مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1397، دوره 18، شماره 04، ص‌ص 110-116

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# بررسی تجربی عوامل تاثیرگذار بر حساسیت جهت در جریان‌سنج سیم‌داغ

سعید فرساد[1]، محمد علی اردکانی[2]، فواد فرحانی[3*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران
3- دانشیار، مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی 33535111، f.farhani@irost.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 20 دی 1396
پذیرش: 26 بهمن 1396
ارائه در سایت: 26 اسفند 1396

*کلید واژگان:*
جریان‌سنج سیم‌داغ
نسبت هندسی پراب
حساسیت جهت
ضریب حساسیت
قانون کسینوسی

**چکیده**

در اندازه‌گیری جریان دوبعدی توسط جریان‌سنج سیم‌داغ، حساسیت سنسور به تغییر جهت جریان (حساسیت جهت یا پاسخ زاویه‌ای) از اهمیت زیادی برخوردار است. پاسخ زاویه‌ای سنسور، رابطه بین بردار سرعت جریان و انتقال حرارت از سنسور است که توسط تابع حساسیت تعیین می‌شود. در این مقاله با هدف بررسی دو تابع حساسیت شناخته شده (قانون کسینوسی و رابطه هینز) با استفاده از آزمایش‌های تونل باد، تاثیر عوامل مختلفی از جمله شرایط جریان (سرعت و جهت)، شرایط هندسی پراب (نسبت هندسی طول به قطر سنسور، $l/d$) و شرایط عملکردی پراب (دمای سنسور) بر محدوده قابلیت استفاده از قانون کسینوسی و مقدار ضریب حساسیت $k$ بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد، بازه زاویه‌ای استفاده از قانون کسینوسی به شرایط جریان و شرایط هندسی پراب وابسته است. در صورتی که خطای اندازه‌گیری توسط قانون کسینوسی تا 1% قابل قبول باشد، محدوده زاویه‌ای قابلیت کاربرد این قانون برای اندازه‌گیری جریان با سرعت‌هایی بیش از 10 m/s، به حدود $\pm 30°$ میرسد. در نسبت‌های هندسی بالاتر از 600، اندازه‌گیری توسط قانون کسینوسی از دقت خوبی برخوردار است. همچنین ضریب $k$، کاملا به شرایط جریان و شرایط هندسی پراب وابسته است، به نحوی که مقدار آن با افزایش زاویه و سرعت جریان و همینطور نسبت هندسی $l/d$، کاهش می‌یابد. نتایج این تحقیق در انتخاب و طراحی مناسب پراب برای افزایش دقت و بازه اندازه‌گیری دوبعدی جریان توسط جریان سنج سیم داغ قابل استفاده می باشد.

# Experimental Investigation on Parameters Affecting the Directional Sensitivity of Hot Wire Anemometer

**Saeed Farsad, Mohammed Ali Ardekani, Foad Farhani***

Department of Mechanical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran.
*P.O.B. 33535111, Tehran, Iran, f.farhani@irost.ir

**ARTICLE INFORMATION**

Original Research Paper
Received 10 January 2018
Accepted 15 February 2018
Available Online 17 March 2018

*Keywords:*
Cosine law
Directional sensitivity
Hot wire anemometer
Probe aspect ratio
Sensitivity coefficient

**ABSTRACT**

In two-dimensional flow measurement using hot wire anemometer, directional sensitivity (angular response) of sensor plays an important role in the measurement accuracy. The angular response of the sensor describes the relationship between flow velocity vector and heat transfer from the sensor, which is determined by a sensitivity function. In this paper, two sensitivity functions, namely cosine law and Hinze equation, have been studied using wind tunnel experiments to evaluate the effect of various parameters such as flow conditions (velocity and direction), probe aspect ratio ($l/d$) and probe operational condition (sensor temperature) on the range of applicability of cosine law and magnitude of the sensitivity coefficient, k. Results show that the angular range of applicability of cosine law depends on flow and probe conditions. At 1% measurement error, the range of applicability of cosine law for flow measurements of velocities exceeding 10 m/s was found to be in the range of ±30º. Moreover, at geometrical ratios higher than 600, two-dimensional flow measurements using the cosine law presents results with acceptable accuracy. In addition, the sensitivity coefficient is completely dependent on flow condition and probe aspect ratio, and its value decreases with increase in flow angle and velocity and reduction in probe aspect ratio. The results of this research can be used in the selection and proper design of probes for two-dimensional flow measurements using hot wire anemometers.

## 1- مقدمه

در طراحی سیستم‌های سیالاتی بویژه ارزیابی جریان مغشوش، شناخت و اندازه گیری کمیت‌های مختلف جریان هوا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا جریان‌سنج سیم‌داغ یکی از ابزارهای کاربردی در اندازه‌گیری جریان مغشوش می‌باشد. این دستگاه، بر مبنای میزان انتقال حرارت جابجایی از یک سیم‌داغ (سنسور) به جریان هوا عمل می‌کند و این انتقال حرارت متناسب با ولتاژ خروجی از جریان‌سنج ($E$) است. در جریان‌سنج سیم‌داغ، تعیین رابطه‌ای مناسب بین انتقال حرارت از سنسور و سرعت لحظه‌ای جریان

**برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**

**Please cite this article using:**

S. Farsad, M. A. Ardekani, F. Farhani, Experimental Investigation on Parameters Affecting the Directional Sensitivity of Hot Wire Anemometer, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 04, pp. 110-116, 2018 (in Persian)

هوا ($U$)، نیاز است. با استفاده از فرایند کالیبراسیون می‌توان این رابطه را به‌صورت تابع $E = f(U)$ تعریف کرد [1].

در اندازه‌گیری جریان دوبعدی با توجه به مشخص نبودن جهت جریان، ولتاژ خروجی جریان‌سنج علاوه‌بر سرعت جریان به جهت جریان نیز وابسته است. بنابراین در این حالت ولتاژ خروجی ($E$) مطابق با رابطه (1) بیان می‌شود [2]:

$$E = f(|\vec{U}|, \alpha) \tag{1}$$

در رابطه (1)، $|\vec{U}|$ اندازه بردار سرعت و $\alpha$ زاویه یاو[1] (زاویه بین جهت جریان و راستای عمود بر سنسور) می‌باشد (شکل 1).

