبق معادله (۲) افزایش دمای محیط سبب کاهش ولتاژ خروجی جریان سنج سیم داغ شده و در نتیجه کاهش حساسیت اندازه‌گیری را در پی خواهد داشت [۱۱]. شکل ۴ تأثیر دمای محیط را بر درصد خطای سرعت اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. مطابق این شکل به ازای هر  $1^\circ C$  افزایش در دمای محیط، خطایی در حدود ۲٪ در اندازه‌گیری سرعت ایجاد می‌شود؛ از این رو هر چه دمای حسگر بالادست بالاتر باشد، دمای جریان هوا در اطراف آن بالاتر بوده و تأثیر آن بر حسگر پایین دست بیشتر است.

در این آزمایش مطابق شکل ۱-ب حسگر اول ثابت بوده و حسگر دوم نسبت به حسگر اول در جهت‌های مختلف  $x$  (جهت پایین دست جریان) و  $y$  (عمود بر جریان و خود حسگر) با استفاده از سیستم انتقال‌دهنده دقیق (شکل ۲) - که دقتی در حدود  $0/25 \text{ mm}$  دارد- حرکت کرده و جریان هوا با استفاده از جریان سنج فیلم داغ دوم اندازه‌گیری می‌شود.

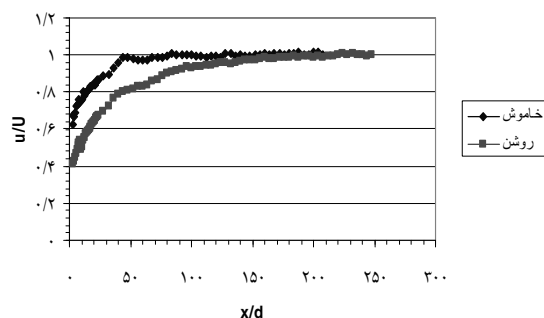
$$\text{OHR} = \frac{(R_w - R_a)}{R_a} = (T_w - T_a) \cdot \alpha \quad (1)$$

در این آزمایش نسبت فرا گرمایی بر روی حسگر بالادست تغییر داده شده و تأثیر آن بر روی اندازه‌گیری حسگر دوم بررسی می‌شود. در رابطه بالا  $R_w$  و  $R_a$  مقاومت‌های حسگر فیلم داغ در دمای حسگر  $T_w$  و دمای محیط  $T_a$  و  $\alpha$  ضریب دمایی مقاومت است. پس از ساخت پراب با دو حسگر موازی (شکل ۱-ج)، تأثیر گردابه‌های ناشی از مفتولی به قطر  $1/4 \text{ mm}$  (شکل ۱-د)

که ناحیه دنباله حسگر اول در این فاصله پایان یافته است، اما هنگامی که حسگر اول روشن باشد، سرعت محلی در فاصله  $x/d = 128$  برابر ۱ شده و این بدان مفهوم است که در این فاصله، اثر دمای حسگر اول بر حسگر دوم ناچیز است.

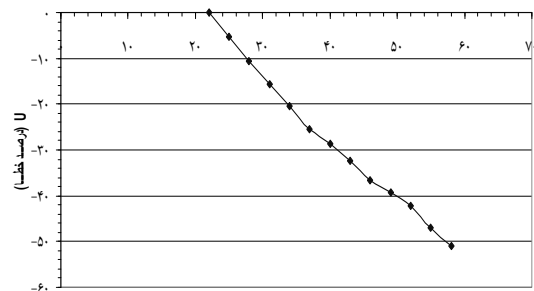


شکل ۵ توزیع بی بعد شده سرعت در جهت  $y$  پایین دست حسگر اول در حالت روشن و خاموش ( $x/d=8, U=10 \text{ m/s}$ )



شکل ۶ توزیع سرعت بی بعد شده در جهت  $x$  پایین دست حسگر اول در حالت روشن و خاموش ( $y/d=0, U=5 \text{ m/s}$ )

شکل ۷ نیز همین تأثیر را بر سرعت محلی برای حالت  $U=10 \text{ m/s}$  نشان می دهد. مطابق این شکل اثر حرارت در فاصله  $x/d=68$  ناچیز بوده اما دنباله حسگر اول تا فاصله  $x/d=115$  ادامه می یابد. با توجه به شکل ۶ و ۷ می توان دریافت که دنباله حسگر اول و اثر حرارتی آن به سرعت جریان هوا بستگی دارد. شکل ۸ فاصله بی بعد

