



# Experimental Investigation on Negative Values of Yaw Sensitivity Coefficient for Hot Wire Anemometer Sensor in Two-dimensional Flow Measurement

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Farsad S.<sup>1</sup> MSc,  
Ardekani M.A.<sup>1</sup> PhD,  
Farhani F.\*<sup>1</sup> PhD

### How to cite this article

Farsad S, Ardekani M.A, Farhani F. Experimental Investigation on Negative Values of Yaw Sensitivity Coefficient for Hot Wire Anemometer Sensor in Two-dimensional Flow Measurement. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(5):1175-1182.

## ABSTRACT

In two-dimensional measurements using hot wire anemometer, the sensitivity of the sensor to change the flow direction (sensitivity of direction or angular response of sensor) is of particular importance. Sensitivity of direction of sensor, relation between flow velocity vector and heat transfer from the hot wire sensor is determined, using the Yaw sensitivity function and its coefficient. In some cases, negative values of Yaw sensitivity coefficient  $k^2$  are encountered, for which no specific reason has been presented. In this paper, reason of negative values of  $k^2$  for un-plated sensors of hot wire anemometer in two-dimensional measurements have been investigated experimentally. For this purpose, flow velocity field between the prongs of a model of a normal probe (SN) at different velocities and Yaw angles have been studied. Results show that the probe's prongs produce flow disturbances, which cause a reduction in flow velocity and the deviation (rotation) of the flow adjacent to the prongs and the sensor. At different Yaw angles, the maximum reduction in flow velocity amounts to 3% and the deviation of flow direction has a maximum of 6.3°. It is supposed that this phenomenon affects the amount of heat transfer from the sensor and the effective velocity obtained by the hot wire anemometer, which eventually produces the reported negative  $k^2$  values.

**Keywords** Hot Wire Anemometer; Two-Dimensional Measurement; Yaw Sensitivity Coefficient; Negative Values; SN Probe Model

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Center, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran

### \*Correspondence

Address: Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Ehsani Rad Street, Enqelab Street, Parsa Square, Ahmad Abad Mostofi Road, Azadegan Highway, Tehran, Iran. Postal code: 3313193685  
Phone: +98 (21) 56276341  
Fax: +98 (21) 56276345  
f.farhani@irost.ir

### Article History

Received: June 12, 2018  
Accepted: December 17, 2018  
ePublished: May 01, 2019

## CITATION LINKS

[1] An introduction to turbulence and its measurement: Thermodynamics and fluid mechanics series [2] Fundamental of hot wire anemometry [3] Experimental study on response of hot wire and cylindrical hot film anemometers operating under varying fluid temperatures [4] Hot wire calibration using vortex shedding [5] A velocity dependent effective angle method for calibration of X-probes at low velocities [6] Binormal cooling errors in crossed hot-wire measurements [7] A technique for rapid calibration of crossed-hot-wires [8] Effect of mounting systems on heat transfer from inclined cylinders in cross-flow [9] The calibration of inclined hot-wire probes [10] Aerodynamic disturbances of hot-wire probes and directional sensitivity [11] Calibration and analysis of X hot-wire probe signals [12] On the error sensitivity of calibration procedures for normal hot-wire probes [13] Directional sensitivity of unplated normal-wire probes [14] Examination of the flow around a hot-wire probe using particle image velocimetry [15] Angular response of hot wire probes [16] Effects of prong-wire interferences in dual hot-wire probes on the measurements of unsteady flows and turbulence in low-speed axial fans [17] Experimental study of the flow field disturbance in the vicinity of single sensor hot-wire anemometer [18] Experimental investigation on parameters affecting the directional sensitivity of hot wire anemometer

## بررسی تجربی مقادیر منفی ضریب حساسیت یا سنسور جریان سنج سیم داغ در اندازه‌گیری جریان دو بُعدی

سعید فرساد MSC

پژوهشکده مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

محمدعلی اردکانی PhD

پژوهشکده مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

فواد فرحانی PhD\*

پژوهشکده مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

## چکیده

در اندازه‌گیری جریان دو بُعدی با جریان سنج سیم داغ، حساسیت سنسور به تغییر جهت جریان (حساسیت جهت یا پاسخ زاویه‌ای سنسور) از اهمیت خاصی برخوردار است. حساسیت جهت سنسور، رابطه بین بردار سرعت جریان و انتقال حرارت از سنسور است که در اندازه‌گیری دو بُعدی توسط تابع و ضریب حساسیت یا تعیین می‌شود. در برخی موارد، مقادیر ضریب حساسیت یا  $K^2$  منفی بوده که دلایل مشخصی برای آن ارائه نشده است. در این مقاله دلایل پیدایش مقادیر منفی ضریب حساسیت یا  $K^2$  سنسورهای بدون روکش جریان‌سنج سیم داغ در اندازه‌گیری دو بُعدی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور، میدان سرعت جریان بین پایه‌های یک مدل پراب عمودی (SN) در سرعت‌ها و زوایای مختلف جریان بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند پایه‌های پراب در جریان اختلال‌هایی ایجاد می‌کنند که باعث کاهش سرعت و انحراف (چرخش) جریان در مجاورت پایه‌ها و سنسور می‌شود. در زوایای مختلف جریان (یا) مقدار کاهش سرعت جریان تا ۳٪ و مقدار انحراف زاویه یا تا ۶/۳ درجه متفاوت است. به نظر می‌رسد این پدیده بر میزان انتقال حرارت از سنسور و سرعت موثر به دست آمده از جریان‌سنج تاثیرگذار است و در نهایت منجر به ایجاد مقادیر منفی  $K^2$  می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** جریان‌سنج سیم داغ، اندازه‌گیری جریان دو بُعدی، ضریب حساسیت یا، مقادیر منفی، مدل پراب عمودی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۶

\* نویسنده مسئول: f.farhani@irost.ir

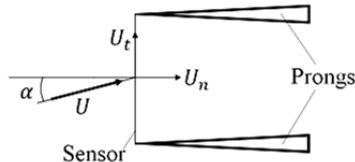
## ۱- مقدمه

اندازه‌گیری جریان هوا نقش موثری در تحقیقات سیالاتی دارد. با اندازه‌گیری، شناخت و ارزیابی کمیت‌های مختلف جریان هوا می‌توان سیستم‌های سیالاتی مطلوب‌تر و بهینه‌تری ایجاد کرد. در موارد مختلفی رژیم جریان هوا به صورت مغشوش است و روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری آن وجود دارد. در این میان، جریان‌سنج سیم داغ ابزاری مناسب و کاربردی برای اندازه‌گیری جریان مغشوش محسوب می‌شود [1, 2].

