

مطالعه تجربی اثر تغییر دماهای جریان آزاد و حسگر دستگاه بادسنج سیم داغ بر کالیبراسیون حسگرها و اندازه‌گیری سرعت

رضا تقوی زنوز^۳
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه علم و صنعت ایران

محمد علی اردکانی^۲
گروه مهندسی مکانیک
سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

محمود سالاری^۱
دانشکده علوم و فنون دریایی
دانشگاه امام حسین(ع)

چکیده

در این مقاله، تأثیر دو پارامتر مهم در اندازه‌گیری سرعت با دستگاه بادسنج سیم داغ (HWA): یکی اثر تغییر دمای هوای جریان آزاد (دمای تونل باد) و دیگری اثر تغییر دما یا نسبت فراگرمایی حسگر بر منحنی مشخصه و کالیبراسیون حسگرهای سیم داغ و فیلم داغ مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای تونل، ولتاژ بالای پل مدار و تستون در دستگاه HWA کاهش می‌یابد و نرخ کاهش آن به فیزیک حسگرها، سرعت سیال و نسبت فراگرمایی آزمایش بستگی دارد که معمولاً در عمل برای تصحیح این اثر از ضرایب تصحیح دما استفاده می‌شود. همچنین نتایج بررسی اثر تغییر دمای حسگر نشان می‌دهد که منحنی‌های کالیبراسیون به‌دست آمده برای هر حسگر در نسبت‌های فراگرمایی متفاوت را می‌توان با اعمال ضریب تصحیح مناسبی بر هم منطبق کرد، به طوری که با داشتن منحنی کالیبراسیون یک حسگر در دو نسبت فراگرمایی متفاوت بتوان منحنی کالیبراسیون آن حسگر را برای هر نسبت فراگرمایی دلخواه دیگر بدون نیاز به آزمایش مجدد به‌دست آورد.

واژه‌های کلیدی: دستگاه بادسنج سیم داغ، حسگر فیلم داغ، نسبت فراگرمایی، اندازه‌گیری سرعت سیال، اثر دما.

Experimental Studies on Temperature Effects of Freestream and Hot Wire Sensors on the Calibration Curves and Velocity Measurements

M. Salari

Naval Science and Tech. Department,
Imam Hossein Univ.

M.A. Ardekani

Mech. Eng. Group,

Iran's Scientific and Technical Research Org.

R. Taghavi Zenouz

Mech. Eng. Department,
Iran Univ. of Science and Tech..

ABSTRACT

In this paper, the effects of two important parameters on characteristic curves and the calibration of hot films and hot wires are studied experimentally. One of them is the freestream temperature and the other is the probe temperature or probe overheat ratio. The results show that increasing the wind tunnel (freestream) temperature decreases the voltage of the Wetston's bridge in the Constant Temperature Anemometry (CTA) circuit. It must be noted that, the decreasing rate depends on the physical properties of sensors, the flow velocity, and the overheat ratio. Temperature correction factors can be used for modification of these errors. Also, consideration of probe temperature shows that the calibration curves of a probe, in different overheat ratios, can be matched using a suitable correction factor, i.e. if the calibration curves of a probe were available only for two different overheat ratios, the other calibration curves for any arbitrary one can be obtained.

Key Words: Hot Wire Anemometry, Hot Film, Velocity Measurement, Temperature Effects

۱- مری: m_salari@iust.ac.ir

۲- استادیار

۲- استادیار

فهرست علائم

n	ثابت کالیبراسیون و توان رابطه ضریب تصحیح	A,B	ثابت‌های رابطه کالیبراسیون
T_f	دمای فیلم	OH	نسبت فراگرمایی
T_w	دمای حسگر	A_s	مساحت جانبی حسگر
T_a	دمای جریان سیال	l	طول حسگر
T_r	دمای مرجع	d	قطر حسگر
α_{20}	ضریب دمایی مقاومت حسگر در دمای 20°C	E_0	ولتاژ بالای پل وتستون در سرعت صفر
α_0	ضریب دمایی مقاومت حسگر در دمای 0°C	E_r	ولتاژ بالای پل وتستون در دمای T_r
Rc	عدد رینولدز جریان سیال بر مبنای قطر حسگر	E	ولتاژ بالای پل وتستون
I	جریان الکتریکی گذرنده از حسگر	R_0	مقاومت الکتریکی حسگر در دمای 0°C
k	ضریب هدایت هوا	R_a	مقاومت سرد حسگر
U	سرعت جریان سیال	R_{20}	مقاومت سرد حسگر در دمای 20°C
Pr	عدد پرانتل جریان سیال	R_w	مقاومت گرم حسگر در دمای T_w
ρ	چگالی سیال	Q	نرخ انتقال حرارت همرفتی از حسگر
h	ضریب همرفت هوا	μ	ویسکوزیته دینامیکی سیال

۱- مقدمه

برای شناخت رفتار جریان‌های پیچیده در موضوع دینامیک سیالات و شناخت قوانین حاکم بر آنها همواره اندازه‌گیری‌های تجربی از اولویت خاصی برخوردار بوده است. جریان‌های توربولانسی یا در حال انتقال، از حالت لایه‌ای به درهم، عموماً با نوسانات سرعتی با مقیاس‌های بسیار کوچک و فرکانس‌های نسبتاً بالا همراه هستند. چنانچه اندازه‌گیری و مطالعه تجربی این جریان‌ها یا سایر جریان‌های پیچیده و حساس مدنظر باشد دستگاه بادسنج سیم داغ یکی از مناسب‌ترین ابزارها برای این اندازه‌گیری‌ها است. ویژگی اصلی این دستگاه دقت بسیار بالای آن و پاسخ فرکانسی سریع آن (حدود ۳۰ kHz) به مؤلفه‌های نوسانی سرعت است. این ویژگی در زمینه‌های تحقیقاتی دینامیک سیالات یا کاربردهای صنعتی از اهمیت فراوانی برخوردار است.

دستگاه بادسنج سیم داغ در دو حالت کاری، یکی ثابت نگه داشتن دما،^۱ CTA، و دیگری ثابت نگهداشتن جریان،^۲ CCA، در حسگر اندازه‌گیر استوار است (شکل ۱). امروزه به دلایل مختلفی از مدار CTA بیشتر برای

اندازه‌گیری نوسانات سرعت و از مدار CCA فقط برای اندازه‌گیری نوسانات دما در جریان‌ها استفاده می‌شود [۱]. در حالت کلی برای اندازه‌گیری سرعت جریان معمولاً از حسگرهای سیم داغ و فیلم داغ استفاده می‌شود. حسگر سیم داغ یک سیم نازک با قطری حدود $5\mu\text{m}$ و از جنس تنگستن، پلاتین یا آلیاژهای پلاتین است. حسگر فیلم داغ دارای قطری حدود $125\mu\text{m}$ است که از یک زیر لایه کوارتز تشکیل شده و بر روی آن لایه‌ای نازک از جنس نیکل با ضخامت $0.1\mu\text{m}$ نشانده شده است. حساسیت و پاسخ فرکانسی حسگر فیلم داغ از سیم داغ کمتر است اما فیلم داغ استحکام بیشتری دارد و بیشتر برای اندازه‌گیری در سیالات مایع استفاده می‌شود [۲].