با توجه به شکل 1، هنگامی که راستای جریان با سنسور تحت زاویه یاو قرار می‌گیرد می‌توان با استفاده از مفهوم سرعت خنک کننده موثر[2] $V_e$، روابط (2) و (3) را تعریف نمود:

$$E = f(V_e) \tag{2}$$

$$V_e = |\vec{U}|\, f(\alpha) \tag{3}$$

بطور کلی سرعت خنک‌کننده موثر ($V_e$)، متناسب با انتقال حرارت جابجایی از سنسور و تابعی از سرعت لحظه‌ای و زاویه جریان می‌باشد. در حقیقت $V_e$ بیانگر سرعتی است که اگر در راستای عمود بر محور سنسور ($\alpha = 0$) قرار گیرد، دقیقا ولتاژی متناظر با ولتاژ سرعت لحظه‌ای جریان ($E$) در همان زاویه یاو ایجاد خواهد نمود. این پارامتر پس از کالیبراسیون و طبق رابطه چند جمله‌ای (4) تعیین می‌شود [3].

$$V_e = C_0 + C_1 E + C_2 E^2 + C_3 E^3 + \cdots \tag{4}$$

در رابطه (4)، $E$ ولتاژ خروجی جریان‌سنج و $C_0, C_1, C_2, \cdots$ ضرایب ثابتی هستند که با برازش منحنی کالیبراسیون سرعت بدست می‌آیند.

در رابطه (3)، $f(\alpha)$ تابع حساسیت[3] نام دارد و توسط محققین مختلف ارائه شده است که معروف‌ترین آنها عبارتند از [4, 5]:

$$f^2(\alpha) = \cos^2\alpha \tag{5}$$

$$f^2(\alpha) = \cos^2\alpha + k^2 \sin^2\alpha \tag{6}$$

رابطه (5) قانون کسینوسی نام دارد. پرانتل [4] بصورت تجربی انتقال حرارت جابجایی از یک سیم داغ بلند را بررسی کرد و نشان داد، انتقال حرارت از این سیم تنها بواسطه مولفه عمودی سرعت جریان بر محور آن اتفاق می‌افتد و مولفه مماسی سرعت جریان در انتقال حرارت از آن نقشی ندارد. اساسا قانون کسینوسی برای یک سیم داغ با طول بلند که توزیع دمایی آن بصورت یکنواخت قرارگرفته صادق می‌باشد، اما در عمل به دلیل طول محدود سیم (سنسور) و تاثیر پایه‌های پراب، استفاده از این قانون در اندازه‌گیری جریان دوبعدی، احتمالا دقت اندازه‌گیری را کاهش خواهد داد.

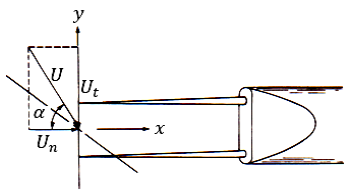


**Fig. 1** Yaw angle $\alpha$ for a single normal (SN) probe; $U$ flow Velocity; $U_t, U_n$ the vertical and tangential flow components of the sensor, respectively

**شکل 1** زاویه یاو $\alpha$ برای یک پراب عمودی؛ $U$ سرعت جریان؛ $U_t, U_n$ به ترتیب مولفه های عمودی و مماسی جریان بر سنسور

1- Yaw angle
2- Effective cooling velocity
3- Sensitivity function

هینز [5] در آزمایش‌های خود برای اندازه‌گیری جریان دوبعدی از قانون کسینوسی استفاده کرد و داده‌های تجربی او، انحراف از قانون کسینوسی را نشان می‌دهد. وی به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری رابطه (6) را ارائه داد. در تابع حساسیت (6)، تاثیر مولفه مماسی سرعت جریان بر انتقال حرارت از سنسور به همراه ضریب $k$ (ضریب حساسیت[4]) اعمال شده است. شبیر و لبانف [6] بصورت تجربی میزان انحراف از قانون کسینوسی را برای اندازه‌گیری سرعت جریان توسط سیم‌هایی با طول محدود آزمایش کردند و نشان دادند، استفاده از این قانون برای اندازه‌گیری جریان با زوایای $\alpha < 70°$، خطای ناچیزی دارد. نتایج آنها حاکی بر این است که در سرعت‌های پایین جریان و زوایای یاو بالا، انحراف از قانون کسینوسی بیشتر است. البته آنها به بازه دقیق زاویه‌ای که در آن قانون کسینوسی قابل کاربرد است و همچنین درصد خطای استفاده از این تابع در اندازه‌گیری جریان دوبعدی اشاره نکرده‌اند. کورسین [7] در یک آنالیز تحلیلی نشان داد، انحراف از قانون کسینوسی تنها بواسطه تغییرات ایجاد شده در انتقال حرارت هدایتی به پایه‌ها در زوایای یاو مختلف، اتفاق می‌افتد. اما چمپینگ و همکاران [8] با توسعه و بررسی تجربی تابع حساسیت (6) اظهار داشتند، انحراف از قانون کسینوسی تنها بواسطه انتقال حرارت جابجایی ایجاد می‌شود و انتقال حرارت هدایتی در آن نقشی ندارد. آنها در تحقیق خود تاثیر نسبت هندسی پراب[5] (طول به قطر سنسور، $l/d$) و سرعت جریان بر ضریب $k$ را نیز بررسی کردند. اگرچه آنها نشان دادند، ضریب $k$ به سرعت جریان وابسته نبوده و مقدار آن با افزایش نسبت هندسی کاهش می‌یابد، اما حساسیت این ضریب را نسبت به جهت جریان بررسی نکردند. در ادامه سامت و ایناو [9] در یک تحقیق تجربی نشان دادند ضریب $k$ به سرعت و زاویه جریان وابسته است. چیو و هاو [10] بصورت تجربی نشان دادند، $k$ تابعی از زوایه جریان بوده، اما به سرعت وابستگی ندارد. بروون [11] $k$ را تحت تاثیر زاویه $\alpha$، اندازه سرعت $|\vec{U}|$، نسبت هندسی $l/d$ و دمای سنسور معرفی کرد و نشان داد در سرعت‌های مختلف مقدار آن پراکنده است و از روند خاصی پیروی نمی‌کند. البته نتایج وی دربردارنده بررسی تاثیر نسبت فراگرمایی[6] ($\alpha_t$) و نسبت هندسی $l/d$ بر ضریب $k$ نمی‌باشد. عبدالرحمن [12] ضریب حساسیت را بطور کلی به سه عامل سرعت جریان، شدت اغتشاش‌ها و نوع سنسور وابسته معرفی کرد و نشان داد، اتخاذ یک مقدار ثابت برای ضریب حساسیت، دقت اندازه‌گیری را کاهش می‌دهد. اگرچه وی نتیجه گرفت، قانون کسینوسی راه حلی ساده و مناسب برای اندازه‌گیری جریان دوبعدی نسبت به توابع پیچیده دیگر است، اما بازه دقیق کاربرد این قانون را معرفی نکرد. در ادامه پائول و همکاران [13] نشان دادند استفاده از قانون کسینوسی در اندازه‌گیری سرعت‌های کم (زیر 3 m/s) منجر به ایجاد خطا خواهد شد. آنها یک روش جدید برای تخمین ضریب حساسیت در سرعت‌های پایین بصورت یک معادله درجه دو ارائه کردند. باکن و همکاران [14] روش کالیبراسیون سرعت موثر[7] را با یک روش کالیبراسیون عددی برای یک پراب X-شکل در سرعت‌های پایین (0.5 m/s − 6) مقایسه و ضمن معرفی محدودیت‌های آن نشان دادند، در سرعت‌های پایین در روش سرعت موثر، پاسخ زاویه‌ای پراب[8] به شدت به زاویه یاو وابسته است. دیاز و همکاران [15] بصورت تجربی خطای اندازه‌گیری ناشی از اختلال‌های سیالاتی ایجاد شده توسط پراب دوبعدی X-شکل را بررسی کرده و نشان دادند، پایه‌ها و سنسورهای پراب، گردابه‌هایی