اساس عملکرد جریان‌سنج سیم داغ، انتقال حرارت جابه‌جایی از یک سیم نازک (سنسور) به جریان سیال است. در اندازه‌گیری جریان دو بُعدی به وسیله جریان‌سنج سیم داغ، جهت جریان مشخص نیست. بنابراین، در این حالت، ولتاژ خروجی جریان‌سنج ( $E$ )، علاوه بر سرعت جریان ( $U$ ) که به دو مولفه مماسی ( $U_t$ ) و عمودی ( $U_n$ ) تبدیل می‌شود (شکل ۱)، به جهت جریان (زاویه بین بردار سرعت جریان و راستای عمود بر سنسور، زاویه یا  $\alpha$ ) نیز وابسته است [3].

تاکنون روابط متعددی به منظور ایجاد ارتباط بین ولتاژ خروجی جریان‌سنج ( $E$ ) و سرعت جریان هوا ( $U$ ) ارائه شده است، اما در

میان آنها، قانون کسینوسی (معادله ۵) و رابطه جورجگسن (معادله ۶) بیشتر شناخته شده هستند [4]. قانون کسینوسی، انتقال حرارت از سنسور را تنها به مولفه عمودی بردار سرعت جریان  $U_n$  نسبت می‌دهد. محققان مختلف، انحراف از قانون کسینوسی را گزارش کرده‌اند [5, 6]. اکثر آنها این انحراف را مرتبط با تاثیر مولفه مماسی سرعت جریان  $U_t$  در انتقال حرارت از سنسور می‌دانند [7]. میزان تاثیر این مولفه بر انتقال حرارت از سنسور، با مقدار ضریب حساسیت یا  $k^2$  در معادله ۶ نشان داده می‌شود [7].



شکل ۱ زاویه یا  $\alpha$  برای یک پراب عمودی SN؛  $U$  سرعت جریان و  $U_t, U_n$  به ترتیب مولفه‌های عمودی و مماسی جریان بر سنسور

در برخی از نتایج محققان، مقادیر منفی ضریب حساسیت  $k^2$  گزارش شده است. هر چند این موضوع از لحاظ تئوری قابل قبول نیست، اما همواره دلایل متعددی برای آن ارائه شده است. برمه‌ورست [8] به صورت تجربی تاثیر شرایط هندسی پراب از جمله ابعاد روکش سنسور را بر مقدار  $k^2$  بررسی کرد و نشان داد، مقدار  $k^2$  با افزایش طول سنسور و فاصله بین پایه‌ها (در سنسورهای روکش‌دار) کاهش می‌یابد. براساس این نتایج، مقادیر منفی  $k^2$  به دلیل کاهش اثرات آیرودینامیک پایه‌ها و مقادیر مثبت آن ناشی از اثر پایه‌ها و چرخش موضعی جریان در محل سنسور است. در نتایج برون و تروپیا [9]، پراکندگی و مقادیر منفی  $k^2$  مرتبط با شرایط هندسی پراب گزارش شد. هر چند در تحقیق آنها چند نوع پراب با شرایط هندسی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت، اما دلیل قانع‌کننده‌ای مبنی بر مقادیر منفی  $k^2$  ارائه نشد. براساس نتایج آدریان و همکاران [10]، تفاوت در ساختار هندسی پراب نظیر جوش سنسور و موقعیت نصب آن روی پایه‌ها و همچنین ابعاد ناهمگون نوک پایه‌ها، دلایل ایجاد لایه مرزی روی سنسور و پراکندگی در مقادیر ضریب حساسیت یا  $k^2$  است. برون و همکاران [11] در تحقیقی دیگر، تنها از مقادیر مثبت ضریب حساسیت استفاده کردند و مقادیر منفی  $k^2$  را به اختلاف جزئی در زاویه نصب سنسور روی پایه‌ها نسبت دادند. در نتایج بورستی و تالاملی [12]، پراکندگی مقادیر  $k$  مرتبط با خطا در زاویه و مقادیر منفی  $k^2$  به عدم توان مولفه مماسی سرعت جریان هوا در انتقال حرارت از سنسور نسبت داده شد.

در نتایج ثامت و ویناوا [13]، مقدار  $k^2$  وابسته به هندسه پراب و اثرات آیرودینامیک آن بر سنسور معرفی شد و دلیل پیدایش مقادیر منفی  $k^2$ ، ناشی از نادیده گرفتن مولفه‌های اغتشاشی عمود بر صفحه اندازه‌گیری جریان در اندازه‌گیری دو بُعدی گزارش شده است. گراهام و همکاران [14] با استفاده از سیستم سرعت‌سنجی با تصویربرداری از ذرات (PIV)، جریان اطراف مدل پراب مایل (SY) را بررسی کرده و نشان دادند، مقادیر منفی  $k^2$  به دلیل چرخش جریان در مجاورت سنسور ایجاد می‌شود.

پراکندگی مقدار  $k$  در نتایج دی‌ماری و همکاران [15]، به رفتار جریان بالادست و میدان سرعت در مجاورت سنسور نسبت داده شده و اثرات آیرودینامیک پراب با ارائه یک تابع حساسیت یا جدید در اندازه‌گیری دو بُعدی اعمال شده است. تحقیق آرگولس‌دیز و

متعددی برای آن ارایه شده، اما معروف‌ترین آنها عبارت از روابط زیر هستند<sup>[4]</sup>:

$$f(\alpha) = \cos \alpha \quad (5)$$

$$f(\alpha) = \cos^2 \alpha + k^2 \sin^2 \alpha \quad (6)$$

### ۳- تجهیزات و روش انجام آزمایش

تونل باد مورد استفاده در این تحقیق، از نوع مدار بسته است که با استفاده از کنترل سرعت دوران فن می‌توان جریان هوا با سرعت ۱ تا ۲۵ متر بر ثانیه و شدت اغتشاش ۰/۲٪ را ایجاد کرد. این تونل باد دارای اتاق آزمون به طول ۲ متر و سطح مقطع ۶۰×۶۰ سانتی‌متر مربع بوده که نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل آن ۱۰ است. جریان‌سنج مورد استفاده در این تحقیق از نوع CTA و ساخت شرکت فرانسجش صبا بوده و تمامی آزمایش‌ها در نسبت فراگرمایی ۰/۸ انجام گرفته است. مشخصات پراب‌های مورد تحقیق در جدول ۱ ارایه شده است. به‌منظور ایجاد زاویه جریان ( $\alpha$ ) از یک مکانیزم انتقال‌دهنده و دوران پراب استفاده می‌شود.

