بیست و یکمین کنفرانس بین المللی انجمن هوافضای ایران
ero21-03110278

معرفی یک روش کالیبراسیون پراب سیم داغ سه مولفه

مهدی جعفری نسب[1*]، عبدالعلی حقیری[2]
۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، m.jafarinasab2020@gmail.com
۲- عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ahaghiri@ihu.ac.ir
مهدی جعفری نسب*

چکیده

در این مقاله، یک روش کالیبراسیون سیم داغ سه مولفه در محدوده‌ی سرعت‌های مادون صوت، پیشنهاد شده است. این روش ارزیابی، مبتنی بر مفهوم سرعت موثر خنک کنندگی است. مولفه‌های سرعت لحظه‌ای از سرعت خنک کنندگی اندازه‌گیری شده توسط سه حسگر محاسبه می‌شوند. سرعت خنک کننده موثر، از طریق معادله‌ی کینگ محاسبه شده و دقت آن مورد بررسی قرار گرفته. روند کالیبراسیون در دو بخش کالیبراسیون اندازه سرعت و کالیبراسیون راستای سرعت، به طور جداگانه صورت گرفته است. بنابراین، این روش ارزیابی مبتنی بر زوایای جهت‌گیری خاص سنسور نیست و در صورتی که حسگر، جهت‌گیری نامشخص داشته باشد نیز می‌توان از این روش بهره برد. اثر اغتشاشات ناشی از پایه‌ها و همچنین اثر تداخلی حسگرها در زاویه حمله‌های بالا، در محاسبات لحاظ شده و محدوده عملکرد مناسب پراب مشخص شده است. پراب مورد مطالعه، از نوع مینیاتوری است، به گونه ای که قطر و طول حسگرها به ترتیب برابر ۰.۰۵ و ۱ میلی متر است.

واژه‌های کلیدی: *سیم داغ – سیم داغ سه مولفه – کالیبراسیون – اندازه‌گیری راستای سرعت – اندازه‌گیری اغتشاشات*

۱. مقدمه

۱،۱. سرعت سنج لحظه ای سیم داغ

بادسنج‌های سیم داغ و فیلم داغ، دستگاه‌هایی هستند که برای اندازه‌گیری متغیرهای میدان جریان از قبیل سرعت، دما، شدت آشفتگی و ... استفاده می‌شوند. این حسگرها عناصر فلزی نازکی هستند که توسط جریان الکتریکی (اثر ژول[1]) گرم می‌شوند و توسط جریان هوا (از طریق اثرات مختلف از قبیل تابش، رسانش و جابجایی؛ که اثر جابجایی اجباری معمولاً غالب است.) خنک می‌شوند. از دما (یا مقاومت) به دست آمده توسط حسگر، می‌توان اطلاعات مربوط به جریان را استنتاج کرد.

۱،۲. سرعت سنج سیم داغ سه مولفه

دستگاه سیم داغ به عنوان یکی از ضروری ترین و قابل اعتمادترین تکنیک‌ها برای اندازه گیری سرعت‌های لحظه‌ای با پاسخ فرکانسی بالا در جریان‌های آشفته شناخته شده است. با این حال، در کاربرد آن، باید در انتخاب پراب و پردازش سیگنال مناسب دقت شود. به عنوان مثال، در موقعیت جریان‌های شبه یک بعدی (که مؤلفه سرعت عرضی، بسیار کوچکتر از مؤلفه سرعت طولی‌ست)، مانند لایه‌های مرزی دو بعدی، یک پراب X شکل یا حتی یک سیم داغ تک مولفه می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد میدان جریان آشفته ارائه دهد. درصد زیادی از جریان‌های آشفته، سه بعدی با سطح اغتشاش بالا هستند. در چنین مواردی که زوایای لحظه‌ای جریان بسیار متفاوت است و در نتیجه، جهت جریان مشخص نیست، استفاده از سیم سه گانه توصیه می‌شود. پراب سیم داغ سه گانه می‌تواند مقدار لحظه ای سه مؤلفه سرعت جریان را با دقت قابل قبول و فرکانس بالا ارائه دهد. علی‌رغم اینکه این روش مورد توجه مستمر محققان قرار گرفته است و پراب‌ها، ابزار دقیق و سیستم های جمع آوری داده‌ها به درجه بالایی از پیچیدگی رسیده اند، استفاده از این تکنیک در اندازه گیری جریان سه بعدی آشفته به موفقیت بزرگ مورد انتظار دست نیافته است.