4- Sensitivity coefficient
5- Probe aspect ratio
6- Overheat ratio
7- $V_e$ calibration method
8- Angular response

ایجاد می‌کنند که اثرات تداخلی آنها در جریان سیال منجر به ایجاد خطا در تعیین ضریب حساسیت می‌شود. مارتین و همکاران [16] انحراف از قانون کسینوسی را به دلیل رفتار جریان بالادست و میدان سرعت در نزدیکی سنسور معرفی کردند. اگرچه آنها یک تابع حساسیت جدید ارائه دادند که در آن اثرات ایرودینامیکی پراب بر پاسخ زاویه‌ای اعمال شده است، اما در تابع معرفی شده تاثیر عوامل موثر دیگر را لحاظ نکرده‌اند.

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد، پراکندگی زیادی در نتایج گزارش شده توسط محققین مختلف در خصوص محدوده کاربرد قانون کسینوسی (رابطه (5)) و وابستگی ضریب حساسیت $k$ (رابطه(6)) وجود دارد. بنابراین به نظر می‌رسد، تحقیقات بیشتری برای شناخت و درک بهتر موارد فوق مورد نیاز است. از اینرو تحقیق تجربی حاضر می‌تواند در این راستا مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق، عوامل مختلف تاثیرگذار بر محدوده قابلیت کاربرد قانون کسینوسی و ضریب حساسیت $k$، شامل: هندسه پراب (نسبت $l/d$ سنسور)، شرایط جریان (سرعت و زاویه) و شرایط عملکردی پراب (نسبت فراگرمایی، $\alpha_t$) بصورت تجربی مورد بحث و بررسی قرارگرفته است. به این منظور پراب‌هایی با نسبت‌های هندسی مختلف (در محدوده 150 تا 700) ساخته شده و با نسبت‌های فراگرمایی متفاوت (در بازه 0.2 تا 1.05) در تونل باد در زوایای مختلف یاو ($90 \leq \alpha \leq -90°$) و بازه‌ای از سرعت‌های متفاوت جریان ($1 \leq U \leq 20$ m/s) قرار می‌گیرند و در طی آزمایش‌های متعدد، تاثیر همه عوامل مذکور، بررسی شده است. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها در قالب منحنی تغییر سرعت موثر در زوایای مختلف یاو، منحنی‌های تاثیر مواردی نظیر سرعت، نسبت فراگرمایی (دمای سنسور) و نسبت هندسی پراب بر محدوده زاویه‌ای کاربرد قانون کسینوسی و منحنی‌های تاثیر زوایه یاو، سرعت، نسبت فراگرمایی و نسبت هندسی پراب بر ضریب حساسیت $k$، ارائه شده است. نتایج این تحقیق در انتخاب و طراحی مناسب پراب مفید بوده و در افزایش دقت و بازه اندازه‌گیری دوبعدی جریان سنج سیم داغ حائز اهمیت است.

## 2- روش انجام آزمایش

در تحقیق حاضر برای ایجاد جریان هوا در بازه $1\ \mathrm{m/s} < U < 20\ \mathrm{m/s}$، از یک تونل باد مدار بسته مطابق شکل 2 استفاده می‌شود. نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل این تونل باد 10 و شدت اغتشاش آن 0.2% می‌باشد. به منظور کالیبراسیون پراب‌ها و انجام آزمایش‌ها در بازه زوایه $\pm 90°$ از یک مکانیزم دوران پراب استفاده شده است. این مکانیزم دارای یک محور دوران با چرخش 360 درجه بوده که با بکارگیری موتور پله‌ای در آن می‌توان پراب را با دقت 0.72° دوران داد. در جدول 1 مشخصات پراب‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها ارائه شده است. نرم افزار و جریان‌سنج مورد استفاده در تحقیق نوع CTA[1] و ساخت شرکت فرا سنجش صبا می‌باشد. انتقال داده‌های اندازه‌گیری شده توسط جریان‌سنج به رایانه، توسط کارت DAQ مدل NI PCI-6010 انجام می‌گیرد.

به منظور انجام آزمایش‌ها ابتدا پراب مورد آزمایش، در محدوده سرعت جریان مشخص در هر آزمایش، توسط تونل باد کالیبره می‌شود. پراب کالیبره شده بر روی مکانیزم دوران نصب شده و با توجه به سرعت جریان هوا، در زوایای مختلف یاو $\alpha$ قرار می‌گیرد. بازه تغییرات سرعت جریان و زوایای یاو در جدول 2 ارائه شده است.