جدول ۱) مشخصات پراب‌های مورد استفاده در تحقیق

نسبت هندسی ( $l/d$ )	قطر سنسور ( $d$ : میکرومتر)	طول سنسور ( $l$ : میلی‌متر)	نوع سنسور	جنس سنسور	نوع پراب
۱۵۰	۵	۰/۷۵	بدون روکش	تنگستن	SN
۲۵۰	۵	۱/۲۵	بدون روکش	تنگستن	SN
۴۰۰	۵	۲	بدون روکش	تنگستن	SN
۵۰۰	۵	۲/۵	بدون روکش	تنگستن	SN
۶۰۰	۵	۳	بدون روکش	تنگستن	SN

این مکانیزم توانایی جابه‌جایی پراب با دقت ۰/۵ میلی‌متر و دوران آن با دقت ۰/۷۲° را دارد. انتقال داده‌های اندازه‌گیری شده توسط جریان‌سنج به رایانه، توسط کارت DAQ مدل NI PCI-6010 انجام می‌گیرد. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت جریان تونل باد از لوله پیتوت و فشارسنج دیفرانسیلی با دقت ۰/۱٪ استفاده شده است. در بخش اول آزمایش‌ها به‌منظور تعیین مقادیر ضریب  $k^2$ ، ابتدا هر یک از پراب‌های جدول ۱ در جریان تونل باد کالیبره شده و مطابق با بازه تغییرات جدول ۲، توسط مکانیزم دوران در زوایای مختلف یاو قرار گرفته است. در هر یک از زوایای یاو، مقدار قانون کسینوسی (معادله ۵) و سرعت موثر به‌دست‌آمده از معادله ۴، اندازه‌گیری و توسط معادله ۷ مقادیر  $k^2$  محاسبه می‌شود.

$$k^2 = \left( \left( \frac{U_e}{U_{e_{max}}} \right)^2 - \cos^2 \alpha \right) / \sin^2 \alpha \quad (7)$$

$U_{e_{max}}$  در معادله ۷، مقدار بیشینه سرعت موثر است که در وضعیت  $\alpha=0$  سنسور ایجاد می‌شود و در این حالت  $|U|$  است.

جدول ۲) بازه تغییر پارامترهای مختلف در آزمایش‌های بخش اول

پارامتر متغیر	بازه تغییرات	تغییر پارامتر در هر مرحله
زاویه یاو ( $\alpha$ : درجه)	$-90 < \alpha < 90$	با فواصل ۱/۴۴ درجه
سرعت جریان (متر بر ثانیه)	$5 < U < 20$	با فواصل ۵ متر بر ثانیه

از آنجایی که موقعیت حرکت و قرارگیری سنسور بر مقدار ضریب حساسیت  $k$  تأثیرگذار بوده<sup>[18]</sup>، برای تضمین کمترین تغییرات مکانی، بازوی اتصال نشان‌داده‌شده در شکل ۲، ساخته و استفاده شده است.

همکاران<sup>[16]</sup> نشان می‌دهد، اثرات تداخلی پراب در جریان مجاور سنسور، منجر به ایجاد اغتشاش و خطا در اندازه‌گیری مولفه‌های بردار سرعت و ضریب حساسیت  $k$  می‌شود. سائریک<sup>[17]</sup> با استفاده از PIV، میدان اغتشاش جریان در نزدیکی سنسور پراب یک‌بُعدی را مطالعه کرد و نشان داد که بررسی جریان اطراف سنسور بسیار پیچیده و مشکل است، چرا که به‌شدت به مقدار زاویه یاو و سرعت جریان وابسته است. هر چند در تحقیق وی دلایلی مبنی بر مقادیر منفی  $k^2$  ارایه نشد، اما نتایج وی بیانگر تأثیر قابل ملاحظه میدان سرعت جریان اطراف سنسور در اندازه‌گیری دو بُعدی است. اخیراً فرساد و همکاران<sup>[18]</sup> با بررسی تأثیر شرایط جریان (سرعت و زاویه) و شرایط هندسی پراب بر مقدار  $k$  نشان دادند که ضریب حساسیت یاو کاملاً به شرایط ذکر شده وابسته است.

در نتایج محققان، دلایل مختلفی برای مقادیر منفی  $k^2$  ارایه شده است. در پاره‌ای از موارد، علت این پراکندگی و مقادیر منفی  $k^2$ ، بدون اثبات، به عدم قطعیت و تفسیر داده‌های آزمایش نسبت داده شده است<sup>[8]</sup>. لذا به نظر می‌رسد برای درک بهتر موضوع به تحقیقات بیشتری در این زمینه نیاز است. از این رو در تحقیق حاضر، دلایل ایجاد مقادیر منفی  $k^2$  با استفاده از آزمایش‌های تونل باد در دو بخش بررسی شده است. در بخش اول، در هر یک از زوایای یاو، مقدار قانون کسینوسی و سرعت موثر به‌دست‌آمده از جریان‌سنج، توسط چند پراب عمودی SN با نسبت‌های هندسی  $l/d$  مختلف، محاسبه و مقادیر  $k^2$  بررسی می‌شود. در بخش دوم، به‌منظور بررسی دلایل پیدایش مقادیر منفی  $k^2$  مشاهده‌شده در بخش اول، توزیع سرعت و زاویه جریان هوا (چرخش جریان) بین پایه‌های یک مدل پراب عمودی (مقیاس ۱۰:۱)، در محل قرارگیری سنسور مورد تحقیق قرار گرفته است.

### ۲- معادلات حاکم

با استفاده از فرآیند کالیبراسیون می‌توان رابطه‌ای مناسب بین ولتاژ خروجی جریان‌سنج ( $E$ ) و سرعت جریان هوا ( $U$ ) به‌صورت تابع  $E = f(U)$  تعریف نمود<sup>[3]</sup>. در اندازه‌گیری جریان دو بُعدی، این تابع توسط رابطه ۱ بیان می‌شود<sup>[4]</sup>:

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

در رابطه ۱،  $|\vec{U}|$  اندازه بردار سرعت و  $\alpha$  زاویه یاو است (شکل ۱). با توجه به شکل ۱، هنگامی که راستای جریان با سنسور تحت زاویه یاو قرار می‌گیرد، می‌توان با استفاده از مفهوم سرعت موثر ( $U_e$ )، روابط ۲ و ۳ را تعریف نمود<sup>[4]</sup>:

$$E = f(U_e) \quad (2)$$

$$U_e = |\vec{U}| f(\alpha) \quad (3)$$

به‌طور کلی سرعت موثر ( $U_e$ )، متناسب با انتقال حرارت جابه‌جایی از سنسور و تابعی از سرعت لحظه‌ای و زاویه جریان است. در واقع، این پارامتر بیانگر سرعتی است که اگر در راستای عمود بر محور سنسور ( $\alpha=0$ ) قرار گیرد، دقیقاً ولتاژی متناظر با ولتاژ سرعت لحظه‌ای جریان ( $E$ ) در همان زاویه یاو ایجاد خواهد کرد. این پارامتر پس از کالیبراسیون و طبق رابطه چندجمله‌ای ۴ محاسبه می‌شود<sup>[3]</sup>.

$$U_e = C_0 + C_1 E + C_2 E^2 + C_3 E^3 + \dots \quad (4)$$

در رابطه ۴، ولتاژ خروجی جریان‌سنج است و پارامترهای  $C_0$ ،  $C_1$ ،  $C_2$  و ... ضرایب ثابتی هستند که با برازش منحنی کالیبراسیون سرعت به دست می‌آیند.