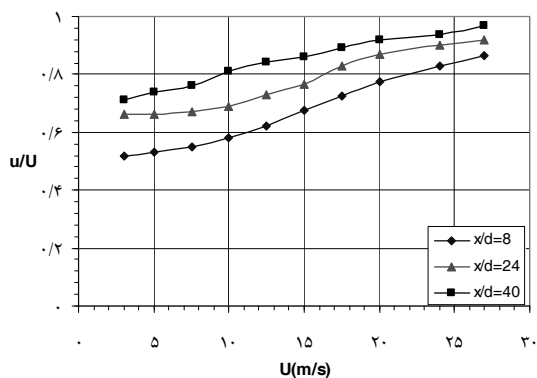


نمای سیال (C)

شکل ۴ تأثیر دمای محیط بر درصد خطای سرعت اندازه گیری شده ( $U=10 \text{ m/s}$ )

شکل ۵ توزیع سرعت جریان هوا را در جهت  $y$  پایین دست حسگر اول در حالت های روشن و خاموش نشان می دهد. توزیع سرعت در فاصله  $x=1 \text{ mm}$  ( $x/d=8$ ) قطر حسگر) و در سرعت  $U=10 \text{ m/s}$  نشان داده می شود. توزیع سرعت با استفاده از سرعت جریان آزاد  $U$  بی بعد شده است. همان گونه که در شکل ۵ نشان داده شده ناحیه دنباله ناشی از حسگر اول - هنگامی که روشن است - هم عمیق تر و هم پهن تر است طوری که کمترین سرعت در ناحیه حسگر، برای حالت خاموش در حدود  $\frac{u}{U} = 0.78$  بوده اما برای حالت روشن این مقدار برابر  $\frac{u}{U} = 0.58$  است. این بدان مفهوم نیست که دنباله ناشی از حسگر اول در حالت روشن عمیق تر شده است، بلکه ناشی از خطای اندازه گیری سرعت است که تحت تأثیر دمای حسگر اول قرار دارد. به منظور بررسی دقیق تر، تغییرات سرعت محلی در نقطه  $y/d=0$  در پایین دست حسگر اول اندازه گیری شده و در شکل ۶ این تغییرات برای حالت های روشن و خاموش در سرعت  $U=5 \text{ m/s}$  نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل نشان داده شده سرعت محلی برای حالتی که حسگر اول خاموش است در فاصله  $x/d=50$  در حدود ۱ بوده و این بدان مفهوم است

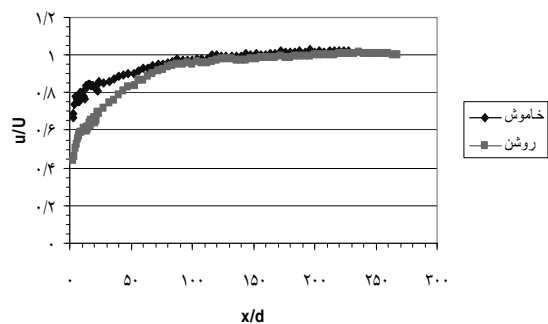
شکل، محور افقی سرعت جریان هوا ( $U$ ) و محور عمودی نسبت سرعت اندازه‌گیری شده توسط حسگر پایین دست به سرعت جریان هوا است. فاصله بین دو حسگر موازی برابر  $5\text{ mm}$ ,  $3\text{ mm}$ ,  $1\text{ mm}$  ( $x/d=8$  و  $24$  و  $40$ ) است. شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت جریان هوا، نسبت سرعت‌های اندازه‌گیری شده نیز افزایش یافته که برای اندازه‌گیری جریان‌های معکوس مناسب نیست. همچنین با افزایش فاصله بین دو حسگر این نسبت افزایش می‌یابد. با توجه به این شکل بهترین فاصله بین دو حسگر برابر  $5\text{ mm}$  ( $x/d=8$ ) است و اگر فاصله دو حسگر موازی کمتر از این باشد، آثار حرارتی دو حسگر بر یکدیگر موجب ایجاد خطا در اندازه‌گیری خواهد شد [۱۱]. بنابراین فاصله دو حسگر موازی در پراب را برابر یک میلی‌متر در نظر گرفته و با استفاده از این پراب می‌توان جریان معکوس را تا سرعت حدود  $25\text{ m/s}$  اندازه‌گیری کرد. لازم است ذکر شود که با کاهش سرعت، عملکرد پراب با حسگرهای موازی بهتر می‌شود.