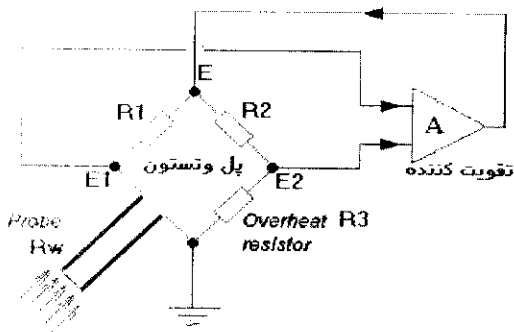
اندازه‌گیری با مدار CTA بر انتقال حرارت همرفتی^۳ انجام شده بین حسگر سیم داغ و سیال عبوری از روی آن استوار است. به طوری که نرخ این تبادل حرارت به اختلاف دمای حسگر و سیال، شرایط جریان سیال و خواص فیزیکی سیال و حسگرها بستگی دارد. شکل (۱) شماتیکی از یک مدار CTA را نشان می‌دهد. در این مدار حسگر اندازه‌گیر که دارای مقاومت الکتریکی R_w

1- Constant Temperature Anemometry

2- Constant Current Anemometry

3- Convection

همین منظور در بخشی از این مقاله، اثر تغییر دمای محیط و نحوه تصحیح ولتاژ برای حسگرهای سیم داغ و فیلم داغ به صورت تجربی مطالعه شده است. حسگر دستگاه‌های HWA پرتابل صنعتی معمولاً برای بار اول در شرکت سازنده کالیبره می‌شوند و به منظور ثابت نگه‌داشتن دقت دستگاه در شرایط کاری گوناگون، پارامترهای اصلاح‌کننده‌ای به آن اعمال می‌شود و در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌گیرد. یکی از موارد تاثیر گذار بر خطای اندازه‌گیری این دستگاه‌ها، تغییر خواص فیزیکی حسگر به عللی همچون رسوب آلودگی‌های سیال بر سطح حسگر است. در این موارد معمولاً حسگر دیگری جایگزین حسگر معیوب می‌شود و این در حالی است که معادله کالیبراسیون موجود در حافظه دستگاه بر مبنای اطلاعات حسگر اولیه است. در بخش دیگر این مقاله امکان تعویض حسگر معیوب با یک حسگر هم نوع خود و نیز تعویض حسگر سیم داغ با حسگر فیلم داغ، بدون نیاز به تغییر در منحنی کالیبراسیون دستگاه پرتابل HWA، به صورت تجربی بررسی تجربی شده است. به عبارتی دیگر تاثیر تغییر دمای حسگر (نسبت فراگرمایی) بر منحنی مشخصه و منحنی کالیبراسیون چندین حسگر سیم داغ و فیلم داغ با شرایط مختلف آزمایش می‌شود و نتیجه‌گیری‌های لازم برای ثابت نگه داشتن دقت دستگاه‌های اندازه‌گیر صنعتی در شرایط گوناگون، ارائه شده است.

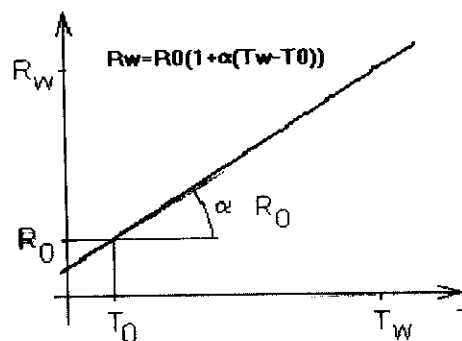


شکل ۱- شماتیک یک مدار CTA.

است به عنوان یکی از چهار مقاومت الکتریکی پل و تستون عمل می‌کند. با تغییر سرعت جریان سیال، دمای حسگر و در نتیجه مقاومت الکتریکی آن نیز که تابع دمای سیم است تغییر می‌کند (شکل ۲). در این حالت مدار بر مبنای تغییر ولتاژ ایجاد شده بین $E1$ و $E2$ و استفاده از تقویت‌کننده‌ای با بهره A سعی می‌کند تا با تامین ولتاژ متناسب E در بالای پل، جریان عبوری از حسگر به گونه‌ای تنظیم کند که همواره پل را در حالت توازن قرار دهد و یا اصطلاحاً دمای حسگر و R_w را ثابت نگه دارد. مدار پردازشگر دستگاه از میزان تغییر ولتاژ ایجاد شده و منحنی مشخصه حسگر، سرعت جریان عبوری از روی حسگر را محاسبه می‌کند [۳].

قبل از هر آزمایش معمولاً منحنی کالیبراسیون حسگرهای آزمایش (ولتاژ- سرعت) با فرض ثابت بودن سایر پارامترهای مؤثر نظیر دمای سیال عبوری T_a و دمای حسگر T_w به دست می‌آید. از آنجا که رابطه انتقال حرارت همرفتی بین حسگر و محیط به صورت، $q=h.A.(T_w - T_a)$ است و مقدار $(T_w - T_a)$ در فرآیند کالیبراسیون برابر عدد ثابتی است لذا در منحنی کالیبراسیون، تغییر ولتاژ E مستقیماً به تغییرات ضریب همرفتی h و سرعت U وابسته می‌شود [۴]. حال چنانچه حین یک آزمایش دمای هوای تونل نسبت به شرایط کالیبراسیون تغییر کند میزان انتقال حرارت q از سیم داغ نیز تغییر خواهد کرد. در این شرایط ولتاژ خروجی دستگاه، E ، از منحنی کالیبراسیون تبعیت نخواهد کرد و سبب بروز خطا در اندازه‌گیری سرعت می‌شود. در این موارد لازم است به صورت نرم افزاری ولتاژ E خوانده شده از مدار CTA نیز تصحیح شود تا به توان از معادله کالیبراسیون قبلی برای محاسبه سرعت استفاده کرد [۵]. تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که با افزایش دمای محیط و بدون انجام تصحیح اثر دما، سرعت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه کاهش قابل توجهی نسبت به حالت واقعی دارد به طوری که به ازای هر درجه افزایش دما در اندازه‌گیری جریان هوا، میزان خطای سرعت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه حدود ۱۲ درصد و در جریان آب به میزان ۱۲٪- است [۶]. به

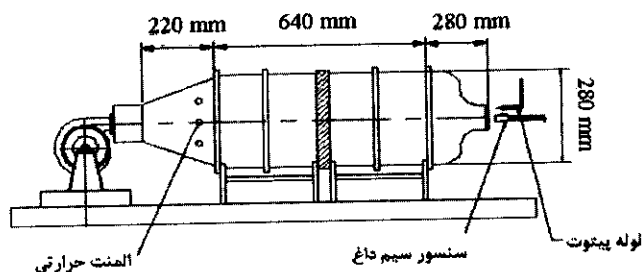
جریان هوای تونل نیز با استفاده از یک لوله پیتوت اندازه‌گیری می‌شود و فشار دینامیکی لوله پیتوت به کمک یک ترانسدیوسر به ولتاژ الکتریکی تبدیل می‌شود. ولتاژ خروجی از مدار CTA، فشارسنج و دماسنج از طریق کارت A/D با رزولوشن ۱۲ بیت و فرکانس ۲۰۰ kHz به کامپیوتر منتقل و توسط نرم‌افزار تهیه شده، داده‌ها تجزیه و تحلیل می‌شوند.