1- Constant current temperature anemometer

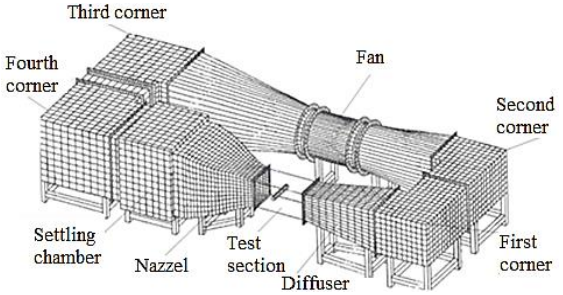


**Fig. 2** The closed loop wind tunnel used in the study

**شکل 2** تونل باد مدار بسته مورد استفاده در تحقیق

**جدول 1** مشخصات پراب‌های مورد استفاده در تحقیق

**Table 1** Specifications of probes used in the study

| نوع پراب | جنس سنسور | نوع سنسور | طول سنسور، $l$ (mm) | قطر سنسور، $d$ (μm) | نسبت هندسی ($l/d$) |
|---|---|---|---|---|---|
| SN[2] | تنگستن | بدون روکش | 0.75 | 5 | 150 |
| SN | تنگستن | بدون روکش | 1.25 | 5 | 250 |
| SN | تنگستن | بدون روکش | 2 | 5 | 400 |
| SN | تنگستن | بدون روکش | 2.5 | 5 | 500 |
| SN | تنگستن | بدون روکش | 3 | 5 | 600 |

**جدول 2** بازه تغییر پارامترهای مختلف در هر آزمایش

**Table 2** Range of variations of different parameters for each test

| پارامتر متغیر | بازه تغییرات | مقدار پارامتر در هر مرحله |
|---|---|---|
| زاویه یاو (درجه) | $-90 < \alpha < 90$ | 1.44° |
| سرعت جریان (m/s) | $1 < U < 20$ | 1, 3, 5, 10, 15, 20 |

مقدار ضریب حساسیت $k$ با توجه به سرعت موثر بدست آمده از رابطه (4)، در هر زاویه یاو ($\alpha$) توسط رابطه (7) محاسبه می‌شود.

$$k(\alpha) = \left[ \left( \left( \frac{V_e}{V_{e_n}} \right)^2 - \cos^2 \alpha \right) / \sin^2 \alpha \right]^{1/2} \tag{7}$$

در رابطه (7)، $V_{e_n}$ مقدار سرعت موثر است، در حالیکه که محور سنسور کاملا عمود بر راستای جریان ($\alpha = 0$) باشد. از آنجا که تعیین ضریب $k$ به وضعیت قرارگیری سنسور در جریان وابسته است، برای داشتن کمترین تداخلات پراب در اندازه‌گیری و انجام آزمایش دقیق‌تر، ساقه پراب بصورت عمودی نسبت به جهت جریان قرار می‌گیرد تا سنسور دقیقا در یک نقطه و صفحه ثابت، دوران داشته باشد.

با توجه به اهمیت توزیع دمایی سنسور بر اندازه‌گیری و تاثیر نسبت هندسی ($l/d$) و نوع جوش سنسور بر آن، مطابق با جدول 1، پراب‌ها با نسبت‌های هندسی مختلف ساخته شده (شکل 3)، سپس بر اساس شرایط جدول 2، آزمایش‌ها برای هر پراب تکرار می‌شود.

از آنجا که اساسا جریان‌سنج سیم‌داغ بر مبنای انتقال حرارت از سنسور به جریان عمل می‌کند، هرچه دمای سنسور بالاتر باشد حساسیت آن نسبت به تغییر لحظه‌ای سرعت جریان بیشتر خواهد بود [17]. لذا دمای سنسور از

2- Single Normal

**Fig. 3** Probes with different aspect ratios ($l/d$)

**شکل 3** پراب‌های مورد استفاده با نسبت‌های $l/d$ مختلف

دیگر عواملی است که می‌تواند بر محدوده کاربرد تابع حساسیت و مقدار ضریب حساسیت $k$ تاثیرگذار باشد.

در جریان سنج‌سیم‌داغ برای تعیین دمای سنسور مطابق با رابطه (8)، از نسبت فراگرمایی ($\alpha_t$) استفاده می‌شود.

$$\alpha_t = (R_w - R_a)/R_a \tag{8}$$

در رابطه (8)، $R_w$ مقاومت سنسور در دمای عملکرد سنسور ($T_w$) و $R_a$ مقاومت سنسور در دمای محیط ($T_a$) می‌باشد. به منظور اصلاح اثر تغییر دمای محیط بر اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای، لازم است نسبت فراگرمایی، متناسب با مقادیر دقیق $R_w$ و $T_w$ تعیین شود. در این راستا، پراب با نسبت هندسی $l/d = 250$ در بازه نسبت فراگرمایی $0.2 \le \alpha_t \le 1.05$ قرار داده شده است تا دمای سنسور در مقادیر مختلف (68.67، 110، 152، 193، 235، 277 و 304.78 °C) تنظیم شود. سپس در هر دما مطابق با هریک از شرایط جدول 2 آزمایش‌ها انجام می‌شود. به این ترتیب اثر دمای سنسور بر توابع حساسیت نیز تحقیق شده است.

## 3- بحث و نتایج

در این بخش ابتدا تاثیر عوامل موثر از جمله: هندسه پراب (نسبت $l/d$ سنسور)، شرایط جریان (سرعت و زاویه جریان) و شرایط عملکردی پراب (دمای سنسور) بر قانون کسینوسی و محدوده قابلیت کاربرد آن بررسی شده و سپس تاثیر این عوامل بر ضریب حساسیت $k$ تحقیق و نتایج مورد بحث قرار گرفته است.

### 3-1- بررسی عوامل موثر بر محدوده کاربرد قانون کسینوسی

دلایلی نظیر طول محدود سنسور و توزیع دمایی غیر یکنواخت آن، در انحراف از قانون کسینوسی موثر می‌باشد. شکل 4 انحراف از قانون کسینوسی و تغییر سرعت موثر بی‌بعد شده را در زوایای مختلف یاو و سرعت‌های متفاوت جریان نشان می‌دهد. در اینجا سرعت موثر از رابطه چندجمله ای (4) محاسبه می‌شود.