به نظر می‌رسد این امر تا حدی به عمر کوتاه سنسور و هزینه‌های بالای نگهداری آن مرتبط است، اما عمدتاً به دلیل مشکلات مربوط به کالیبراسیون و روش‌های اندازه‌گیری است که به خطاهای ساختاری هندسی و جهت‌گیری بسیار حساس هستند.

۱،۳. پیشینه تحقیق

فعالیت‌های زیادی برای کالیبراسیون پراب‌های سیم داغ انجام شده است. مروری کلی و جامع، از رایج ترین تکنیک‌ها و پیشرفت‌های اخیر توسط برون[2] ارائه شده است[۱]. مطالعات اولیه برای تحلیل خنک‌کاری استوانه‌ها (در اینجا سیم داغ) اولین بار توسط کینگ[3] انجام شد. اگرچه اکثر مقالات اخیر بر اساس مدل یورگنسن[4] [۲] بوده اند (برای مثال به آکریوللیس[5] [۳]، آدریان و همکاران [۴] و لکاکیس[6] و همکاران [۵] مراجعه کنید)؛

[1] Joule Effect
[2] Bruun
[3] King
[4] Jorgenson
[5] Acrivlellis
[6] Lekakis

روش‌ها و روابط ریاضی گوناگونی، به منظور جلوگیری از تکثیر خطای محاسباتی روش‌های عددی، مورد بررسی قرار گرفته است. به طور خاص، آکریوللیس [۳] روشی را برای اندازه گیری سه مولفه سرعت با استفاده از یک کاوشگر با سه حسگر در یک صفحه ارائه کرد. آدریان و همکاران [۴] پاسخ راستای کاوشگر سیم داغ و اثر اختلالات آیرودینامیکی جریان خودالقا شده را مطالعه کردند.

لکاکیس و همکاران [۵] روشی را برای تفسیر سیگنال های سیم داغ سه مولفه با سیم‌های غیر متعامد پیشنهاد کردند. باتلر و واگنر[۷] [۷] روشی را پیشنهاد کردند که مبتنی بر رابطه یورگنسن نیست. بزرگی سرعت همراه با زاویه حمله و زاویه عرضی از سه ولتاژ خروجی با استفاده از یک عبارت درجه دوم به دست آمده از معادله کالیبراسیون قابل محاسبه است. همچنین استلا[۸] [۸] با هدف ارایه یک روش سیستماتیک، تکنیکی برای کالیبراسیون زاویه ای سیم داغ‌های چند سنسوری از نوع متعامد و غیر متعامد معرفی کرده است. او با در نظر گرفتن یک سیستم مختصات منطبق بر پراب و داده‌برداری همزمان توسط هر سه مولفه در زاویه‌هایی مختلف، ولتاژ خروجی سیم‌ها را به طور مستقیم و بدون لحاظ کردن پارامتر زاویه، به مولفه‌های سه‌گانه سرعت مرتبط کرد.

۱،۴. روش‌های کالیبراسیون سیم داغ سه مولفه

گالیر[۹] (۱۹۷۷) نشان داده که تعیین مربعات مولفه‌های سرعت، برای هر ترتیب متعامد از سه حسگر، ممکن است. آکریوللیس (۱۹۸۰) روشی را بر اساس یک پراب سه گانه خاص با آرایش متفاوت سیم‌ها پیشنهاد می‌کند. اگر علائم دو مولفه سرعت مشخص شده باشد، این روش یک راه حل نسبتا دقیق را برای بردار سرعت لحظه ای ارائه می‌دهد. با این حال، تکنیک ارزیابی آکریوللیس مستلزم تطابق دقیق واقعیت با جهت گیری سنسور معرفی شده و فاکتورهای زاویه حمله و زاویه جانبی یکسان برای هر سه سیم است.