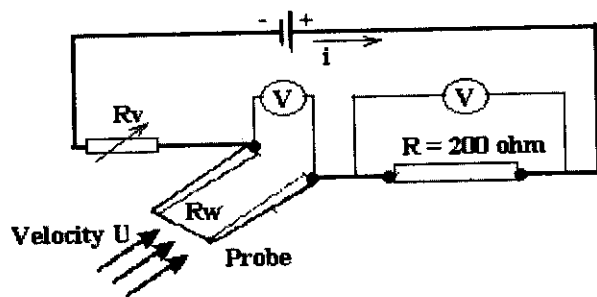
شکل ۲- تغییر مقاومت الکتریکی حسگر بر حسب دما.

جدول ۱- مشخصات حسگرهای تست شونده.

نام	نوع سنسور	جنس	R (Ω)	α_{20} (1/°C)	OH	T_w (°C)
HF1	فیلم داغ	نیکل	3.3	0.004456	1.4 1.6	115 160
HF2	فیلم داغ	نیکل	4.5	0.003952	1.4 1.6	127 177
HF3	فیلم داغ	نیکل	5.5	0.003476	1.4 1.6	140 198
HW1	سیم داغ	تنگستن	3.5	0.0036	1.4 1.6	136 191
HW2	سیم داغ	تنگستن	6.0	0.0036	1.4 1.6	136 191



شکل ۳- تونل باد تحقیقاتی و محل قرارگیری لوله پیتوت و حسگر دستگاه HWA.



شکل ۴- شماتیک مدار اندازه‌گیر منحنی مشخصه.

۲- روش و تجهیزات آزمایش

همه آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه تونل باد مجتمع تحقیقاتی عصر انقلاب وابسته به سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران انجام گرفته است. برای انجام این آزمایش‌ها از یک تونل باد مدار باز تحقیقاتی استفاده شده است (شکل ۳). به منظور تعیین منحنی مشخصه حسگر پروب‌های تست شونده که اطلاعات آنها در جدول ۱ آمده است از مدار الکترونیکی که شماتیک آن در شکل (۴) آمده، استفاده شده است. در این مدار با عبور جریان هوا با سرعتی مشخص از روی حسگر پروب و اندازه‌گیری ولتاژ دو سر مقاومت مشخص R، مقدار جریان عبوری از مدار، i ، محاسبه می‌شود. با اندازه‌گیری ولتاژ دو سر پروب و معین بودن مقدار i ، مقدار مقاومت حسگر پروب، R_w محاسبه می‌شود و دمای حسگر T_w از رابطه شکل ۲ به دست می‌آید.

حال با ثابت نگه‌داشتن سرعت جریان هوا، به کمک مقاومت متغیر R_v مقدار جریان مدار را تغییر داده و مقاومت پروب (دمای حسگر) به ازای مقادیر مختلف جریان اندازه‌گیری می‌شود که به آن منحنی مشخصه (شکل ۵) حسگر گویند. با استفاده از یک دستگاه کنترل دور، دور فن و در نتیجه سرعت جریان در تونل کنترل می‌شود. در داخل تونل باد از چهار سری توری و شبکه‌ای لانه زنبوری برای یکنواخت کردن جریان سیال استفاده شده است. به منظور بررسی اثر تغییرات دمای جریان سیال بر اندازه‌گیری سرعت، تعدادی المنت حرارتی در بالادست شبکه لانه زنبوری و داخل محفظه دیفیوزر تعبیه شده است که به کمک یک کنترلر تنظیم می‌شوند. برای به دست آوردن منحنی کالیبراسیون حسگرها، همزمان با اندازه‌گیری ولتاژ دو سر حسگر، سرعت

و خواص سیال نظیر ویسکوزیته μ ، دانسیته ρ ، عدد پرانتل Pr ، ضریب هدایت حرارتی k ، در دمای $T_f = \frac{(T_w + T_a)}{2}$ محاسبه می‌شوند. همچنین در روابط فوق R_0 ، α_0 به ترتیب مقاومت سیم و ضریب انبساط حرارتی آن در دمای مبنا هستند. لیکن عملاً طول حسگر سیم داغ محدود می‌شود و قسمتی از حرارت به صورت هدایتی به پایه‌های نگهدارنده حسگر منتقل می‌شود. لذا در عمل معادله کالیبراسیون به صورت:

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

بیان می‌شود که A و B و n ثابتهای کالیبراسیون است و در فرایند کالیبراسیون به دست می‌آیند. برای در نظر گرفتن اثرات تغییر دما، مایله و اندرسون [۷]، معادله کالیبراسیون را به صورت رابطه زیر پیشنهاد کردند:

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

که در آن، $\Delta T = T_w - T_a$ و ضرایب B_n از کالیبراسیون به دست می‌آیند. همچنین کوپیس و ترینس [۸]، برای در نظر گرفتن اثرات دما، از رابطه زیر استفاده کردند:

$$\frac{E_w^2}{R_w(R_w - R_{20})} = A + BU^n, \quad (4)$$

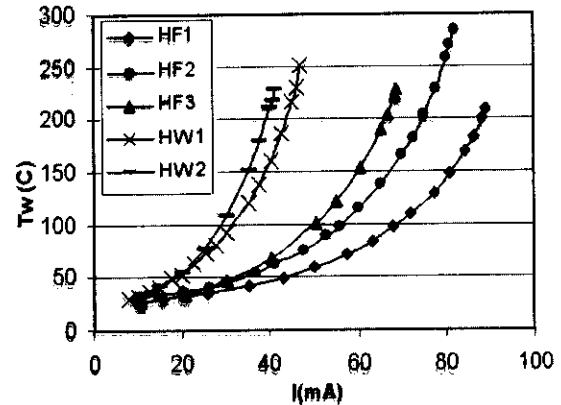
که در آن، R_w مقاومت حسگر در دمای T_w ، R_{20} مقاومت سرد حسگر (در دمای $20^\circ C$) و E_w ولتاژ دو سر حسگر است. در صورت خطی بودن تغییرات مقاومت الکتریکی با دمای حسگر رابطه (۴) به صورت زیر درمی‌آید:

$$\frac{E_w^2}{R_w(T_w - T_{20})} = A + BU^n. \quad (5)$$

از رابطه (۵) می‌توان دریافت که با تغییر دمای تونل از شرایط مرجع T_r (شرایط کالیبراسیون) به مقدار متفاوت دیگری نظیر T_a ، ولتاژ سیم نیز از E_r به E_w تغییر خواهد کرد. چنانچه سرعت جریان تونل ثابت باشد، این تغییر ولتاژ از رابطه زیر تبعیت خواهد کرد:

$$E_r = E_w \left[\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a} \right]^{0.5}, \quad (6)$$

که $\left[\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a} \right]^{0.5}$ را ضریب تصحیح ولتاژ می‌نامند [۶].