مطابق شکل 4 سرعت موثر اندازه‌گیری شده ($V_e$) در زاویه یاو صفر (زاویه‌ای که راستای جهت جریان بر محور سنسور عمود است، $\alpha = 0$) بیشترین مقدار را دارد. مشاهده می‌شود با افزایش زاویه یاو از وضعیت صفر درجه به زوایای بیشتر، مقدار سرعت موثر کاهش می‌یابد. در بازه زاویه $\pm 10°$، منحنی سرعت موثر بی‌بعد شده ($V_e/V_{en}$)، تقریبا منطبق با منحنی قانون کسینوسی است، اما با افزایش بیشتر زاویه جریان، انحراف از قانون کسینوسی افزایش می‌یابد. انحراف از قانون کسینوسی، اختلاف انتقال حرارت کل از سنسور و انتقال حرارت بواسطه مولفه عمودی سرعت جریان بر سنسور می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت، این انحراف بدلیل تاثیر مولفه مماسی سرعت جریان هوا بر سنسور در انتقال حرارت از آن اتفاق می‌افتد. در سرعت‌های پایین انحراف از قانون کسینوسی بیشتر است، لذا مولفه مماسی سرعت جریان در این سرعت‌ها تاثیر بیشتری بر انتقال حرارت از سنسور داشته است.

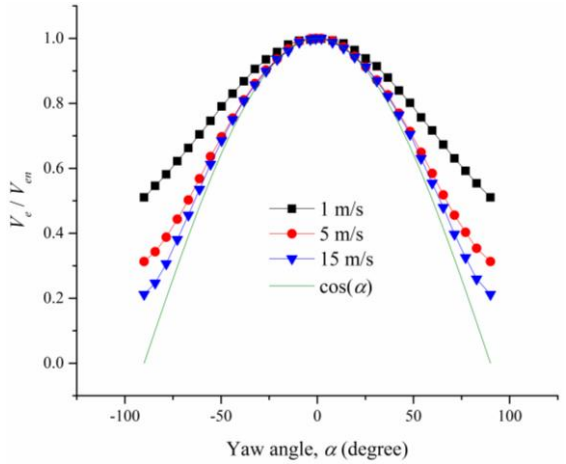


**Fig. 4** Variation of effective velocity at different Yaw angles and velocities

**شکل 4** تغییر سرعت موثر در زوایای یاو و سرعت‌های مختلف

میزان خطای ناشی از اختلاف سرعت موثر اندازه‌گیری شده و سرعت بدست آمده از قانون کسینوسی توسط رابطه (9) محاسبه می‌شود.

$$\text{خطا} = \frac{\left|V_e - V_{e_n}\cos\alpha\right|}{V_e} \times 100 \tag{9}$$

درصد خطای ناشی از رابطه (9) در چند سرعت متفاوت در شکل 5 نشان داده شده است. با توجه به شکل 5، در صورتی که اختلاف سرعت موثر اندازه‌گیری شده از قانون کسینوسی تا خطای 1% قابل قبول باشد، محدوده قابلیت کاربرد قانون کسینوسی با توجه به سرعت‌های مختلف جریان بصورت شکل 6 خواهد بود. مطابق شکل 6، با افزایش سرعت، محدوده کاربرد قانون کسینوسی افزایش می‌یابد. در سرعت‌های پایین (1 تا 5 m/s)، بازه زاویه یاو برای قابلیت کاربرد قانون کسینوسی در محدوده $\pm 10°$ تا $\pm 25°$ قرار دارد. با افزایش سرعت جریان، این بازه تا حدود $\pm 35°$ افزایش یافته است و بعد از آن تقریبا ثابت می‌ماند. بنابراین از آنجا که قانون کسینوسی وابسته به سرعت جریان است، در صورت استفاده از آن در اندازه‌گیری جریان دوبعدی باید به محدوده تغییرات جهت و سرعت جریان توجه نمود.

تاثیر تغییر دمای سنسور بر محدوده قابلیت کاربرد قانون کسینوسی در شکل 7 نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت

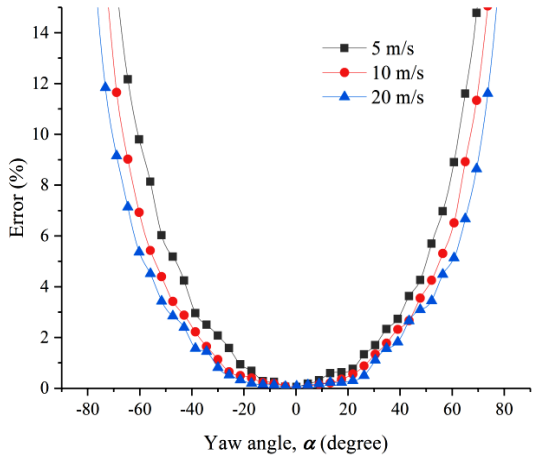


**Fig. 5** Difference between the calculated velocity and velocity obtained from the cosine law

**شکل 5** اختلاف سرعت موثر اندازه‌گیری شده و سرعت بدست آمده از قانون کسینوسی

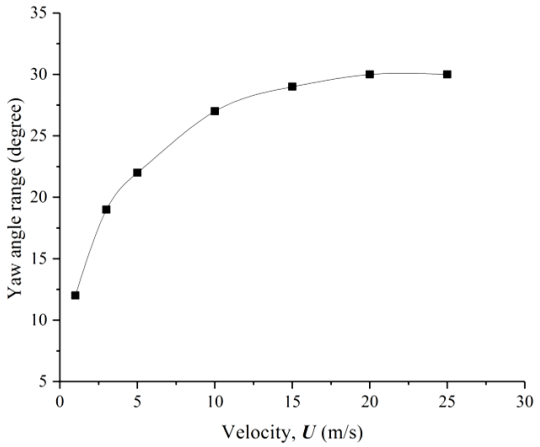


**Fig 6**. Range of applicability of cosine law for 1% error at different velocities

**شکل 6** محدوده زاویه‌ای کاربرد قانون کسینوسی برای خطای 1% در سرعت‌های مختلف

فراگرمایی سنسور از 0.2 به 0.4، محدوده قابلیت کاربرد قانون کسینوسی کمی افزایش یافته و بعد از آن تقریبا روند ثابتی را طی می‌کند. اما مشخص است با افزایش سرعت، محدوده کاربرد این قانون افزایش و در بازه $\pm 30°$ ثابت می‌ماند. از آنجا که اساس قانون کسینوسی بر مبنای انتقال حرارت از یک سیم با طول بلند و توزیع دمایی یکنواخت می‌باشد، با توجه به وجود توزیع دمایی غیر یکنواخت در سنسور در نسبت‌های فراگرمایی متفاوت، محدوده کاربرد قانون کسینوسی با تغییر دمای سنسور تقریبا ثابت می‌ماند.