۱،۵. روش کالیبراسیون پیشنهادی

این مقاله به بررسی روش کالیبراسیون یک پراب سه مولفه می‌پردازد که سیم های آن یک سیستم مختصات غیرمتعامد را تشکیل می‌دهند. در این روش، سرعت جریان به طور غیرمستقیم از اندازه‌گیری شار انتقال حرارت بین سیال و سیم محاسبه می‌شود. سامانه اندازه‌گیری سرعت شامل یک پراب سه مولفه با حلقه‌های کنترلی جداگانه و غیر وابسته و یک سیستم داده برداری و ذخیره اطلاعات است. سیم داغ مورد مطالعه از نوع دما ثابت (CTA) بوده و در مرکز آیرودینامیک قدر، دانشگاه امام حسین (ع) ساخته شده است.

بنا بر مطالعات انجام شده [۸]، دقت نتایج سیم داغ، تنها به ابزار و تجهیزات مورد استفاده، بستگی ندارد؛ بلکه روش کالیبراسیون نیز تاثیر قابل توجهی در دقت نتایج دارد.

۲. کالیبراسیون

۲،۱. روابط حاکم بر سیم داغ

سرعت سنج سیم داغ براساس میزان انتقال حرارت سیم داغ شده بر سیال عبوری آن عمل می کند. زمانی که جریان از سیم نازک عبور می‌کند، با توجه به مقاومتی که سیم دارد، گرما در آن تولید می‌شود. این گرما با استفاده از رابطه قانون اهم قابل محاسبه است. در قسمت‌های قبل، توضیح داده شد که این گرما باید با میزان انتقال حرارت سیم داغ در اثر عبور جریان آزاد برابر باشد.

بنابراین به صورت کلی می‌توان بیان کرد که اگر سرعت جریان آزاد افزایش یابد، میزان انتقال حرارت جابه‌جایی نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه دمای سیم تغییر می‌کند و پس از مدتی به مقدار ثابتی می‌رسد. میزان انتقال حرارت در شرایط مذکور به سرعت و خواص فیزیکی سیال، اختلاف دما میان سیال و سیم (استوانه) و خواص فیزیکی سیم بستگی دارد. معادله حاکم انتقال حرارت در حالت کلی برای هات وایرها به شکل زیر بیان می‌شود.

$$\frac{dE}{dt} = W - H \qquad (۱)$$

E انرژی حرارتی که در سیم ذخیره می‌شود را بیان می‌کند که با استفاده از رابطه زیر قابل بیان است:

$$E = C_w T \qquad (۲)$$

در این رابطه C_w مقدار ظرفیت حرارتی سیم را نمایش می‌دهد و W میزان توان تولید شده توسط جریان درون سیم را بیان می‌کند که مقدار آن با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$W = I^2 R_w \qquad (۳)$$

I در رابطه بالا جریان الکتریکی را نشان می‌دهد و R_w نیز نشان دهنده مقاومت سیم است که مقدار آن به دمای سیم بستگی دارد. این موضوع با استفاده از رابطه زیر نشان داده شده است:

$$R_w = R_w(T_w) \qquad (۴)$$

T_w دمای سیم در هنگام انجام آزمایش برای محاسبه سرعت جریان سیال را نشان می‌دهد. H نیز در رابطه کلی انتقال حرارت سیم (معادله ۱)، نرخ انتقال حرارت به محیط اطراف را نمایش می‌دهد. این مقدار، به انتقال حرارت جابه‌جایی بین سیم و سیال، انتقال حرارت رسانش بین تکیه‌گاه و انتقال حرارت تشعشع سیم بستگی دارد. روابط انتقال حرارت جابه‌جایی بین سیم و جریان سیال در ادامه شرح داده می‌شود.