شکل ۵- منحنی تغییرات T_w بر حسب جریان الکتریکی.

۳- روش‌های تصحیح اثر تغییر دمای تونل بر اندازه‌گیری با دستگاه HWA

همان‌طور که در مقدمه بیان شد چنانچه هنگام اندازه‌گیری، دمای تونل نسبت به شرایط کالیبراسیون تغییر کند ولتاژ بالای پل و تستون نیز در مدار CTA تغییر می‌کند و باعث بروز خطا در اندازه‌گیری سرعت خواهد شد. برای رفع این مشکل معمولاً به ضرایب تصحیح کننده‌ای نیاز است تا با اعمال این ضریب در ولتاژ اندازه‌گیری شده، بتوان سرعت واقعی جریان را از منحنی کالیبراسیون استخراج کرده. برای تصحیح اثرات تغییر دما بر دستگاه HWA، محققان مختلفی همچون مایله^۱ و اندرسون^۲ در [۷] و کوپیس^۳ و ترینس^۴ در [۸] رهیافت‌های گوناگونی را ارائه کرده‌اند. برای تشریح این موضوع، معادله انتقال حرارت از یک سیم گرم با طول بی‌نهایت و قطر d که با جریان الکتریکی I گرم می‌شود را در نظر بگیرید. این معادله به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۹]:

$$q = h \cdot A_s \cdot (T_w - T_a) = (A + BU^{0.5}) \times (R_w - R_a), \quad (1)$$

$$\frac{I^2 R_w}{R_w - R_{20}} = A + BU^{0.5},$$

که در آن،

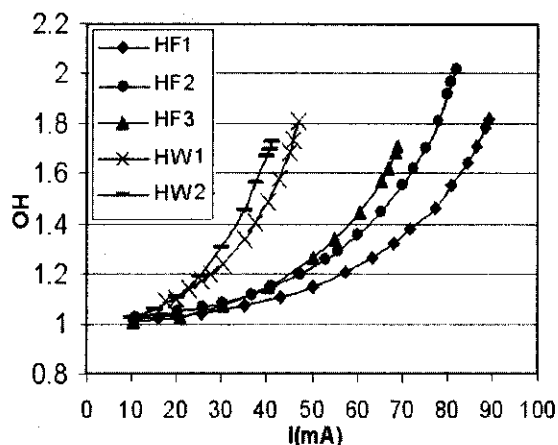
$$A = 0.42 \frac{\pi k l}{\alpha_0 R_0} Pr^{0.20},$$

$$B = 0.57 \frac{\pi k l}{\alpha_0 R_0} Pr^{0.33} \left[\frac{\rho d}{\mu} \right]^{0.50},$$

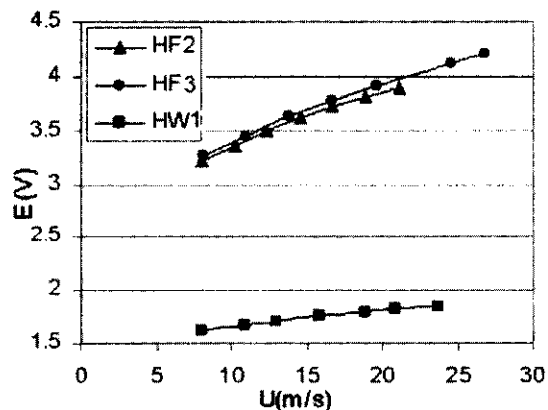
1- Mayle
2- Anderson
3- Koppis
4- Trines

مقدار E_{corr} در رابطه کالیبراسیون (۱۰) قرار داده شده و مقدار سرعت واقعی جریان محاسبه می‌شود [۶].

۴- تأثیر تغییر دمای تونل بر اندازه‌گیری سرعت آزمایش‌های این بخش از تحقیق روی حسگرهای فیلم داغ HF2، HF3 و حسگر سیم داغ HW1 (جدول ۱) انجام شده است. قبل از انجام هر آزمایشی، باید مقدار دقیق نسبت فراگرمایی ($OH = \frac{R_w}{R_a}$) و دمای حسگر T_w تعیین شوند. بدین منظور ابتدا منحنی مشخصه شکل‌های (۵ و ۶) و سپس منحنی کالیبراسیون برای حسگرهای مورد آزمایش به دست آورده شده‌اند (شکل ۷).



شکل ۵- منحنی تغییرات OH بر حسب جریان الکتریکی.



شکل ۶- منحنی کالیبراسیون حسگرها.

توجه به این نکته ضروری است که در رهیافت‌های پیشنهادی فوق، اثر تغییر دما تنها بر روی ولتاژ خروجی اعمال شده است. در حالی که رابطه (۱) نشان می‌دهد که ضرایب ثابت A و B به خواص سیال بستگی دارند، لذا تغییر دمای تونل بر مقادیر این ضرایب نیز تأثیرگذار خواهد بود که در رهیافت‌های فوق لحاظ نشده‌اند. به منظور رفع این نقیصه در این مقاله از معادله انتقال حرارت کولیس و ویلیامز [۱] به عنوان معادله انتقال حرارت پایه‌ای استفاده شده است. در معادله انتقال حرارت فوق علاوه بر تأثیر دما بر خواص سیال، از یک ضریب بارگذاری دمایی $\left[\frac{T_F}{T_a}\right]^{-0.17}$ نیز استفاده می‌شود، یعنی:

$$Nu \left[\frac{T_F}{T_a}\right]^{-0.17} = A + B Re^n \quad (7)$$

با در نظر گرفتن رابطه کرامرز [۱] برای عدد ناسلت داریم:

$$Nu = 0.4 Pr_a^{0.20} + 0.57 Pr_a^{0.33} Re^{0.5} \quad (8)$$

$$0.01 < Re < 10,000,$$

$$0.71 < Pr < 1000,$$

که در بازه ذکر شده معتبر است و اعمال آن به رابطه (۷) و در نظر گرفتن رابطه $Q = I^2 R_w$ برای گرمای تولید شده در سیم، معادله پاسخ حسگر به صورت زیر در می‌آید:

$$E^2 = (T_w - T_a) k_f \left[a Pr_a^{0.2} + b Pr_a^{0.33} \left(\frac{P_a}{k_a}\right)^n U^n \right] \quad (9)$$