تاثیر نسبت $l/d$ سنسور بر محدوده کاربرد قانون کسینوسی در شکل 8 نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش نسبت $l/d$ سنسور، بازه زاویه‌ای کاربرد قانون کسینوسی افزایش می‌یابد. بعلاوه در این حالت، افزایش سرعت نیز درافزایش این محدوده تاثیرگذار است.

شکل 8 نشان می‌دهد با افزایش نسبت $l/d$ سنسور از 150 تا 250 محدوده کاربرد قانون کسینوسی کمی افزایش یافته است، اما از نسبت 250 تا 500 این محدوده تغییر چندانی نداشته و در نسبت‌های هندسی بالاتر از 500، افزایش قابل توجهی در محدوده کاربرد این قانون مشاهده می‌شود. با افزایش طول سنسور، توزیع دمایی در آن یکنواخت تر خواهد شد و حدودا

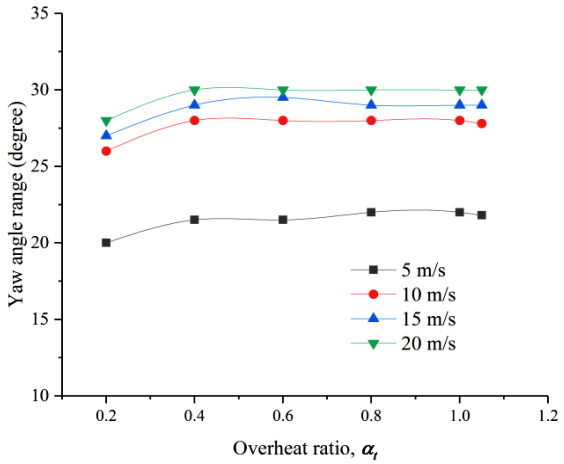


**Fig. 7** Range of applicability of cosine law for 1% error at different overheat ratios

**شکل 7** محدوده کاربرد قانون کسینوسی برای خطای 1% در نسبت‌های فراگرمایی متفاوت

بعد از نسبت هندسی 500، توزیع دمایی در سنسور کاملا یکنواخت شده و نقش مولفه مماسی سرعت در انتقال حرارت از سنسور بسیار ناچیز خواهد شد. لذا محدوده قابلیت کاربرد قانون کسینوسی، با افزایش نسبت $l/d$ سنسور افزایش یافته و در نسبت‌های هندسی بیشتر از 500 این قانون حاکم است.

### 3-2- بررسی تاثیر عوامل مختلف بر ضریب حساسیت $k$

تاثیر مولفه مماسی بر انتقال حرارت از سنسور، توسط ضریب حساسیت $k$ در رابطه (6) معرفی شده است [18]. بطور کلی، این ضریب میزان انتقال حرارت از سنسور توسط مولفه مماسی سرعت جریان را نشان می‌دهد و متناسب با انحراف از قانون کسینوسی است.

شکل‌های 9 و 10 تغییر ضریب حساسیت در سرعت‌ها و زوایای مختلف جریان را نشان می‌دهند. مطابق شکل 9، با افزایش زاویه یاو و سرعت جریان، مقدار $k$ سیر نزولی دارد. در سرعت 10 m/s، در بازه زاویه یاو $\pm 20°$ تا $\pm 90°$، مقدار $k$ از حدود 0.3 به 0.15 کاهش یافته است. به نظر میرسد، با افزایش زاویه جریان مقدار پارامتر $\sin^2 \alpha$ در رابطه (6) بیشتر می‌شود، لذا تاثیر انتقال حرارت بواسطه مولفه مماس بر سنسور توسط این پارامتر افزایش یافته و بتدریج از مقدار $k$ کاسته می‌شود. در شکل 10 تغییر ضریب حساسیت $k$ در سرعت‌های مختلف و سه زاویه یاو 40، 50 و 60° نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت از 5 تا 20 m/s، مقدار $k$ از حدود 0.22 تا 0.36 متغیر می‌باشد. در سرعت‌های پایین (1 تا 8 m/s) مقدار $k$ با شیب بیشتری کاهش یافته و با افزایش زاویه یاو همچنان روند نزولی دارد. لذا برای اندازه‌گیری سرعت‌های پایین (1 تا 8 m/s)، به علت تاثیر بیشتر مولفه مماسی سرعت بر انتقال حرارت از سنسور، بهتر است از رابطه (5) استفاده نشود. هرچند مقدار تغییر ضریب $k$ در زوایای یاو بیشتر، کمتر است، اما طبق نتایج می‌توان گفت، مقدار ضریب حساسیت $k$، به شدت وابسته به تغییر شرایط جریان است. بنابراین، اتخاذ یک مقدار ثابت برای این ضریب در رابطه (6)، کیفیت اندازه‌گیری جریان دوبعدی را کاهش خواهد داد.

مقدار ضریب حساسیت $k$ با توجه به سرعت جریان 10 m/s و نسبت‌های فراگرمایی متفاوت در سه موقعیت قرارگیری سنسور در شکل 11 نشان داده شده است. مطابق این شکل، مقدار $k$ با تغییر نسبت فراگرمایی در موقعیت یکسان قرارگیری سنسور، تغییر قابل توجهی نشان نمی‌دهد. برای مثال با افزایش زاویه جریان از 30 به 50°، مقدار آن از حدود 0.28 تا حدود