---

[7] Butler and Wagner
[8] Stella
[9] Gaulier

۲،۲. تعمیم روابط فوق به سیم داغ

سیم را می توان به عنوان یک استوانه با قطر d و طول l ، با نسبت $d/l \ll 1$ در نظر گرفت، که عمود بر راستای سرعت U قرار گرفته است، که در تمام طول سیم، یکنواخت فرض می‌شود. توان حرارتی مبادله شده توسط همرفت بین سیم در دمای T_w و سیال در دمای T_a را می‌توان از معادله زیر محاسبه کرد:

$$\dot{Q} = hA(T_w - T_a) = \pi l N u_d \lambda (T_w - T_a) \qquad (۵)$$

که در آن، h ضریب فیلم انتقال حرارت، A سطح جانبی سیم، Nu_d عدد ناسلت است که به قطر سیم برمی‌گردد. $Nu = hd/\lambda$ و λ ضریب هدایت حرارتی سیال است. در رابطه (۵) مفروضات زیر وجود دارد:

- سیم، آنقدر نازک است که دمای دیواره برابر با دمای بدنه باشد.
- جریان تراکم ناپذیر است $(M \ll 1)$، در واقع فرض می شود که دمای دیواره آدیاباتیک و دمای استاتیک، T_w، منطبق هستند.

برای یک استوانه نامعین $(l/d \to \infty)$ عدد ناسلت را می توان به عنوان تابع توانی عدد رینولدز (متناسب با قطر استوانه) و عدد پرانتل بیان کرد که توان آن به آرامی یا آشفته بودن جریان بستگی دارد. اگر حرکت آرام باشد $(Re_d < Re_{dcr})$، یا به عبارت دیگر، جریان غیرتراکم پذیر باشد، می‌توان نوشت:

$$Nu_d = 0.42Pr^{0.26} + 0.57Pr^{0.33}Re^{0.5} \qquad (۶)$$

رابطه فوق اغلب برای مایعات کاربرد دارد؛ برای گازها، کالیس[10] و ویلیام[11] (۱۹۵۹) -که بعدا توسط بردبوری و کاسترو[12] (۱۹۷۲) تایید شد- رابطه زیر را معرفی کردند:

$$Nu_d = a_1 + b_1\sqrt{Re}_d \qquad (۷)$$

در عمل، یک استوانه نامحدود از رابطه (۷) با دقت کافی پیروی نمی‌کند؛ توان عدد رینولدز در سرعت های پایین‌تر، ۰.۴۸ و در سرعت های بالاتر، ۰.۵۱ است. برای حسگرهایی با طول محدود مانند حسگرهایی که در سیم داغ استفاده می‌شوند، تغییرات توان، شدیدتر است. بر اساس ارتباط فیزیکی بین عدد ناسلت و سرعت جریان، می‌توان نوشت[۱۲]:

$$Nu_d = a_1 + b_1 Re_d^n \qquad (۸)$$

معادله (۸) به شکل زیر قابل بازنویسی است:

$$\dot{Q} = \pi l \lambda \left(a_1 + b_1\sqrt{Re}_a\right)(T_w - T_a) \qquad (۹)$$

معادله فوق، باز هم قابل ساده سازی ست:

$$\dot{Q} = a + b\sqrt{U}(T_w - T_a) \qquad (۱۰)$$

که در آن a وb دو ثابت هستند که باید توسط کالیبراسیون تعیین شوند که شامل خصوصیات هندسی سیم و پارامترهای سیال است. از آنجایی که پاسخ بادسنج سیم داغ به بسیاری از پارامترهای دینامیک سیال بستگی دارد، این کاوشگر می تواند علاوه بر سرعت برای اندازه گیری دما، هدایت حرارتی، فشار، شار گرما نیز استفاده شود. به همین دلیل، وقتی یک متغیر واحد اندازه‌گیری می‌شود، باید مراقب ثابت ماندن همه متغیرهای دیگر بود؛ به‌ویژه، هنگام اندازه‌گیری سرعت، مهم است که تفاوت دما بین مراحل آزمایش و کالیبراسیون، یا هر تغییری در دمای سیال در طول آزمایش، جبران شود.