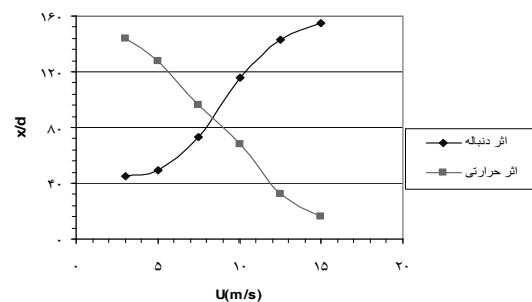
شکل ۹ تغییرات سرعت اندازه‌گیری شده ناشی از اثر دنباله و حرارت حسگر اول در سرعت‌های مختلف جریان آزاد در فاصله‌های مختلف ( $x/d=8, 24, 40, y/d=0$ )

برای مشخص کردن عملکرد پراب لازم است مطابق شکل ۱۰، زاویه جریان بر عملکرد پراب نیز بررسی شود.

شده‌ای که در آن اثر حرارتی و همچنین دنباله حسگر اول به پایان می‌رسد نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده این فاصله به سرعت جریان هوا بستگی دارد. در سرعت‌های کمتر از  $8\text{ m/s}$  ناحیه‌ای که اثر حرارتی حسگر اول مؤثر است، بزرگتر از ناحیه دنباله حسگر اول بوده اما در سرعت‌های بالاتر از  $8\text{ m/s}$  ناحیه‌ای که اثر حرارتی حسگر اول مؤثر است، کوچکتر از ناحیه دنباله حسگر اول است.

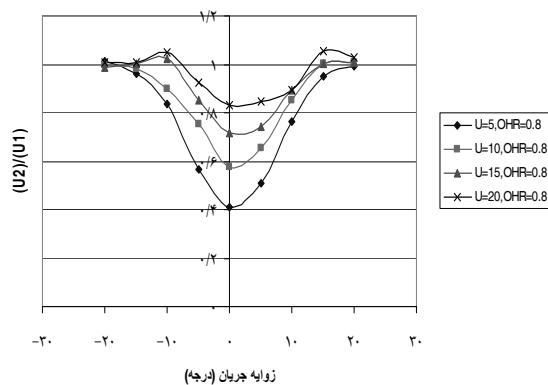


شکل ۷ توزیع سرعت بی‌بعد شده در جهت  $X$  پایین دست حسگر اول در حالت روشن و خاموش ( $y/d=0, U=10\text{ m/s}$ )



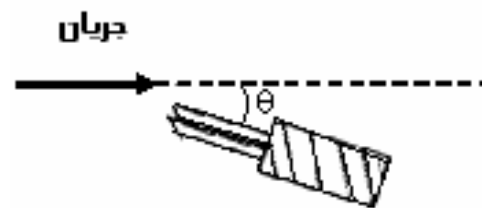
شکل ۸ تغییرات طول ناحیه‌ای دنباله و اثر حرارتی حسگر اول در سرعت‌های مختلف جریان آزاد ( $y/d=0$ )

به‌منظور مشخص کردن تأثیر فاصله دو حسگر پراب در اندازه‌گیری سرعت جریان، شکل ۹ آورده شده است. در این



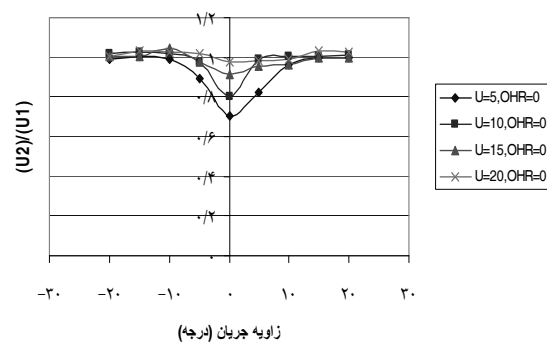
شکل ۱۲ تغییرات نسبت سرعت اندازه گیری شده توسط حسگرهای پراب نسبت به زاویه جریان در حالتی که حسگر اول روشن است  $OHR=0/8$