$f(\alpha)$  در رابطه ۳، تابع حساسیت نام دارد و تاکنون روابط

دو مقدار سرعت موثر  $U_{e0}$  و  $U_{e\alpha}$  به دست خواهد آمد.  $U_e$  سرعت موثر به دست آمده در وضعیت  $\alpha=0$  و  $U_{e\alpha}$  مقدار سرعت موثر در وضعیت  $\alpha$  مدل است. لذا با توجه به قانون کسینوسی (معادله ۵) می‌توان نوشت:

$$U_{e0} = U_0 \cos \alpha \quad (۸)$$

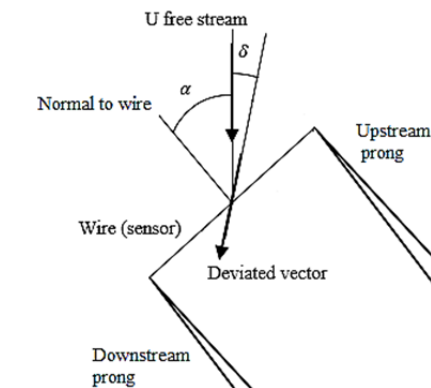
$$U_{e\alpha} = U_0 \cos \alpha_e \quad (۹)$$

در معادلات ۸ و ۹،  $\alpha_e$  زاویه یاو موثر و  $U_0$  مقدار سرعت جریان بین پایه‌های مدل در وضعیت  $\alpha=0$  است. مطابق با شکل ۴، زاویه یاو موثر، معرف زاویه بین جریان مجاور سنسور و راستای عمود بر سنسور است که در شرایط واقعی، به واسطه اثر پایه‌ها بر جریان اطراف سنسور می‌تواند اندکی با زاویه یاو اسمی ( $\alpha$ ) متفاوت باشد. با در نظر گرفتن معادلات ۸ و ۹ و با توجه به اینکه  $U_{e0}$  در  $\alpha=0$  به دست آمده است، می‌توان نوشت:

$$\alpha_e = \cos^{-1} \frac{U_{e\alpha}}{U_{e0}} \quad (۱۰)$$

به این ترتیب با استفاده از معادله ۱۰ می‌توان مقدار زاویه موثر  $\alpha_e$  را در هر یک از مراحل آزمایش محاسبه کرد و میزان انحراف  $\delta$  آن را در مجاورت سنسور با توجه به معادله ۱۱ به دست آورد.

$$\alpha_e = \alpha + \delta \quad (۱۱)$$



شکل ۴ زاویه  $\alpha$  و مقدار انحراف زاویه جریان  $\delta$  در مجاورت سنسور

#### ۴- بحث و نتایج

در بخش اول این قسمت، مقدار سرعت موثر برای چند پراب عمودی SN با نسبت‌های هندسی  $l/d$  مختلف، در هر یک از زوایای یاو، محاسبه و نتایج مقادیر  $k^2$  بررسی می‌شود. سپس در بخش دوم، با هدف بررسی دلایل پیدایش مقادیر منفی  $k^2$  مشاهده شده در بخش اول، میدان سرعت جریان در محل قرارگیری سنسور (بین پایه‌های مدل)، مورد بحث قرار گرفته است.

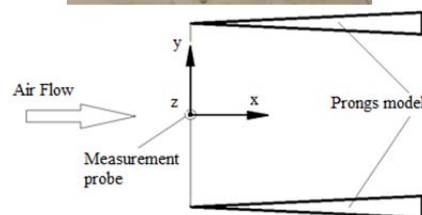
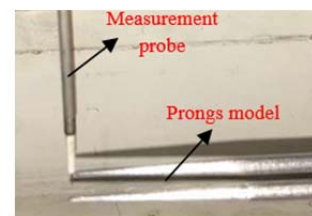
#### ۴-۱- بررسی سرعت موثر و ضریب حساسیت یاو پراب‌های مختلف

نمودار ۱، مقادیر سرعت موثر بی‌بعد شده ( $U_e/U_{emax}$ ) در هر یک از زوایای یاو را برای پراب‌های با نسبت هندسی مختلف  $l/d$  نشان می‌دهد. در اینجا برای مقایسه بهتر نتایج، مقادیر سرعت موثر بی‌بعد شده در کنار مقادیر قانون کسینوسی ترسیم شده است. همان‌طور که مطرح شد، مقدار سرعت موثر، متناسب با مقدار انتقال حرارت از سنسور است. مشاهده می‌شود با افزایش زاویه یاو، مقدار انتقال حرارت از سنسور کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد، افزایش زاویه یاو، سطح مقطع موثر انتقال حرارت از سنسور را کاهش می‌دهد و باعث روند کاهشی مقدار سرعت موثر می‌شود. در برخی موارد، مقادیر سرعت موثر کمتر از قانون کسینوسی واقع شده است. احتمالاً در این گونه موارد، مولفه مماسی سرعت جریان، تأثیر

در بخش دوم، به منظور بررسی دلایل ایجاد مقادیر منفی  $k^2$ ، با استفاده از پراب عمودی SN، توزیع سرعت و زاویه جریان اطراف مدل پایه‌های پراب عمودی (در مجاورت سنسور) که با مشخصات هندسی جدول ۳ ساخته شده، اندازه‌گیری شده است (شکل ۳). برای تعیین توزیع سرعت مابین پایه‌های مدل، آزمایش‌ها مطابق با شرایط آرایه شده در جدول ۴ انجام گرفته است. به این منظور، پراب اندازه‌گیری مطابق با شکل ۳ به صورت عمودی در جریان تونل باد قرار گرفته و با استفاده از مکانیزم انتقال‌دهنده، در امتداد محور  $Y$  حرکت کرده و در فواصل ۰/۵ میلی‌متر، سرعت جریان اندازه‌گیری شده است.



شکل ۲ بازوی اتصال پراب به محور مکانیزم انتقال - دوران



شکل ۳ مختصات نصب مدل پایه‌ها و حرکت پراب اندازه‌گیری

جدول ۳) مشخصات هندسی مدل پایه‌های پراب عمودی (SN)

عنوان	ابعاد مدل پایه‌ها
ارتفاع پایه‌ها (میلی‌متر)	۶۰
قطر پایین پایه‌ها (میلی‌متر)	۶
قطر نوک پایه‌ها (میلی‌متر)	۱

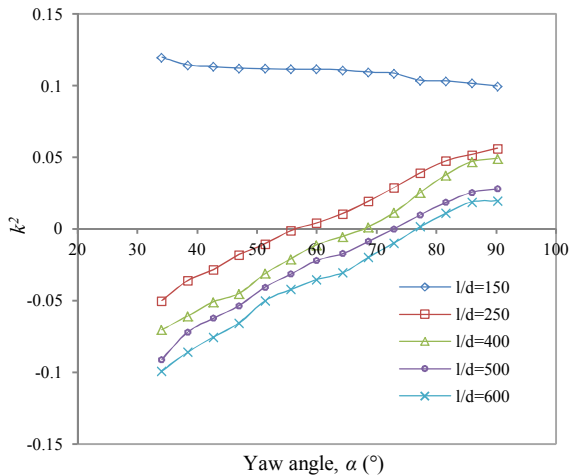
جدول ۴) بازه تغییر پارامترهای مختلف در آزمایش‌های مربوط به مدل پایه‌های پراب (بخش دوم)