۲،۳. استخراج رابطه کینگ

از رابطه (۱) چنین بر می‌آید که در حالت پایدار، توان حرارتی مبادله شده بین سیم داغ و جریان سیال برابر با توان الکتریکی W است که در سیم توسط اثر ژول تلف می شود:

$$W = R_w I^2 = E^2/R_w \qquad (۱۱)$$

که در آن I جریان الکتریکی وE اختلاف پتانسیل در سراسر سیم داغ است. از معادله (۹)، قانون کینگ[13] [۱] معادله (۱۲) به دست می‌آید که سرعتU را به توان چهارم E مرتبط می‌کند[۱۱]:

$$R_w I^2 = \frac{E^2}{R_w} = (a + b\sqrt{U})(T_w + T_a) \qquad (۱۲)$$

معادله (۱۲) رابطه بین متغیرهای جریان و پارامترهای فیزیکی سیم است؛ سرعت جریان، U ، جریان الکتریکی، I ، مقاومت سیم، R_w و دمای جریان و سیم، T_a , T_w. اگر بنا باشد که سرعت جریان تنها به یک متغیر مرتبط باشد (جریان یا مقاومت الکتریکی یا اختلاف پتانسیل) دو گزینه ممکن وجود دارد:

---

[10] Collis
[11] Williams
[12] Bradbury and Costro
[13] King's Law

- ثابت نگه داشتن مقاومت الکتریکی (یا دمای) سیم و اجازه دادن به نوسانات جریان الکتریکی با سرعت بادسنج دمای ثابت (CTA)
- ثابت نگه داشتن جریان الکتریکی: به این ترتیب تغییر در سرعت باعث تغییر دمای سیم و در نتیجه مقاومت الکتریکی آن می شود بادسنج جریان ثابت (CCA)

اکنون با توجه به استفاده از سیم داغ دماثابت ($T_w = cte\ , R_w = cte$)، و همچنین با فرض ثابت بودن دمای محیط در طول مراحل آزمایش ($T_a = cte$)، می‌توان نوشت:

$$T_w - T_a = cte \qquad (۱۳)$$

$$E^2 = A + B\sqrt{U} \qquad (۱۴)$$

معادله فوق شکل عمومی معادله کینگ بوده که البته توسط محققان بعدی گسترش داده شده است. در معادله فوق، E ولتاژ خروجی دستگاه، U سرعت جریان، A و B اعداد ثابت هستند. بدیهی است که با تغییر دمای محیط، فرض مذکور صادق نبوده و درنتیجه باید ضرایب کالیبراسیون بازبینی شوند.

۳. کالیبراسیون اندازه سرعت

روش عمومی محاسبه بردار سرعت، به طور کلی از دو بخش تشکیل می‌شود. در مرحله اول، سرعت خنک کنندگی موثر (V_{eff})، متناظر با انتقال حرارت سیم، بر اساس ولتاژ خروجی سیم‌ها محاسبه می‌شود. در مرحله بعد، مولفه‌های بردار سرعت از سرعت خنک کنندگی موثر محاسبه می‌شود. این روش، ابتدا توسط یورگنسن[14] معرفی شده و تا کنون به عنوان نظریه پایه‌ای محاسبه مولفه‌های بردار سرعت مورد استفاده قرار گرفته است. ولتاژ خروجی سیم داغ، تابعی از سرعت موثر خنک کنندگی است که با توجه به معادله (۱۴) به شکل زیر قابل بیان است:

$${E_i}^2 = A_i + B_i {U_{eff_i}}^n \qquad (۱۵)$$

که U_{eff}، سرعت موثر خنک کنندگی سیم، متناظر با انتقال حرارت سیم است؛ E، ولتاژ خروجی دستگاه، A، B و n، اعداد ثابتی هستند که در کالیبراسیون تعیین می‌شوند؛ اندیس i نیز به شماره سیم‌ها اشاره دارد.