به منظور بررسی بهتر عملکرد زاویه پراب در جریان آشفته، با استفاده از مفتولی با قطر  $1/4 \text{ mm}$  (شکل ۱-د)، گردابه های کارمن ایجاد شده و سرعت جریان هوا توسط دو حسگر پراب فوق اندازه گیری شد. شکل ۱۳ سرعت لحظه ای اندازه گیری شده توسط حسگرهای پراب موازی را در زاویه های مختلف  $U=10 \text{ m/s}$  نشان می دهد. در این حالت مقدار نسبت فراگرمایی برای هر دو حسگر برابر  $0/8$  است. همان گونه که در این شکل نشان داده شده در زاویه های کمتر از  $10^\circ$ ، سرعت اندازه گیری شده توسط حسگر دوم بسیار کمتر از حسگر اول است و سرعت های اندازه گیری شده با یکدیگر تداخل ندارند. اما هنگامی که زاویه جریان بیشتر از  $10^\circ$  می شود، سرعت لحظه ای اندازه گیری شده توسط حسگرهای اول و دوم با یکدیگر تقاطع داشته و نشان دهنده آن است که در این زاویه از جریان نمی توان با استفاده از این پراب جریان معکوس را اندازه گیری کرد.

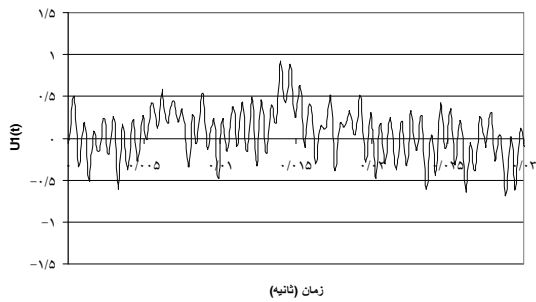


شکل ۱۰ طرحواره ای از زاویه جریان و پراب

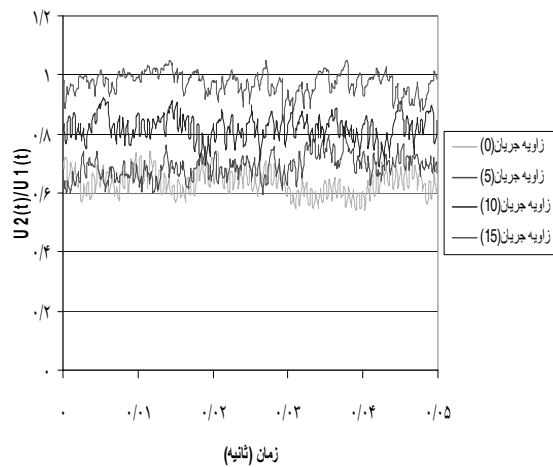
شکل ۱۱ تأثیر زاویه جریان را بر نسبت سرعت های اندازه گیری شده توسط حسگر پایین دست  $U_2$  به سرعت اندازه گیری شده توسط حسگر بالادست  $U_1$ ،  $(\frac{U_2}{U_1})$  در نسبت فراگرمایی صفر (در حالتی که حسگر بالادست خاموش است) نشان می دهد. عملکرد پراب در این حالت مناسب نبوده و در سرعت های پایین تر از  $5 \text{ m/s}$  می توان از پراب فوق در محدوده زاویه کمتر از  $7^\circ \pm$  استفاده کرد. شکل ۱۲ تأثیر زاویه جریان را بر نسبت سرعت های اندازه گیری شده در نسبت فراگرمایی  $0/8$  نشان می دهد. در این حالت می توان از این پراب برای زاویه جریان در بازه  $10^\circ \pm$  استفاده کرد.



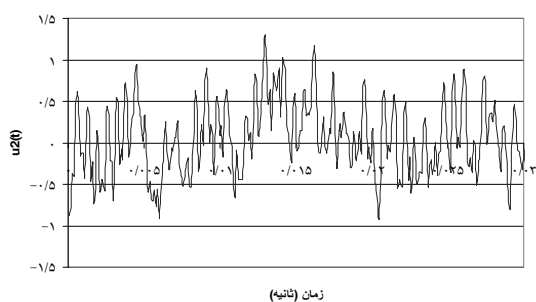
شکل ۱۱ تغییرات نسبت سرعت اندازه گیری شده توسط حسگرهای پراب نسبت به زاویه جریان در حالتی که حسگر اول خاموش است