در روابط فوق اندیس r نشان دهنده مقدار خاصیت در دمای $T_{Fr} = \frac{(T_w + T_r)}{2}$ و اندیس a نشان دهنده مقدار خاصیت

در $T_{Fa} = \frac{(T_w + T_a)}{2}$ است. همچنین ضرایب a و b به

مشخصه‌های حسگر بستگی دارند. به منظور افزایش دقت منحنی کالیبراسیون، در اندازه‌گیری‌های تجربی، معمولاً از یک منحنی چند جمله‌ای استفاده می‌شود، یعنی:

$$U = C_0 + C_1 E + C_2 E^2 + C_3 E^3 + C_4 E^4, \quad (10)$$

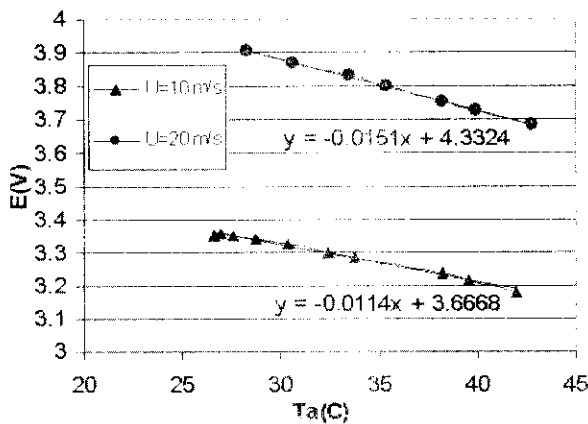
که در آن ضرایب کالیبراسیون C_0 ثابت هستند. در این رهیافت اثر دما بر ولتاژ بالای پیل و تستون E به صورت رابطه زیر تصحیح می‌شود:

$$E_{corr} = E \left[\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a} \right]^{0.5(1 \pm m)}, \quad (11)$$

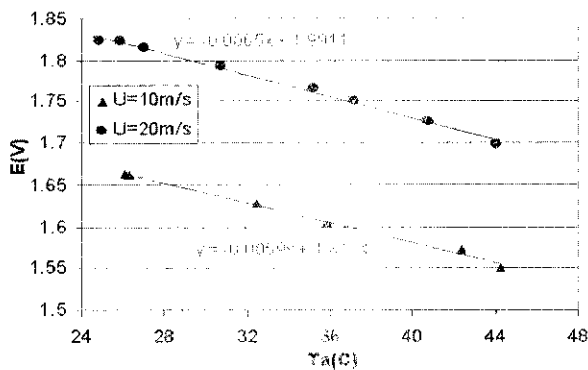
که در آن $m = \left[\frac{T_F}{T_a}\right]^{-0.17}$ می‌باشد. علامت + برای حالت $T_a > T_r$ و علامت - برای $T_a < T_r$ است. بعد از تصحیح،

بر مبنای رابطه فوق، در شکل (۱۰) مقدار n برای حسگر HF3 ترسیم شده که در سرعت‌های $U=10$ m/s و $U=20$ m/s به ترتیب برابر $n=0.428$ و $n=0.374$ می‌باشند. همین نتایج برای حسگر HW1 در شکل (۱۱) ترسیم شده است که برای این حسگر نیز مقدار n در سرعت‌های $U=10$ m/s و $U=20$ m/s به ترتیب برابر $n=0.59$ و $n=0.605$ می‌باشند.

با معلوم شدن مقدار n می‌توان مقدار واقعی ولتاژ تصحیح شده را از رابطه (۱۲) استخراج کرد و به کمک منحنی کالیبراسیون حسگر، سرعت واقعی جریان را به دست آورد.



شکل ۸- تغییر ولتاژ حسگر HF3 در $OH=1.4$ برای دو سرعت مختلف.



شکل ۹- تغییر ولتاژ حسگر HW1 در $OH=1.6$ برای دو سرعت مختلف.

باید تاکید شود که منظور از آزمایش‌های این بخش از تحقیق بررسی اثر تغییر دمای محیط و نحوه تصحیح ولتاژ برای اندازه‌گیری عملی با حسگرهای سیم داغ و فیلم داغ است.

۴-۱- اثر تغییر دمای تونل در یک نسبت فراگرمایی و دو سرعت متفاوت

در شکل (۸) نحوه کاهش ولتاژ بالای پل وتستون (نسبت به شرایط کالیبراسیون) بر حسب تغییر دمای هوای تونل باد، برای فیلم داغ HF3، در نسبت فراگرمایی $1/4$ و دو سرعت $U=10$ m/s و $U=20$ m/s ترسیم شده است. همین منحنی برای حسگر سیم داغ HW1 در $OH=1/6$ و سرعت‌های فوق در شکل (۹) آورده شده است. مشاهده می‌شود که برای هر دو نوع حسگر، نرخ کاهش ولتاژ با افزایش سرعت جریان افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش سرعت سیال، شیب خط کاهش ولتاژ E_f نیز زیاد می‌شود. علت این امر را می‌توان در کاهش مقدار T_w و حساس‌تر شدن حسگرها نسبت به دمای محیط جستجو نمود. زیرا هر چه سرعت افزایش یابد ولتاژ بالای پل وتستون (شکل ۱) نیز زیاد می‌شود و از آنجا که ضریب بهره مدار الکترونیکی ثابت است لذا مقدار ΔE خروجی از پل نیز افزایش خواهد یافت. نتیجه این امر، کاهش R_w و در نتیجه T_w است [۹]. همچنین از مقایسه نتایج شکل‌های (۸) و (۹) می‌توان دریافت که نرخ کاهش ولتاژ برای حسگر سیم داغ HW1 کمتر از حسگر فیلم داغ HF3 است.

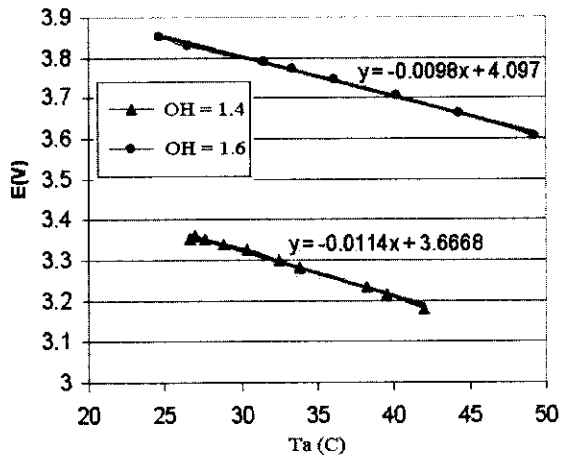
بر مبنای رهیافت ارائه شده در قسمت ۳ (رابطه ۱۱)، به منظور تصحیح ولتاژ در این آزمایش از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$E_r = E \cdot \left[\frac{T_w - T_f}{T_w - T_a} \right]^n \quad (12)$$