۴. کالیبراسیون راستای سرعت

با قرار دادن یک سیستم مختصات فرضی روی پراب، مطابق شکل ۱، ارتباط سرعت موثر و مولفه‌های سرعت در مختصات محلی، به شکل زیر قابل بیان است[۸]:

$${U_{eff_i}}^2 = F_i(|U|, \varphi_j) \qquad (۱۶)$$

با فرض امکان جداسازی می‌توان نوشت:

$${U_{eff_i}}^2 = |U| * G_i^2(\varphi_j) \qquad (۱۷)$$

تابع $G(\varphi_j)$ بیانگر حساسیت سیم نسبت به راستای سرعت است که مستقل از اندازه سرعت تعریف می‌شود. در حقیقت، در حالت‌هایی که راستای جریان و نرخ انتقال حرارت تغییر می‌کنند ولی اندازه سرعت همچنان ثابت است، تابع $G(\varphi_j)$ به عنوان یک ضریب تصحیح برای اندازه سرعت نیز محسوب می‌شود؛ به عبارتی زمانی که راستای سرعت عمود بر سیم است، $G(\varphi_j) = 1$ خواهد بود. هدف اصلی این روش، تعریف تابع $G(\varphi_j)$ است. با تعریف دستگاه مختصات ثابت بر روی بدنه پراب (و نه روی هر سیم به طور جداگانه)، برای هر سیم می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} G_i^2(\varphi_j) = {} & A_i\varphi_1^2 + B_i\varphi_2^2 + C_i\varphi_3^2 \\ & + D_i\varphi_1\varphi_2 \\ & + E_i\varphi_1\varphi_3 \\ & + F_i\varphi_2\varphi_3 \end{aligned} \qquad (۱۸)$$

اندیس i اشاره به شماره سیم‌ها دارد. با تعریف U، V و W به عنوان مولفه‌های سرعت در این دستگاه مختصات، زوایای کسینوسی به صورت زیر تعریف می‌شوند: بنابراین معادله (۱۸) به صورت زیر قابل بازنویسی است:

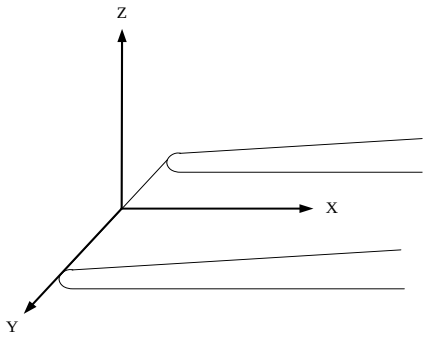
$$\begin{aligned} {U_{eff_i}}^2 = {} & A_iU^2 + B_iV^2 + C_iW^2 \\ & + D_iUV \\ & + E_iUW \\ & + F_iVW \end{aligned} \qquad (۱۹)$$

معادله فوق، برای سیم داغ دو مولفه، شکل ساده‌تری خواهد داشت، زیرا $W = 0$. در سال ۲۰۰۳، پاول مارو[15] و همکاران [۱۳]، برای کالیبراسیون سیم داغ دو مولفه، از این معادله استفاده کرده‌اند. در گام اول، با معلوم بودن مولفه‌های سرعت، ضرایب $A_i, \cdots F_i$ قابل محاسبه هستند. در گام بعد با حل نمودن یک دستگاه معادله ۳ معادله و ۳ مجهول، U، V و W محاسبه می‌شوند.

---

[14] Jorgensen

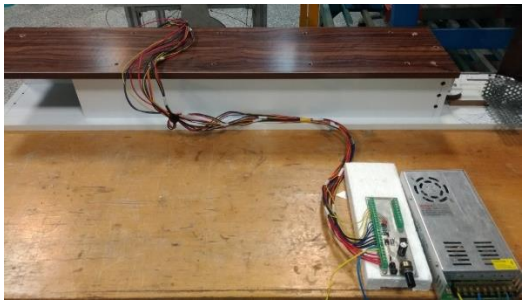
[15] Jean Paul Moro



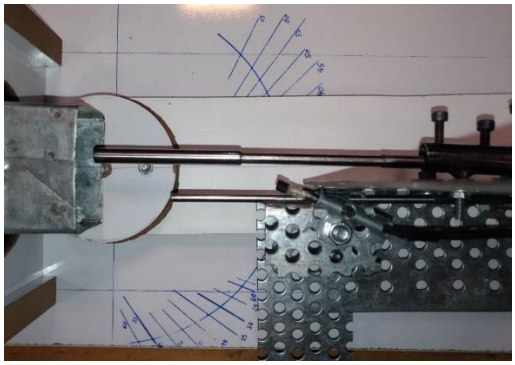
شکل ۱- شماتیک دستگاه مختصات، منطبق بر محور پراب