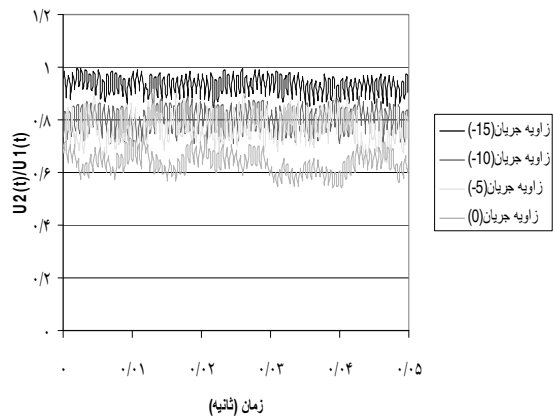
(الف)



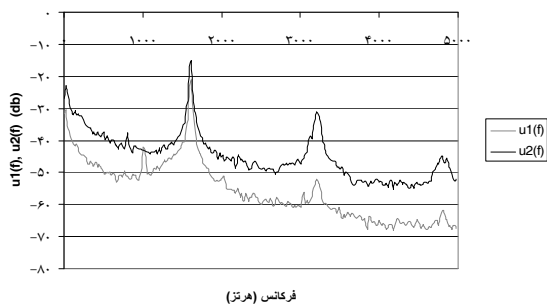
(ب)



(ب)



(ب)



(ج)

شکل ۱۳ تغییرات سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده توسط حسگر دوم پراب ( $U=10\text{m/s}$ )

شکل ۱۴ سیگنال و طیف اغتشاش جریان ناشی از مفتولی به قطر  $1/4\text{ mm}$  (الف) سیگنال اندازه‌گیری شده با حسگر اول (ب) سیگنال اندازه‌گیری شده با حسگر دوم (ج) طیف اغتشاش اندازه‌گیری شده با حسگرهای اول و دوم

به‌منظور بررسی بهتر اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط حسگرهای پراب، سیگنال اغتشاش سرعت لحظه‌ای جریان در شکل ۱۴-الف برای حسگر بالادست و در شکل ۱۴-ب برای حسگر پایین‌دست نشان داده شده است. طیف این اغتشاش‌ها در شکل ۱۴-ج نشان داده شده است.



همان‌گونه که در شکل نشان داده شده افزایش شدت اغتشاش ها  $Tu = \frac{\sqrt{(u')^2}}{U} \times 100$  از ۰/۲۵٪ به ۲/۵٪، سبب افزایش نسبت سرعت متوسط  $(\frac{U_2}{U_1})$  حسگرهای پراب به مقدار ۱۰٪ تا ۱۵٪ می‌شود. اما در بازه  $\pm 10^\circ$  مشکلی برای اندازه‌گیری جریان معکوس وجود ندارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

به‌منظور اندازه‌گیری جریان معکوس از دو حسگر فیلم‌داغ استوانه‌ای با قطر  $125 \mu\text{m}$  استفاده شده که با استفاده از دنباله و همچنین اثر حرارتی ناشی از حسگر اول بر حسگر دوم، سرعت اندازه‌گیری شده توسط حسگر دوم کمتر از حسگر اول بوده و با استفاده از آن می‌توان جهت جریان را تشخیص داد.

- در سرعت‌های کمتر از  $8 \text{ m/s}$  حرارت ناشی از حسگر اول بر اندازه‌گیری حسگر دوم مؤثرتر بوده اما در سرعت‌های بالاتر، ناحیه جدایش حسگر اول بر اندازه‌گیری حسگر دوم مؤثرتر می‌شود. فاصله مناسب بین دو حسگر برابر یک میلی‌متر و یا  $x/d = 8$  است.

- عملکرد پراب با حسگرهای موازی در سرعت‌های کمتر جریان هوا مناسب‌تر است و کاهش سرعت اندازه‌گیری شده توسط حسگر دوم برای  $U = 5 \text{ /s}$ ، حدود ۵۰٪ و برای  $U = 27 \text{ m/s}$  حدود ۱۳٪ است.