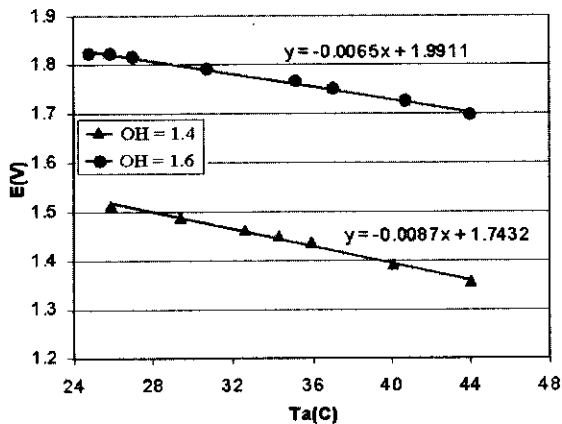
با اعمال لگاریتم به رابطه (۱۲) می‌توان در یافت که شیب خط لگاریتمی $\frac{E_r}{E}$ بر حسب لگاریتم $\frac{T_w - T_f}{T_w - T_a}$ برابر مقدار توان ضریب تصحیح n خواهد بود، یعنی:

$$\ln\left(\frac{E_r}{E}\right) = n \cdot \ln\left(\frac{T_w - T_f}{T_w - T_a}\right) \quad (13)$$

اینجا نیز شیب کاهش ولتاژ برای $OH=1/4$ بیشتر از $OH=1/6$ است. از مقایسه منحنی‌های شکل‌های (۱۲) و (۱۳) می‌توان دریافت که با افزایش سرعت و یا کاهش نسبت فراگرمایی، شیب کاهش ولتاژ بیشتر می‌گردد.

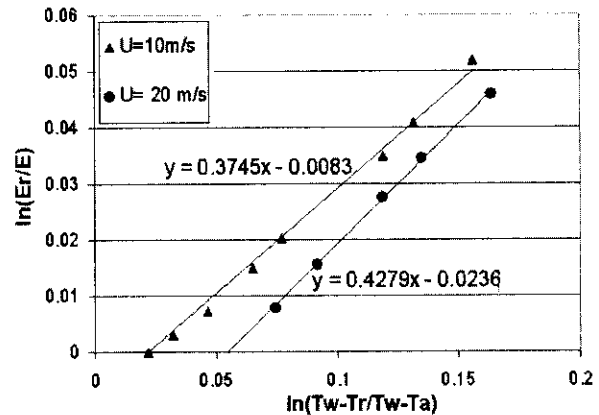


شکل ۱۲ - روند کاهش ولتاژ برای حسگر HF3 در $U=10\text{m/s}$ برای دو نسبت فراگرمایی مختلف.

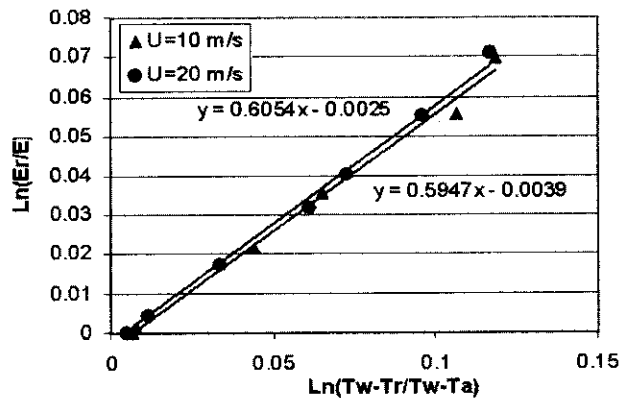


شکل ۱۳ - روند کاهش ولتاژ برای حسگر HW1 در $U=20\text{ m/s}$ برای دو نسبت فراگرمایی مختلف.

۵- اثر دمای حسگرها بر منحنی مشخصه و عملکرد آنها به منظور بررسی اثر دمای حسگر و یا نسبت فراگرمایی بر عملکرد و مشخصه حسگرها، ابتدا منحنی مشخصه حسگرهای جدول (۱) به دست آمد. این منحنی‌ها در شکل‌های (۵) و (۶) ترسیم شده‌اند. در این بخش از تحقیق ابتدا عملکرد یک حسگر در دماهای کاری متفاوت بررسی شده و سپس عملکرد



شکل ۱۰ - مقدار توان n برای حسگر HF3 در $OH=1.4$ برای دو سرعت مختلف.



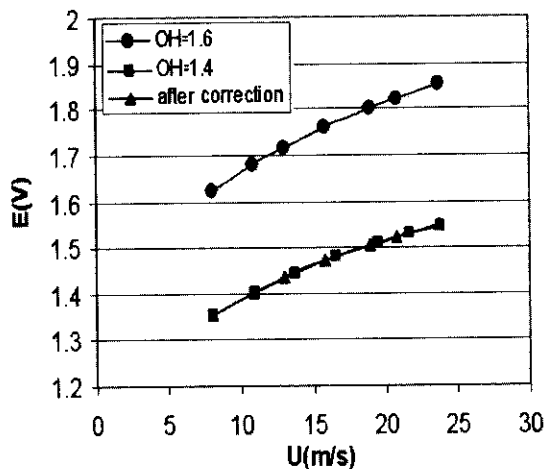
شکل ۱۱ - مقدار توان n برای حسگر HW1 در $OH=1.6$ برای دو سرعت مختلف.

۴-۲- اثر تغییر دمای تونل در یک سرعت ثابت و دو نسبت فراگرمایی مختلف

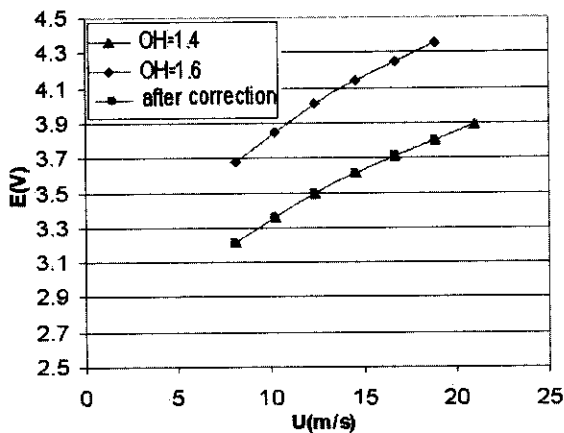
در شکل (۱۲) منحنی‌های کاهش ولتاژ E بر حسب دمای تونل T_a برای حسگر فیلم داغ HF3 در سرعت 10 m/s و دو نسبت فراگرمایی $OH=1/4$ و $OH=1/6$ ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش مقدار نسبت OH ، ولتاژ بالای پل E با شیب تندتری کاهش می‌یابد به طوری که برای $OH=1/6$ نرخ کاهش برابر 0.118 و برای $OH=1/4$ این کاهش برابر با نرخ منفی 0.151 است. علت این است که با کم شدن نسبت OH در واقع T_w کاهش می‌یابد و در نتیجه اختلاف $T_w - T_a$ نیز کم می‌شود. همین اختلاف سبب حساس‌تر شدن حسگر به تغییرات T_a می‌شود و در نتیجه ولتاژ با نرخ بیشتری شروع به کاهش می‌کند. همچنین شکل (۱۳) روند کاهش ولتاژ برای حسگر HW1 را در $U=20\text{ m/s}$ نشان می‌دهد. همانند حسگر فیلم داغ، در

است. نتایج حاصله رفتاری مشابه آزمایش‌های مربوط به سیم داغ دارند.