۵. مجموعه آزمایش

با توجه به لزوم تغییر دادن زاویه پراب حین کالیبراسیون، مکانیزم تغییر زاویه پیچ و یاو، طراحی و ساخته شده است که امکان تغییر زاویه تا ۳۰ درجه در دو صفحه را فراهم می‌کند. همچنین، برای کاهش هزینه و زمان انجام آزمایش‌ها، یک تونل باد مینیاتوری طراحی و ساخته شده است. این تونل، به کمک فن‌های دمنده، جریانی با بیشینه سرعت ۳۳ متر بر ثانیه در مقطع تست با ابعاد ۵*۵ سانتی متر ایجاد می‌کند. کالیبراسیون سیم داغ سه مولفه به کمک این تونل و مکانیزم زاویه دهی انجام شده است.



شکل ۲- نمای خارجی شبیه ساز تونل باد



شکل ۳- مکانیزم زاویه دهی

اجزای مختلف شبیه ساز به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بازه‌ی سرعت ۷ تا ۳۳ متر بر ثانیه تامین شود. واحد قدرت سیستم شامل ۴ فن الکتریکی که بصورت سری و پشت سرهم متصل شده اند استفاده شده است. جهت یکسو کردن جریان پشت فن ها از یک لایه زنبوری با قطر هیدرلیکی ۳.۵ میلیمتر استفاده شده است. همچنین افزایش سرعت از یک نازل همگرا که با انحنا در هر چهار دیواره انجام می‌شود. به منظور ایجاد فضای کافی برای تغییر زاویه پراب و تسهیل آن، این تونل مدار باز انتخاب شده و بعد از مقطع تست، مکانیزم تغییر زاویه نصب شده است که در شکل ۳ قابل مشاهده است. همچنین تصویر سیستم شبیه ساز کالیبراسیون پراب سیم داغ در شکل ۲، به همراه برد کنترل سرعت فن‌ها نشان داده شده است.

۶. نتایج

با استفاده از معادله کینگ، سرعت موثر خنک کاری هر سیم محاسبه شده و با قرارگیری در معادله (۱۹)، مولفه‌های سه گانه سرعت محاسبه می‌شود. ضرایب معادله کینگ برای هر سه سیم،در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱- ضرایب معادله کینگ

	n	B	A
سیم اول	0.5005	0.034738	0.1228
سیم دوم	0.5042	0.035197	0.1477
سیم سوم	0.5035	0.043013	0.1399

ضرایب معادله ۱۹، با استفاده از روش حداقل مربعات محاسبه شده‌اند. بررسی‌ها و آزمایشات انجام شده نشان می‌دهد که ضرایب محاسبه شده از روش‌های متفاوت، اگرچه یکتا نیستند، اما در یک حدود و مرتبه هستند. البته، به علت قابلیت اطمینان بیشتر روش حداقل مربعات، در محاسبات آتی، از ضرایب محاسبه شده از طریق حداقل مربعات استفاده شده است. این ضرایب در جدول ۲ قابل مشاهده هستند.

جدول ۲- ضرایب معادله ۱۹

سیم سوم	سیم دوم	سیم اول	
1.049699	1.058423	1.07154	**A**
1.286261	3.251435	1.986504	**B**
0.781701	0.567781	3.410103	**C**
0.902177	1.159298	-1.68003	**D**
-1.44957	2.069209	-0.52232	**E**
-1.283	2.010646	-1.98505	**F**

۷. جمع بندی

توصیف کامل یک میدان سرعت آشفته در یک نقطه اصولاً نیاز به اندازه‌گیری همزمان سه مولفه سرعت آنی در آن نقطه دارد. از آنجایی که جریان های آشفته همیشه سه بعدی هستند، لازم است که سه سیگنال سرعت، به طور مستقل و همزمان محاسبه شوند. بنابراین بدیهی است که نیاز به استفاده از یک کاوشگر با حداقل سه سنسور دارد. یکی از مشکلات اصلی در ارزیابی سیگنال های بادسنج این است که سیم داغ به علامت جهت جریان حساس نیست. این به این دلیل است که هر بردار سرعتی منجر به آهنگ انتقال گرمای موثر همان بردار معکوس می‌شود.