- عملکرد پراب با حسگرهای موازی در جریان‌های آشفته با شدت اغتشاش متوسط، مناسب بوده اما بازه اندازه‌گیری آن برای سرعت کمتر از  $20 \text{ m/s}$  مناسب است.
- برای اندازه‌گیری جریان معکوس زاویه جریان نسبت به پراب با حسگرهای موازی از اهمیت خاصی

همان‌گونه که در شکل‌ها نشان داده شده، جریان ناشی از مفتولی به قطر  $1/4 \text{ mm}$  نزدیک به سینوسی با فرکانس  $1480 \text{ Hz}$  است. این مقدار فرکانس توسط رابطه زیر [۱۲]:

$$F = 0.212 \text{Re} - 2/7 \quad (300 < \text{Re} < 2000) \quad (3)$$

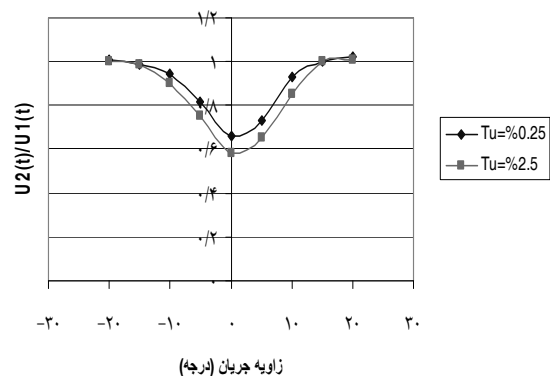
می‌شود. در این رابطه  $\text{Re}$  عدد رینولدز بر مبنای قطر

$$F = \frac{fd^v}{\nu}$$

مفتول و  $F$  بر طبق رابطه  $F = \frac{fd^v}{\nu}$  تعریف می‌شود که

$f$  فرکانس گردابه و  $d$  قطر مفتول و  $\nu$  لزجت است.

همان‌گونه که در شکل‌های ۱۴- ب و ج نشان داده شده، حسگر دوم نیز تقریباً همان فرکانس را همراه با فرکانس‌هایی پایین‌تر نشان می‌دهد اما جریان آن آشفته‌تر است. شکل ۱۵ اثر زاویه جریان آشفته را بر سرعت متوسط اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای پراب نشان می‌دهد. محور افقی این شکل زاویه جریان و محور عمودی نسبت سرعت‌های متوسط اندازه‌گیری شده  $(\frac{U_2}{U_1})$  توسط حسگرهای پراب است.



شکل ۱۵ تغییرات نسبت سرعت اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای پراب نسبت به زاویه جریان برای جریان آرام و آشفته ( $U = 10 \text{ m/s}$ )

- [7] Jacobsen R. A.; "Hot-wire anemometry for in-flight measurement of aircraft wake vortices"; DISA Info., No. 21, (1977), pp 21-27.
- [8] Dinsdale S., Roughton A., Collings N.; "Length scale and turbulence intensity measurements in a motored internal combustion engine"; SAE Paper No. 880380, (1988).
- [9] Neuerburg W.; "Directional hot-wire probe"; DISA Info., No. 7, (1969), pp 30-31.
- [10] Bruun H. H.; "Hot-Wire Anemometry, Principles and Signal Analysis"; Oxford Science Publications, (1995).
- [۱۱] اردکانی محمدعلی؛ "جریان سنج سیم داغ"؛ انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۵.
- [12] Roshko A.; "On the development of turbulent wakes from vortex streams"; NACA Report, 1191.5., (1954).

برخوردار بوده و این پراب توانایی اندازه‌گیری جریان معکوس را در بازه زاویه جریان  $\pm 10^\circ$  دارد.

## ۵- منابع

- [1] Motallebi F.; "A review of the hot-wire technique in 2-d compressible flows aerospace Sci"; Vol. 30, 1994, pp 267-294.
- [2] Downing P. M.; "Reverse flow sensing hot wire anemometer"; J. Phys. E. : Sci. Instr., 5, (1972), pp 849- 851.
- [3] Gupta A. K., Srivatava A.; "Feasibility study of a reverse flow sensing probe"; J. Phys. E. : Sci. Instr., 12, (1979), pp 1029-1030.
- [4] Mahler D. S.; "Bidirectional hot-wire anemometer"; Rev. Sci. Instr., 53, (1982), pp 1465-1466.
- [5] Bauer A. B.; "Direct measurement of velocity by hot-wire anemometry"; AIAA J., 3, (1965), pp 1189-1191.
- [6] Bradbury L. J. S., Castro, I. P.; "A pulsed-wire technique for measurements in highly turbulent flows"; J. Fluid Mech., 49, (1971), pp 657-691.