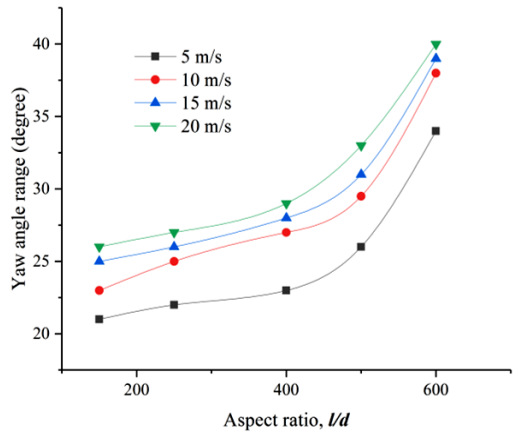


**Fig. 8** Cosine law applicable range for 1% error at different probe aspect ratios ($l/d$)

**شکل 8** محدوده قابلیت کاربرد قانون کسینوسی برای خطای 1% در نسبت‌های $l/d$ مختلف سنسور

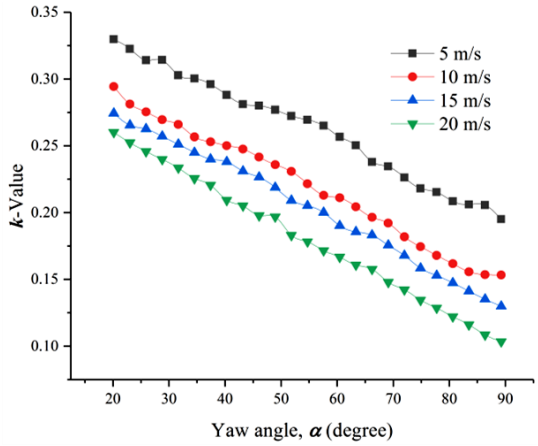


**Fig. 9** Variation of sensitivity coefficient at different velocities and Yaw angles

**شکل 9** تغییر ضریب حساسیت $k$ در زاویای یاو و سرعت‌های مختلف

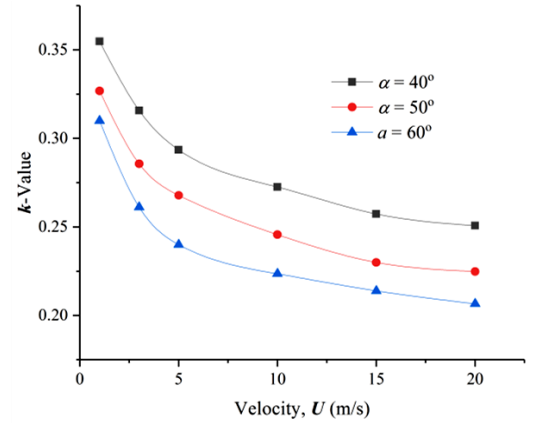


**Fig. 10** Variation of sensitivity coefficient at different velocities and three Yaw angles

**شکل 10** تغییر ضریب حساسیت $k$ در سرعت‌های مختلف و سه زاویه یاو

0.23 متغیر می‌باشد. این موضوع بیانگر عدم تاثیر تغییر دمای میانی سنسور و شکل توزیع دمایی آن بر مقدار ضریب حساسیت $k$ است.

شکل 12 مقادیر مختلف ضریب حساسیت $k$ در سرعت 10 m/s و نسبتهای مختلف $l/d$ را در سه موقعیت قرارگیری سنسور نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش نسبت $l/d$ از مقدار $k$ کاسته می‌شود. در بازه نسبت $l/d$، 250 تا 500 مقدار $k$ روند نسبتا ثابتی را دارد و از نسبت 500 به بعد مقدار آن با شدت بیشتری نزول کرده تا جاییکه در نسبت هندسی 700 مقدار $k$ به صفر نزدیک شده است. واضح است با افزایش نسبت هندسی از 500 به بعد توضیح دمایی سنسور یکنواخت تر می‌شود و تاثیر مولفه مماسی سرعت در انتقال حرارت از سنسور به شدت کاهش میابد. همچنین مشخص است با افزایش زاویه جریان، مقدار $k$ کاهش می‌یابد. بنحوی که مقدار آن در نسبت $l/d$ برابر 250 از حدود 0.28 در $\alpha = 40°$ به نزدیک 0.21 در $\alpha = 60°$ تقلیل می‌یابد.

## 4- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، تاثیر عوامل مختلفی نظیر هندسه پراب (نسبت $l/d$ سنسور)، شرایط جریان (سرعت و زاویه) و شرایط عملکردی پراب (دمای سنسور) بر بازه کاربرد قانون کسینوسی (رابطه (5)) و مقدار ضریب حساسیت $k$ در رابطه (6)، بصورت تجربی بررسی شده است. نتایج این تحقیق به شرح

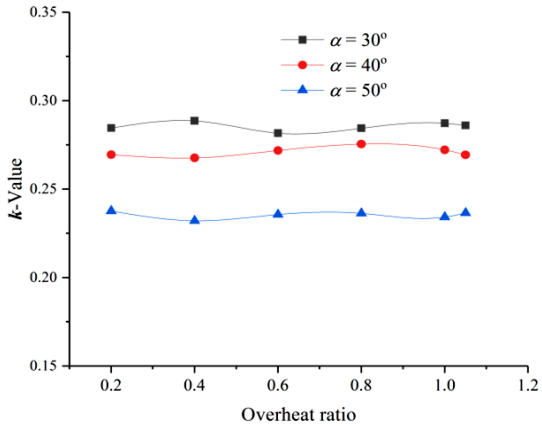


**Fig. 11** Variation of sensitivity coefficient at different overheat ratios, and three Yaw angles at $U$= 10 m/s

**شکل 11** تغییر ضریب حساسیت $k$ در نسبت‌های گرمایی مختلف سنسور و سه زاویه یاو در سرعت 10 m/s

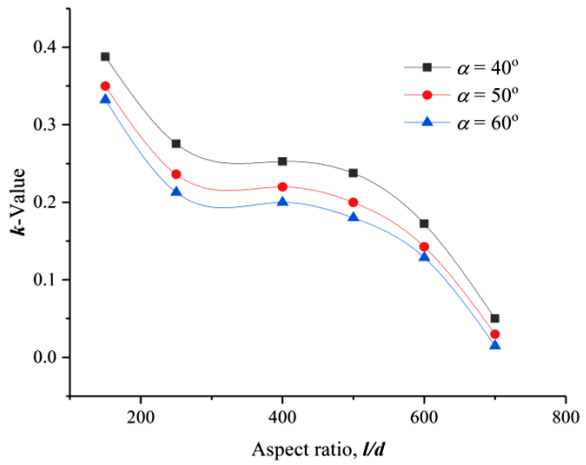


**Fig. 12** Variation of sensitivity coefficient at different aspect ratios, and three Yaw angles at $U$= 10 m/s

**شکل 12** تغییر ضریب حساسیت $k$ در نسبت‌های هندسی مختلف پراب و سه زاویه یاو در سرعت 10 m/s

زیر می‌باشد:

- محدوده زاویه‌ای جریان که در آن می‌توان از قانون کسینوسی استفاده کرد، به سرعت جریان وابسته است. در صورتیکه خطای اندازه‌گیری تا 1% قابل قبول باشد، این محدوده با افزایش سرعت جریان تا 25 m/s، به حدود $\pm 30°$ رسیده و بعد از آن روند ثابتی را نشان می‌دهد. در سرعت‌های پایین (از 1 تا 5 m/s)، این بازه از $\pm 10°$ تا $\pm 22°$ متفاوت است. بنابراین استفاده از قانون کسینوسی برای اندازه‌گیری جریان دوبعدی با سرعت‌های بالا و زوایای کمتر از $\pm 30°$، با خطای کمتر از 1% همراه خواهد بود.
- محدوده کاربرد قانون کسینوسی به نسبت فراگرمایی (دمای سنسور) وابسته نیست.
- با افزایش نسبت هندسی سنسور ($l/d$)، محدوده زاویه‌ای استفاده از قانون کسینوسی افزایش می‌یابد. این محدوده در نسبت‌های هندسی کمتر از 400 افزایش کمی داشته و بعد از آن بصورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. بنابراین در نسبت‌های هندسی بالاتر از 600، استفاده از قانون کسینوسی برای اندازه‌گیری دوبعدی جریان از دقت خوبی برخوردار است.