پارامتر متغیر	بازه تغییرات	مقدار پارامتر در هر مرحله
زاویه یاو ( $\alpha$ ؛ درجه)	$0 < \alpha < 75$	۷۵، ۶۰، ۴۵، ۳۰، ۱۵
سرعت جریان (متر بر ثانیه)	$20 < U < 90$	۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵

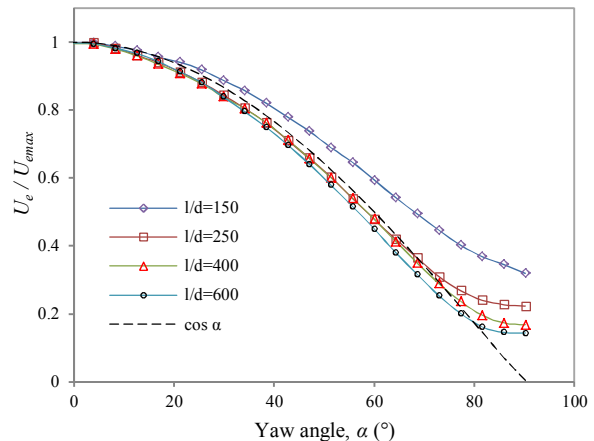
برای بررسی زاویه یا میزان انحراف جهت جریان در مجاورت سنسور، ابتدا مدل پایه‌های پراب مطابق با شرایط جدول ۴ تنظیم می‌شود. سپس در هر یک از شرایط آزمایش، سنسور پراب اندازه‌گیری مطابق با شکل ۳ در نقطه میانی بین پایه‌های مدل (محور  $Y$ ) مستقر می‌شود و توسط مکانیزم دوران به ترتیب در زاویه  $\alpha=0$  و سپس در زاویه  $\alpha$  مدل (امتداد محور  $Y$ ) قرار می‌گیرد و در هر وضعیت سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین در هر مرحله از این آزمایش،

استفاده از مقادیر  $k^2$  در روابط اندازه‌گیری جریان دو بُعدی رایج نیست، اما می‌توان با تعیین مقادیر  $k^2$  متناظر با هر زاویه یاو و استفاده از روش جست‌وجو در جدول این امکان را فراهم کرد.

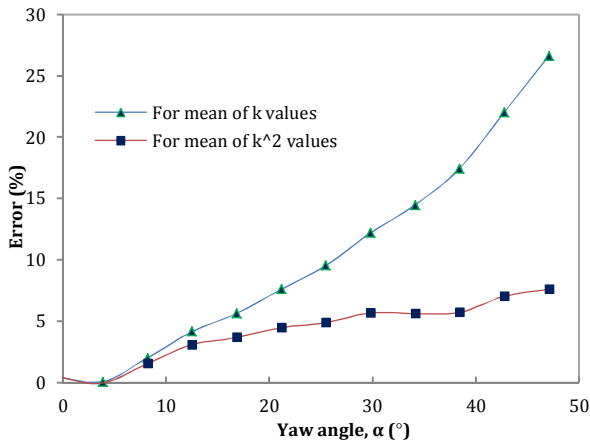
کمتری در انتقال حرارت از سنسور دارد تا جایی که مجموع انتقال حرارت از سنسور حتی از انتقال حرارت از طریق مولفه عمودی سرعت جریان کمتر می‌شود.



نمودار ۲) مقادیر  $k^2$  در زوایای مختلف یاو برای پراب‌های با نسبت هندسی گوناگون؛  $U = 10$  (متر بر ثانیه)



نمودار ۱) تغییر سرعت موثر بی‌بعد شده در زوایای مختلف یاو برای پراب‌های با نسبت هندسی  $l/d$  متفاوت و  $U = 10$  (متر بر ثانیه)



نمودار ۳) درصد خطای دوی نحوه استفاده از مقادیر ضریب حساسیت یاو در معادله ۶؛  $U = 10$  (متر بر ثانیه)،  $l/d = 250$

#### ۴-۲- بررسی میدان سرعت اطراف مدل پایه‌های پراب در محل قرارگیری سنسور

در نتایج قسمت قبل مشخص شد، اگر مجموع انتقال حرارت از سنسور در زوایای یاو  $\alpha \neq 0$ ، کمتر از انتقال حرارت از طریق مولفه عمودی سرعت جریان (قانون کسینوسی) باشد، مقدار  $k^2$  منفی خواهد شد. به نظر می‌رسد یکی از دلایل پیدایش مقادیر منفی  $k^2$ ، کاهش سرعت جریان در مجاورت سنسور است. نمودار ۴، توزیع سرعت جریان بی‌بعد شده  $u/U_0$  بین پایه‌های مدل پراب (در محل قرارگیری سنسور) را در زوایای مختلف یاو نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن مختصات نصب مدل پایه‌ها و حرکت پراب اندازه‌گیری (شکل ۳)، به نظر می‌رسد جریان هوا در نزدیکی پایه پایین دست جریان، دچار نقطه رکود می‌شود و سرعت جریان با توجه به زاویه یاو به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در این وضعیت پایه پایین دست جریان، همانند دیواره‌ای در مقابل جریان قرار می‌گیرد و منجر به کاهش سرعت جریان می‌شود. با افزایش زاویه یاو، سطح بیشتری از پایه در مقابل جریان قرار می‌گیرد و باعث کاهش بیشتر سرعت در زوایای یاو بالاتر می‌شود. میزان این کاهش از ۱۵٪ در

در نمودار ۲ مقدار  $k^2$  (از معادله ۶) در زوایای مختلف یاو برای پراب‌های با نسبت هندسی  $l/d$  گوناگون ترسیم شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت هندسی پراب، مقدار  $k^2$  کاهش می‌یابد و مقادیر منفی نیز برای آن وجود دارد. به نظر می‌رسد با کاهش نسبت  $l/d$ ، جریان اطراف سنسور بیشتر تحت تاثیر تداخلات آیرودینامیک پایه‌ها قرار می‌گیرد و انتقال حرارت از سنسور افزایش می‌یابد. همچنین رشد افزاینده  $k^2$  در زوایای یاو بیشتر برای نسبت‌های هندسی  $l/d$  بزرگ‌تر از ۱۵۰، نشان‌دهنده گسترش اثرات آیرودینامیک در این زوایا است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تاثیر اختلال‌های آیرودینامیک پایه‌ها بر انتقال حرارت از سنسور، یک پارامتر مهم و تاثیرگذار در تعیین مقدار ضریب حساسیت یاو است و باید با جزئیات بیشتری بررسی شود.