۵-۲- مقایسه عملکرد دو حسگر هم‌نوع در یک نسبت فراگرمایی ثابت
در این قسمت به بررسی منحنی کالیبراسیون و مشخصه دو حسگر هم‌نوع، در نسبت فراگرمایی یکسان می‌پردازیم.



شکل ۱۴ - منحنی کالیبراسیون HW1 در دو نسبت فراگرمایی و انطباق آنها پس از اعمال ضریب تصحیح.



شکل ۱۵ - منحنی کالیبراسیون HF1 در دو نسبت فراگرمایی و انطباق آنها پس از اعمال ضریب تصحیح.

ابتدا منحنی کالیبراسیون برای دو حسگر سیم داغ HW1 و HW2 به‌دست آورده شده است (شکل ۱۶). از مقایسه دو منحنی نتیجه می‌شود که ضرایب A, B برای HW2 بزرگ‌تر از HW1 هستند. چنانچه سرعت جریان تونل صفر $U=0$ باشد میزان ولتاژ نیز طبق رابطه کالیبراسیون برابر

دو حسگر هم‌نوع و دو حسگر غیرهم‌نوع در یک نسبت فراگرمایی ثابت با هم مقایسه می‌شوند.

آزمایش‌های این بخش به منظور بررسی امکان تعویض حسگر معیوب با یک حسگر هم‌نوع خود و نیز تعویض حسگرسیم داغ با حسگر فیلم داغ، بدون نیاز به تغییر درمنحنی کالیبراسیون در دستگاه‌های پرتابل HWA انجام شده است.

۵-۱- عملکرد یک حسگر در دو دمای کاری (نسبت فراگرمایی) متفاوت

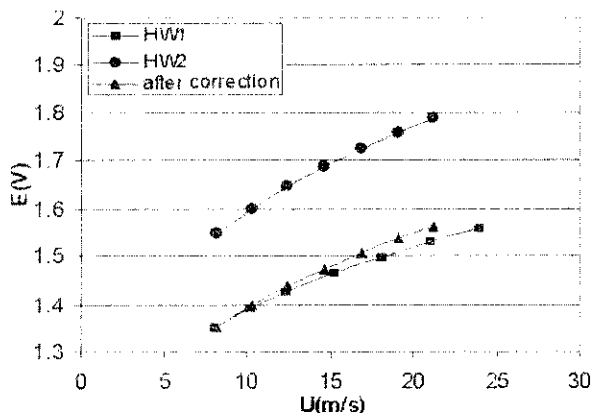
در این آزمایش از پراب HW1 استفاده شده است. منحنی کالیبراسیون پراب سیم داغ HW1 در دو نسبت فراگرمایی $OH=1/4$ و $OH=1/6$ در شکل (۱۴) ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که دو منحنی تفاوت زیادی با یکدیگر دارند. از آنجا که میزان این اختلاف تابعی از سرعت جریان است لذا برای انطباق دو منحنی فوق نمی‌توان یکی از آنها را به میزان معینی جابه‌جا کرد. علت تغییرات فوق متفاوت بودن ضرایب A و B در نسبت‌های فراگرمایی مختلف است. زیرا A و B تابعی از خواص سیال یعنی μ و k و α هستند و این خواص در دمای $T_p = \frac{(T_w + T_a)}{2}$ محاسبه می‌شوند.

از منحنی مشخصه حسگر سیم داغ می‌توان مقدار دمای حسگر T_w را تعیین کرد. با فرض ثابت بودن دمای تونل، مقدار $\Delta T = T_w - T_a$ قابل محاسبه خواهد بود. حال با استفاده از رابطه انتقال حرارت $Q = h.A_s.\Delta T$ و رابطه (۱۲) می‌توان دریافت که ضریب اصلاح برای تطابق دو منحنی

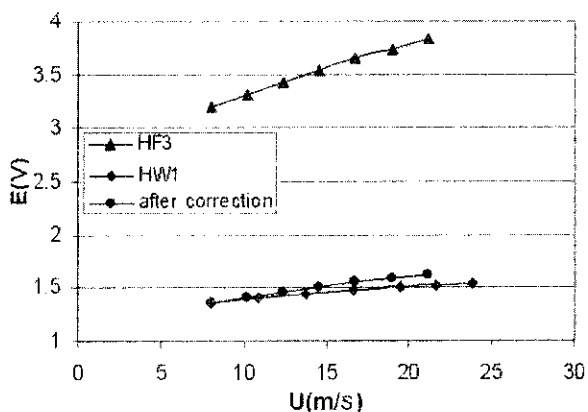
$$\text{کالیبراسیون به صورت } \left(\frac{\Delta T_{1.4}}{\Delta T_{1.6}} \right)^n \text{ خواهد بود [۱۱].}$$

با اعمال این نسبت به منحنی کالیبراسیون مربوط به $OH=1/6$ ، دو منحنی برهم منطبق می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای یک پراب مشخص چنانچه نسبت OH آن عوض شود، فقط با داشتن مقدار E_0 ها در دو نسبت فراگرمایی متفاوت، منحنی کالیبراسیون مربوط به هر نسبت فراگرمایی OH جدید را می‌توان به‌دست آورد.

به منظور اطمینان بیشتر همین آزمایش برای حسگر فیلم داغ HF1 نیز تکرار شد که نتایج آن در شکل (۱۵) ترسیم شده



شکل ۱۶ - منحنی کالیبراسیون HW1 و HW2 در $OH=1.4$ و عدم انطباق آنها پس از اعمال ضریب تصحیح.



شکل ۱۷ - منحنی کالیبراسیون HF3 و HW1 در $OH=1.4$ و عدم انطباق آنها پس از اعمال ضریب تصحیح.

۶- نتیجه گیری‌ها

از آزمایش‌های انجام شده به منظور بررسی اثر تغییر دمای تونل بر اندازه‌گیری، به نتایج زیر می‌توان اشاره کرد، البته نتایج حاصل از این تحقیق در دامنه سرعت‌های ۲ تا ۳۰ متر بر ثانیه صادق هستند و برای سرعت‌های کمتر یا بیشتر نیاز به انجام آزمایش‌های تکمیلی است.

۱- افزایش دمای سیال نسبت به شرایط کالیبراسیون سبب کاهش سرعت اندازه‌گیری شده می‌شود. این کاهش بستگی به دمای حسگر دارد و معمولاً با

اصلاح اعمال ضریب تصحیح $\left[\frac{T_w - T_\infty}{T_w - T_\infty} \right]$

می‌گردد. لذا اندازه‌گیری دقیق دمای محیط و دانستن دمای حسگر مهم است.