کالیبراسیون روشی است که برای تعیین ضرایب حساسیت سیم‌ها (مرتبط با تنظیمات الکتریکی آنها) با توجه به متغیرهای جریان مختلف استفاده می‌شود. متغیرها آن دسته از مقادیری هستند که سیم ها در شرایط ناپایدار مستقیماً به آنها پاسخ می‌دهند. بنابراین، برای یک سیال معین و برای یک سیم معمولی با جریان، متغیرها عبارتند از سرعت و دمای محیط اگر سیال تراکم ناپذیر باشد، یا سرعت، چگالی و دمای رکود اگر سیال قابل تراکم باشد. متغیرهای جریان توسط تجهیزات معمولی (لوله پیتو، ترموکوپل و غیره) اندازه گیری می شوند. برای سیمی که به صورت مورب نسبت به جریان تنظیم شده است، حساسیت زاویه ای با شبیه سازی یک سرعت عرضی اضافی کوچک با چرخش سیم حول حالت عادی به سیم و جهت جریان طولی (شکل ۱)، بدست می‌آید. این یک کالیبراسیون هندسی و مطلق است که می‌تواند در سرعت های بالاتر نیز انجام شود.

در مقاله حاضر، کالیبراسیون سیم داغ سه مولفه در دو بخش کالیبراسیون اندازه سرعت و کالیبراسیون راستای سرعت، به صورت مجزا انجام شده است. همچنین به منظور صحت سنجی روابط، در چند حالت مختلف، مولفه‌های *سرعت*، محاسبه شده که در مقایسه با مقدار واقعی، دارای میانگین خطای ۶ درصد است؛ با توجه به وجود عوامل متعدد خطا، این مقدار قابل قبول به نظر می‌رسد.

مراجع

[1] Bruun H H 1995 Hot-wire Anemometry (Oxford: Oxford University Press)

[2] Jorgensen F E 1971 Directional sensitivity of wire and fiber film probes DISA Inform. 11 31–7

[3] Acrivlellis M 1980 Measurements by means of triple-sensor probes J. Phys. E: Sci. Instrum. 13 986–92

[4] Adrian R J, Johnson R E, Jones B G, Merati P and Tung T C 1984 Aerodynamic disturbances of hot wire probes and directional sesitivity J. Phys. E: Sci. Instrum. 17 62–71

[5] Lekakis I C, Adrian R J and Jones B G 1989 Measurement of velocity vectors with orthogonal and non-orthogonal triple-sensor probes Exp. Fluids 7 228–40

[6] Compte-Bellot G, Strohl A and Alcaraz E 1971 On aerodynamics disturbances caused by single hot-wire probes ASME Trans. E: J. Appl. Mech. 34 767–74

[7] Butler T L and Wagner J W 1983, Application of a three-sensor hot-wire probe for incompressible flow, AIAA J. 21 726-32

[8] F. Stella, G. Guj and D. Barbagallo, A general approach for multiple-sensor hot-wire probes, 1997

[9] L.V. King (1914) “On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: determination of the convection constants of small platinum wires with application to hot-wire anemometry,” Phil. Trans. Roy. Soc., Ser. A., Vol. 214, pp. 373–432.

[10] J. Andreopoulos, 1982, Improvement of the performance of triple hot-wire probes

[11] C. P. Yeung and L. C. Squire, 1993, Numerical calibration and verification tests of an orthogonal triple-hot-wire probe

[12] G. E. Andrews, 1971, Hot-wire anemometer calibration for measurements of small gas velocities

[13] Jean Paul Moro, Peter V Vukoslavcevic and Vincent Blet, A method to calibrate a hot-wire X-probe for application in low-speed, variable-temperature flow, 2003