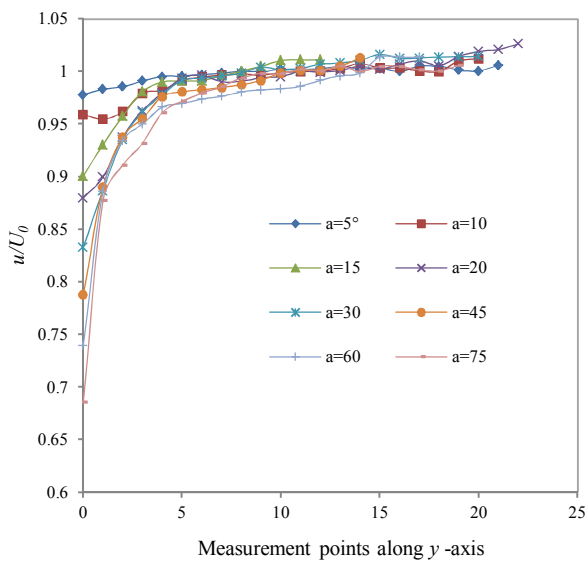
در روابط اندازه‌گیری جریان دو بُعدی، عموماً از میانگین مقادیر  $k$  استفاده می‌شود [16]. حال آن که برخی از محققان [12، 14] پیشنهاد کرده‌اند که به جای به‌کارگیری از  $k$  میانگین، از میانگین مقادیر  $k^2$  در این روابط استفاده شود. برای روشن شدن این موضوع، با استفاده از معادله ۱۲، درصد خطای ایجاد شده محاسبه شد.

$$Error = \frac{f(\alpha) - U_e / U_{emax}}{f(\alpha)} \times 100 \quad (12)$$

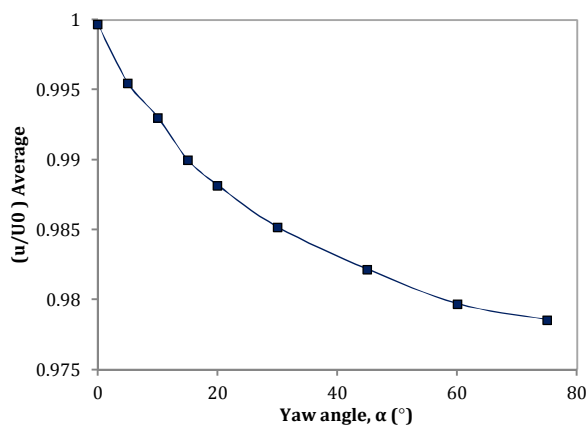
در اندازه‌گیری سرعت موثر، در صورت استفاده از میانگین مقادیر  $k$  یا میانگین مقادیر  $k^2$  در معادله ۶، در نمودار ۳ نشان داده شده است. نتایج نمودار ۳ نشان می‌دهد، بیشترین درصد خطا مربوط به حالتی است که از میانگین مقادیر  $k$  در روابط اندازه‌گیری جریان دو بُعدی (معادله ۶) استفاده شود و در صورت استفاده از میانگین مقادیر  $k^2$ ، کیفیت اندازه‌گیری افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد، در برخی موارد به‌علت ایجاد لایه مرزی روی سنسور، مولفه مماسی سرعت جریان، سهم ناچیزی در انتقال حرارت از سنسور دارد و نمی‌تواند انتقال حرارت لازم را به انتقال حرارت به‌واسطه مولفه عمودی سرعت جریان از سنسور اضافه کند که این امر می‌تواند باعث ایجاد مقادیر منفی  $k^2$  شود، لذا نمی‌توان از مقادیر منفی در تعیین ضریب  $k^2$  صرف نظر کرد. همچنین محتمل است، استفاده از مقادیر  $k^2$  متناظر با هر زاویه یاو در معادله ۶ می‌تواند کمترین خطا را در اندازه‌گیری جریان دو بُعدی ایجاد کند. البته این گونه



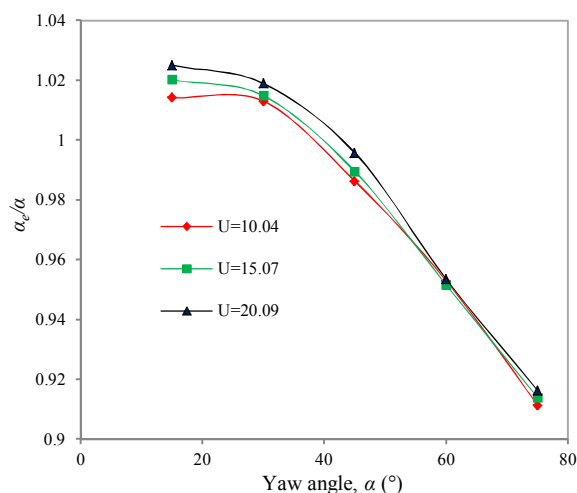
مدل است، لذا اختلاف در داده‌های این آزمایش با آزمایش پراب واقعی منطقی به نظر می‌رسد.



نمودار ۴) سرعت بی‌بعد شده جریان بین پایه‌های مدل پراب (محل قرارگیری سنسور) در زوایای مختلف یاو:  $U = 10$  (متر بر ثانیه)



نمودار ۵) میانگین برآیند سرعت بی‌بعد شده جریان مجاور سنسور در زوایای مختلف یاو مدل:  $U = 10$  (متر بر ثانیه)



نمودار ۶) نسبت زاویه موثر یاو  $\alpha_e$  به زاویه یاو  $\alpha$  در سرعت‌ها و زوایای مختلف جریان در آزمایش مدل پایه‌های پراب

$\alpha = 5$  تا  $3\%$  در  $\alpha = 75$  متفاوت است. از سوی دیگر، سرعت جریان در نزدیکی پایه بالادست جریان تغییر چندانی ندارد. به طور کلی، این موضوع نشان می‌دهد، پایه‌های پراب اختلال‌هایی در جریان ایجاد می‌کنند که می‌تواند بر انتقال حرارت از سنسور تاثیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. بنابراین به نظر می‌رسد کاهش سرعت در نزدیکی پایه پایین دست جریان در محل قرارگیری سنسور منجر به کاهش انتقال حرارت از سنسور شده است که این پدیده می‌تواند یکی از دلایل ایجاد  $k^2$  منفی در نتایج به دست آمده باشد.

نمودار ۵، میانگین برآیند سرعت بی‌بعد شده جریان  $u/U_0$  در محل قرارگیری سنسور بین پایه‌های مدل پراب را در زوایای مختلف یاو نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه یاو، برآیند سرعت بین پایه‌ها با شیب  $0.4\%$  کاهش می‌یابد. این نمودار معرف کاهش انتقال حرارت از سنسور به سبب کاهش سرعت جریان است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هرچه جریان با زاویه یاو بیشتری به سنسور برخورد کند، انتقال حرارت کمتری از سنسور اتفاق می‌افتد و مقدار سرعت موثر نیز کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر تاثیر قابل ملاحظه زاویه برخورد جریان به سنسور بر انتقال حرارت از آن است. لذا انحراف زاویه جریان (افزایش زاویه  $\delta$ ، شکل ۴) در مجاورت سنسور می‌تواند یکی دیگر از دلایل پیدایش مقادیر منفی  $k^2$  باشد.