- مقدار ضریب حساسیت $k$ کاملا به شرایط جریان وابسته است. افزایش زاویه جریان منجر به کاهش خطی این ضریب شده و با افزایش سرعت نیز مقدار آن کاهش می‌یابد، بنحوی که در سرعت‌های پایین این کاهش با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد. بنابراین استفاده از یک مقدار ثابت برای $k$ در رابطه (6)، دقت اندازه‌گیری را کاهش می‌دهد.
- ضریب حساسیت $k$ مستقل از نسبت فراگرمایی یا دمای سنسور است.
- مقدار $k$ با افزایش نسبت $l/d$ کاهش می‌یابد. در نسبت هندسی 700 مقدار $k$ به کمتر از 0.05 می‌رسد. این بدان مفهوم است که در نسبت‌های هندسی بالاتر از 700، استفاده از قانون کسینوسی برای اندازه‌گیری جریان دوبعدی با درصد خطای قابل قبول همراه خواهد بود.

## 5- فهرست علایم

| | |
|---|---|
| $C$ | ضریب ثابت |
| $d$ | قطر سنسور (m) |
| $E$ | ولتاژ خروجی جریان‌سنج (V) |
| $k$ | ضریب حساسیت (بی بعد) |
| $l$ | طول سنسور (mm) |
| $R$ | مقاومت (Ohm) |
| U | سرعت جریان ($ms^{-1}$) |
| $\lvert\vec{U}\rvert$ | اندازه بردار سرعت (بی بعد) |
| $V_e$ | سرعت خنک کننده موثر ($ms^{-1}$) |
| $V_{en}$ | سرعت خنک کننده موثر در وضعیت $\alpha = 0$ ($ms^{-1}$) |
| $k$ | ضریب حساسیت (بی بعد) |
| $T$ | دما (°C) |

**علایم یونانی**

| | |
|---|---|
| $\alpha$ | زاویه یاو یا جهت جریان (°) |
| $\alpha_t$ | نسبت فراگرمایی سنسور (بی بعد) |

**زیرنویس‌ها**

| | |
|---|---|
| $a$ | هوای محیط |
| $e$ | موثر |
| $en$ | موثر عمودی |
| $n$ | عمودی |
| $w$ | سنسور |

## 6- مراجع

[1] M. A. Ardekani, *Hot-Wire Anemometry*, pp. 104-121, Tehran, Khajeh Nasir Toosi University, 2007. (in Persian فارسی)
[2] C. G. Lomas, *Fundamental of Hot Wire Anemometry*, pp. 22-38, Cambridge, Cambrige Universitu Press, 2011.
[3] A. Dijik, F. T. M. Nieuwstadt, The calibration of (multi-) hot-wire probs. 2. Velocity- calibration, *Experiment in Fluids*, Vol. 36, No. 3, pp. 550-564, 2004.
[4] L. Prandtl, *On Boundary Layers in three-Dimensional Flow*, Rep. and Transactions No. 64, Volkenrode, British Ministry of Aircraft Production, 1946.
[5] J. O. Hinze, *Turbulence: An Introduction to Its Mechanism and Theory*, pp. 234-246, New York: Mcgraw-Hill, 1959.
[6] G. B. Schubauer, P. S. Klebanoff, *Contributions on the Mechanics of Boundary-Layer Transition*, NACA Technical Report, No. 1289, 1956.
[7] S. Corrsin, *Turbulence: Experimental Methods Encyclopedia of Physics*, pp. 524-590, Berlin, Springer Berlin Heidelberg, 1963.
[8] F. H. Champagne, C. A. Sleicher, O. H. Wehrmann, Turbulence measurements with inclined hot-wires Part 1. heat transfer experiments with Inclined hot-wire, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 28, No. 1, pp. 153-75, 1967.
[9] M. Samet, S. Einav, Directional sensitivity of unplated normal-wire probes, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 56, No. 12, pp. 2299-2305, 1985.
[10] Y. T. Chew, S. M. Ha, The directional Sensore sensivities of crossed and triple hot-wire probes, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 21, No. 6, pp. 613-620, 1988.
[11] H. H. Bruun, C Tropea, The calibration of inclined hot-wire probes, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 18, pp. 405-13, 1985.
[12] A. A. Abdel-Rahman, On the yaw angle characteristics of hot-wire anemometers, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 6, No. 4, pp. 271-78, 1995.
[13] J. P. Moro, P. Vukoslaveevic, V. Blet, A method to calibrate a hot-wire X-probe for applications in low-speed, variable temperature flow, *Measurement Science and Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 1054-1062, 2003.
[14] O. M. Bakken, P. Krogstad, A velosity dependent effective angle method for calibration of X-probes at low velocities, *Experiment in Fluids*, Vol. 32, pp. 146-152, 2004.
[15] K. M. Argüelles Díazz, Jesús Manuel Fernández Oro, Mónica Galdo Vega, E. Blanco Marigorta, Effects of prong-wire interferences in dual hot-wire probes on the measurements of unsteady flows and turbulence in low-speed axial fans, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Vol. 91, No. 1, pp. 1-11, 2016.
[16] L. di Mare, T. O. Jelly, I. J. Day, Angular response of hot wire probes, *Measurement Science and Technology*, Vol. 28, No. 3, pp. 1-12, 2017.
[17] M. A. Ardekani, F. Farhani, Experimental study on response of hot wire and cylindrical hot film anemometers operating under varying fluid temperatures', *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 20, No. 4-5, pp. 174-79, 2009.
[18] S. M. Henbest, M. B. Jones, J. H. Watmuff, A technique for rapid calibration of crossed-hot-wires, *20th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Perth, Australia, 2016.