$E^2=A$ خواهد بود. از طرفی از رابطه (۱) می‌توان دریافت که مقدار ضرایب A و B، تابعی از R_{∞} حسگر و در نتیجه مقاومت سرد R_{∞} هستند. بنابراین با توجه به اینکه مقاومت اولیه حسگر HW2 بزرگ‌تر است، پس ضرایب کالیبراسیون آن نیز بزرگ‌تر خواهد بود.

همین امر در مقایسه منحنی کالیبراسیون سه حسگر فیلم داغ HF1، HF2، HF3 نیز مشاهده می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که اگر منحنی‌های مشخصه دو حسگر بر روی یکدیگر منطبق شده باشند، آنگاه منحنی کالیبراسیون دو حسگر نیز برهم منطبق خواهد بود.

۵-۳- مقایسه حسگرهای فیلم داغ و سیم داغ

در این بخش از تحقیق در مورد انطباق منحنی‌های کالیبراسیون دو حسگر سیم داغ و فیلم داغ بحث خواهد شد. برای یکسان‌سازی تفریبی شرایط، از یک حسگر سیم داغ HW1 با مقاومت سرد 3.5Ω و یک حسگر فیلم داغ HF3 با مقاومت سرد 3.3Ω استفاده شده است تا مشخصات آنها نزدیک به هم باشند. شکل (۱۷) منحنی کالیبراسیون این دو حسگر را در $OH=1/4$ نشان می‌دهد. منحنی کالیبراسیون فیلم داغ، در یک سرعت ثابت، دارای ولتاژ و گرادیان تغییرات بیشتری نسبت به منحنی کالیبراسیون سیم داغ در همان سرعت است. از رابطه (۱) و پارامترهای موجود در ضرایب A و B می‌توان دریافت که در یک OH ثابت، T_w فیلم داغ معمولاً بالاتر از T_w مربوط به سیم داغ بوده و همچنین از آنجایی که قطر فیلم داغ بسیار بزرگ‌تر از سیم داغ $d_{film}/d_{wire} = 25$ است، لذا مقدار این ضرایب (A و B) برای فیلم داغ بیشتر است. با جابه‌جایی و تطبیق نقطه اول دو منحنی (شکل ۱۷) و اعمال نسبت $E_{\infty wire}$ کامل برهم منطبق نمی‌شوند و ثانیاً با افزایش سرعت جریان اختلاف دو منحنی بیشتر می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهد که عملاً از منحنی کالیبراسیون حسگر سیم داغ نمی‌توان برای فیلم داغ استفاده کرد.

4. King, L.V. "On the Convection from Small Cylinders in a Stream of Fluid: Determination of the Convection Constant of Small Platinum Wires with Applications to Hot-Wire Anemometry", Phil. Trans. Roy. Soc. of London, Vol. 214, pp. 373-432, 1914.
5. Bearman, P.W. "Corrections for the Effect of Ambient Temperature Drift on Hotwire Measurements in Incompressible Flow", DISA Information, No. 2, pp.25-30, 1972.
6. Cimballa, J.M. and Park, W.J. "A Direct Hot-Wire Calibration Technique to Account for Ambient Temperature Drift in Incompressible Flow", Experiments in Fluids, Vol. 8, No. 5, pp. 298- 300, 1990.
7. Mayle, R.E. and Anderson, A. "Velocity and Temperature Profile for Stagnation Film Cooling", ASME J. Turbomach., Vol. 113, pp. 457-462, 1991.
8. Koppius A.M. and Trines G.R.M. "The Dependence of Hot-Wire Calibration on Gas Temperature at Low Reynolds Numbers", Int. J. Heat, and Mass Transfer, Vol. 19, pp. 967-974, 1976.
9. Perry A.E. "Hot-Wire Anemometry", Oxford Science Publication, Oxford, pp. 123-186, 1982.

۱۰- اردکانی، م.ع. و سالاری، م. و تقوی زنونز، ر. تحلیل تجربی عملکرد واقعی دستگاه بادسنج سیم داغ و مقایسه عملکرد پروب های سیم داغ و فیلم داغ در اندازه گیری سرعت جریان ها، سیزدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۴.

۱۱- اردکانی، م.ع. و قاسمیان، ح. و خوشنویس، ع. بررسی تجربی اثرات افزایش دمای سیال بر دقت دستگاه باد سنج سیم داغ، سیزدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۴.

۱۲- اردکانی، م.ع. و اصغری تهرانی، پ. "بررسی تجربی منحنی مشخصه و کالیبراسیون حسگرهای سیم داغ و فیلم داغ دستگاه بادسنج سیم داغ"، سیزدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۴.

- ۲- با افزایش سرعت جریان، مقدار کاهش در سرعت اندازه گیری شده نیز بیشتر می گردد. میزان این خطا بستگی به حسگر و بهره مدار الکترونیکی دارد.
- ۳- در یک سرعت ثابت، با افزایش نسبت فراگرمایی مقدار خطای اندازه گیری فوق کاهش یافته و توان رابطه اصلاحی (n) نیز کم می شود.
- ۴- برای حسگر سیم داغ در شرایط مختلف کاری، مقدار n حدود ۰/۶ و برای حسگر فیلم داغ این مقدار بین ۰/۴-۰/۶ تغییر می کند.

از آزمایش های مربوط به بررسی اثر تغییر دمای حسگر یا نسبت فراگرمایی بر اندازه گیری سرعت، مطالب زیر استنتاج می گردد:

- ۱- به دلیل تفاوت ابعادی، منحنی کالیبراسیون فیلم داغ نسبت به منحنی کالیبراسیون سیم داغ دارای گرادیان و تغییرات بیشتری است و این گرادیان با افزایش سرعت کاهش می یابد.
- ۲- منحنی کالیبراسیون برای هر حسگر منحصر به فرد بوده و نمی توان آن را برای حسگر دیگری استفاده نمود، هر چند مقدار نسبت فراگرمایی آنها یکسان باشد.
- ۳- منحنی کالیبراسیون یک نوع حسگر که در دو نسبت فراگرمایی متفاوت قرار دارند را می توان با اعمال ضریب تصحیح، بر یکدیگر منطبق کرد.
- ۴- برای استفاده از دستگاه های پرتابل، حتما باید از پراب خود دستگاه استفاده کرده و نباید آنرا با پراب دیگری جایگزین کرده در صورت وجود آلودگی روی حسگر، بهتر است دستگاه فوق در بازه های زمانی معینی کالیبره گردد.

مراجع

1. Bruun, H.H. "Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis", Oxford Science Publication, 1995.
2. Jorgensen, F.E. "How to Measure Turbulence with Hot-Wire Anemometry", 9040U6151, Tech. Report, pp. 38-50, 2002.
3. Lomas, C.G. "Fundamentals of Hot Wire Anemometry", Cambridge University Press, 1986.