با توجه به مختصات ارائه شده در شکل ۳ و ۴، نسبت زاویه موثر به زاویه یاو  $(\alpha_e/\alpha)$  در سرعت‌ها و زوایای مختلف جریان در نمودار ۶ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، به دلیل اختلال‌های آیرودینامیک پایه‌ها، جهت جریان در مجاورت سنسور به اندازه  $\delta$  انحراف (افزایش) می‌یابد. روند این انحراف به نحوی است که تا زاویه یاو  $30$  درجه، نسبت زوایای  $\alpha_e/\alpha$  تقریباً ثابت و بعد از آن روند کاهشی نشان می‌دهد. در زوایای یاو  $15$  تا  $45$  درجه، مقدار زاویه واقعی جریان  $\alpha_e$  از زاویه یاو  $\alpha$  بیشتر است. از زاویه یاو  $15$  تا  $30$  درجه، مقدار انحراف زاویه جریان  $\delta$ ، تقریباً روند ثابتی داشته و مقدار آن حدود  $0.4$  درجه است. از زاویه یاو  $30$  درجه به بعد، اختلاف زوایا زیاد می‌شود، به نحوی که تا زاویه یاو  $75$  درجه، مقدار  $\delta$  به حدود  $6/3$  درجه رسیده است. محتمل است، وجود سنسور در جریان باعث انحراف بیشتر جریان در زوایای یاو بیشتر می‌شود. از سوی دیگر، به نظر می‌رسد تغییر سرعت جریان در مقادیر بالای  $10$  متر بر ثانیه، در اختلاف زاویه یاو و زاویه موثر جریان تاثیر چندانی ندارد. این نتایج نشان می‌دهد تا زاویه یاو حدود  $50$  درجه، مقدار زاویه واقعی جریان  $\alpha_e$  از زاویه یاو  $\alpha$  بیشتر می‌شود، در نتیجه، در این بازه، انتقال حرارت از سنسور کاهش بیشتری دارد. این امر می‌تواند باعث افت بیشتر سرعت موثر و در نهایت منجر به ایجاد  $k^2$  منفی شود. به منظور بررسی نتایج قبلی، با استفاده از معادله ۱۳، مقدار سرعت موثر محاسباتی بی‌بعد شده  $(\bar{U}_e/U_0)$  و قانون کسینوسی در زوایای یاو مختلف در نمودار ۷ نشان داده شده است.

$$\bar{U}_e = U_0 \cos \alpha_e \quad (13)$$

مطابق با نمودار ۷، تا حدود زاویه یاو  $45$  درجه، مقدار اختلاف سرعت موثر محاسباتی و قانون کسینوسی، منفی و بعد از آن مثبت شده است. همان طور که مطرح شد، هر گاه اختلاف این دو پارامتر مثبت باشد، مقدار  $k^2$  مثبت و در غیر این صورت منفی خواهد بود. در آزمایش پراب واقعی با نسبت هندسی  $250$  مشاهده شد که تا حدود زاویه یاو  $55$  درجه، مقادیر  $k^2$  منفی شده است. با توجه به اینکه نتایج نشان داده شده در نمودار ۷ مربوط به داده‌های آزمایش

سرعت جریان در سرعت‌های بالای ( $U$ ) برابر با ۱۰ متر بر ثانیه، در تغییر مقدار  $\delta$  تاثیر چندانی ندارد. به نظر می‌رسد یکی دیگر از دلایل پیدایش مقادیر منفی  $k^2$ ، به‌ویژه در نسبت‌های هندسی  $l/d$  بزرگ‌تر می‌تواند تشکیل لایه مرزی و اختلال در انتقال حرارت از سنسور باشد که برای اثبات این موضوع به تحقیقات بیشتری نیاز است. در نهایت توصیه می‌شود، در صورت مشاهده مقادیر منفی  $k^2$ ، به‌منظور افزایش کیفیت اندازه‌گیری جریان دو بُعدی، به‌جای میانگین مقادیر  $k$  از میانگین مقادیر  $k^2$ ، در رابطه ۶ استفاده شود.

**تشکر و قدردانی:** آزمایش‌های این پژوهش در مرکز تونل باد سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران انجام گرفته که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

**تاییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. لازم به ذکر است که محتویات علمی این مقاله، حاصل فعالیت‌های علمی- پژوهشی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

**تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

**سهم نویسندگان:** سعید فرساد (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ محمدعلی اردکانی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ فواد فرحانی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۰٪)

**منابع مالی:** موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

#### ۶- پی‌نوشت

##### علام

$C$	ضریب ثابت
$d$	قطر سنسور (میکرومتر)
$E$	ولتاژ خروجی جریان سنج (ولت)
$k$	ضریب حساسیت (بی‌بعد)
$l$	طول سنسور (میلی‌متر)
$U$	سرعت جریان (متر بر ثانیه)
$ \bar{U} $	اندازه بردار سرعت (بی‌بعد)
$U_e$	سرعت موثر (متر بر ثانیه)
$U_{e0}$	سرعت موثر در وضعیت، $\alpha=0$ (متر بر ثانیه)
$U_{e\alpha}$	سرعت موثر در وضعیت، زاویه یاو مدل پایه‌های پراب $\alpha$ (متر بر ثانیه)

##### علام یونانی

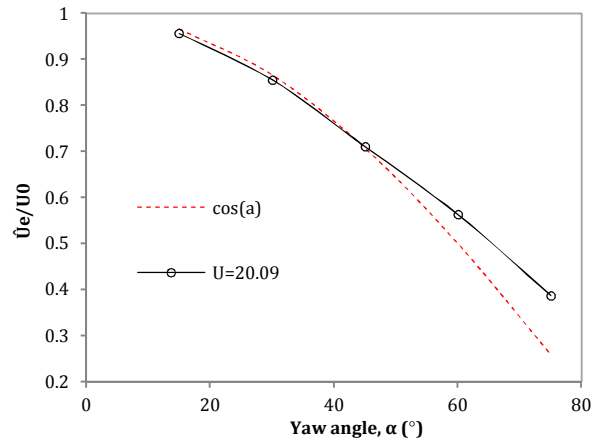
$\alpha$	زاویه بین جریان و راستای عمود بر سنسور یا زاویه یاو اسمی (درجه)
$\alpha_e$	زاویه یاو واقعی (موثر) جریان (درجه)
$\beta$	زاویه بین ساقه پراب و راستای جریان، زاویه پیچ (درجه)
$\delta$	اختلاف زاویه یاو واقعی جریان و زاویه یاو اسمی

##### زیرنویس‌ها

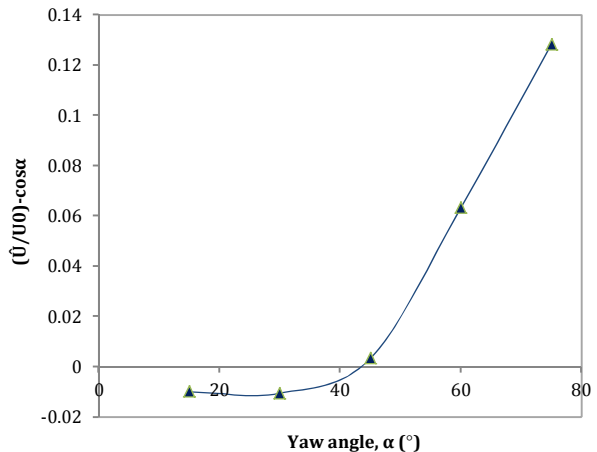
$e$	موثر
$max$	بیشینه مقدار
$n$	عمودی
$t$	مماسی

#### منابع

1- Bradshaw P. An introduction to turbulence and its measurement: Thermodynamics and fluid mechanics series. Woods WA, editor. Amsterdam: Elsevier Science; 2013.



(الف)



(ب)

**نمودار ۷)** تغییر سرعت موثر محاسباتی بی‌بعد شده  $\bar{U}_e/U_0$  و قانون کسینوسی و همچنین اختلاف سرعت موثر بی‌بعد شده و قانون کسینوسی در زوایای مختلف یاو،  $U=20$  (متر بر ثانیه)؛ (الف) تغییر سرعت موثر محاسباتی بی‌بعد شده  $\bar{U}_e/U_0$  و قانون کسینوسی در زوایای مختلف یاو، (ب) اختلاف سرعت موثر بی‌بعد شده و قانون کسینوسی در زوایای مختلف یاو،  $U=20$  (متر بر ثانیه)

#### ۵- نتیجه‌گیری

نتایج بررسی تجربی مقادیر منفی ضریب حساسیت یاو  $k^2$  (معادله ۶) در سنسورهای بدون روکش جریان سنج سیم داغ در اندازه‌گیری جریان دو بُعدی نشان می‌دهد، در صورتی که مقدار سرعت موثر  $U_e$  محاسبه شده از معادله ۴، کمتر از قانون کسینوسی (معادله ۵) باشد، مقدار  $k^2$  منفی خواهد شد. نشان داده شد که با افزایش نسبت هندسی سنسور  $l/d$ ، پایه‌های پراب تداخل کمتری در جریان ایجاد می‌کند و در برخی موارد مقدار  $k^2$  منفی می‌شود. به‌منظور تعیین دلایل ایجاد این مقادیر منفی، میدان سرعت اطراف مدل پایه‌های یک پراب عمودی (با مقیاس ۱:۰۱) بررسی و مشخص شد که جریان هوا در نزدیکی پایه پایین دست جریان، دچار نقطه رکود می‌شود و سرعت جریان با توجه به زاویه یاو  $\alpha$  تا ۳٪ کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد این کاهش سرعت، باعث افت انتقال حرارت از سنسور و منجر به مقادیر منفی  $k^2$  می‌شود. همچنین نشان داده شد، به‌دلیل تداخل آیرودینامیک پایه‌ها، جریان مجاور سنسور کمی منحرف (چرخش) می‌یابد. در زوایای یاو ۱۵ تا ۴۵ درجه، مقدار زاویه واقعی جریان  $\alpha_e$  از زاویه یاو اسمی  $\alpha$  بیشتر شده، به‌نحوی که در زاویه یاو ۷۵ درجه، اختلاف این زوایای  $\delta$  به حدود ۶/۳ درجه رسیده است. این انحراف زاویه جریان می‌تواند باعث کاهش انتقال حرارت از سنسور و در نهایت، منجر به ایجاد  $k^2$  منفی شود. تغییر

- Instruments. 1984;17(1):62-71.
- 11- Bruun HH, Nabhani N, Al-Kayiem HH, Fardad AA, Khan MA, Hogarth E. Calibration and analysis of X hot-wire probe signals. *Measurement Science and Technology*. 1990;1(8):782-785.
- 12- Buresti G, Talamelli A. On the error sensitivity of calibration procedures for normal hot-wire probes. *Measurement Science and Technology*. 1992;3(1):17-26.
- 13- Samet M, Einav S. Directional sensitivity of unplated normal-wire probes. *Review of Scientific Instruments*. 1985;56(12):2299-2305.
- 14- Graham LJM, Soria J, Bremhorst K. Examination of the flow around a hot-wire probe using particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*. 1995;19(6):379-382.
- 15- Di Mare L, Jelly TO, Day IJ. Angular response of hot wire probes. *Measurement Science and Technology*. 2017;28(3):035303.
- 16- Argüelles Díaz KM, Fernández Oro JM, Galdo Vega M, Blanco Marigorta E. Effects of prong-wire interferences in dual hot-wire probes on the measurements of unsteady flows and turbulence in low-speed axial fans. *Measurement*. 2016;91:1-11.
- 17- Sobczyk J. Experimental study of the flow field disturbance in the vicinity of single sensor hot-wire anemometer. *EPJ Web of Conferences*. 2018;180:02094.
- 18- Farsad S, Ardekani MA, Farhani F. Experimental investigation on parameters affecting the directional sensitivity of hot wire anemometer. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(4):110-116. [Persian]
- 2- Lomas CG. *Fundamental of hot wire anemometry*. Cambridge: Cambridge University Press; 2011.
- 3- Ardekani MA, Farhani F. Experimental study on response of hot wire and cylindrical hot film anemometers operating under varying fluid temperatures. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2009;20(4-5):174-179.
- 4- Ardekani MA. Hot wire calibration using vortex shedding. *Measurement*. 2009;42(5):722-729.
- 5- Bakken OM, Krogstad PÅ. A velocity dependent effective angle method for calibration of X-probes at low velocities. *Experiments in Fluids*. 2004;37(1):146-152.
- 6- Zhao R, Smits AJ. Binormal cooling errors in crossed hot-wire measurements. *Experiments in Fluids*. 2006;40(2):212-217.
- 7- Henbest SM, Jones MB, Watmuff JH. A technique for rapid calibration of crossed-hot-wires. 20th Australasian Fluid Mechanics Conference, 5-8 December, Australia. Perth: University of Melbourne; 2016.
- 8- Bremhorst K. Effect of mounting systems on heat transfer from inclined cylinders in cross-flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1981;24(2):243-250.
- 9- Bruun HH, Tropea C. The calibration of inclined hot-wire probes. *Journal of Physics E Scientific Instruments*. 1985;18(5):405-413.
- 10- Adrian RJ, Johnson RE, Jones BG, Merati P, Tung AC. Aerodynamic disturbances of hot-wire probes and directional sensitivity. *Journal of Physics E Scientific*