

اصلاح خطای ترموکوپل جهت اندازه‌گیری توزیع شعاعی دمای شعله

علیرضا رنجبران - شرکت مهندسی و ساخت توربین مینا(توگا)
Ranjbaran.alireza@mapnaturbine.com

آزاده کبریایی - دانشگاه صنعتی شریف
Kebriaee@sharif.ir

محمد جواد اکبری - دانشگاه صنعتی شریف
Mohammadjavad.akbari@ae.sharif.ir

چکیده

امروزه استفاده از ترموکوپل با جنس مقاوم و نقطه ذوب بالا به عنوان ابزاری کارآمد، ساده و ارزان به منظور اندازه‌گیری دمای گازهای داغ حاصل از احتراق محسوب می‌شود. اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل، دارای خطای ذاتی ناشی از اتلاف تابشی و هدایتی می‌باشد و لازم است این خطا اصلاح شود. راه‌های مختلفی برای اصلاح این خطا وجود دارد که در این پژوهش از روش عددی مبتنی بر حل مستقیم استفاده شده است. در این کار، درستی نتایج با یک مطالعه مشابه اعتبارسنجی شده است. همچنین اثر دو پارامتر قطر ترموکوپل و سرعت متوسط جریان بر مقدار خطای ترموکوپل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد با افزایش قطر ترموکوپل از ۰.۵ به ۱ میلی‌متر، خطا ۵۰ درصد افزایش یافته و همچنین با افزایش سرعت متوسط جریان از ۱ به ۵ متر بر ثانیه، خطا ۴۱ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این کار روشی برای اصلاح خطای ترموکوپل با در نظر گرفتن توزیع دمای شعله پیشنهاد می‌شود. بررسی نتایج حاصل نشان می‌دهد که خطای ترموکوپل برای شرایط تست تا حداکثر ۱۲۷ درجه نیز می‌باشد که مقدار قابل توجهی بوده و اهمیت اصلاح خطا را نشان می‌دهد.

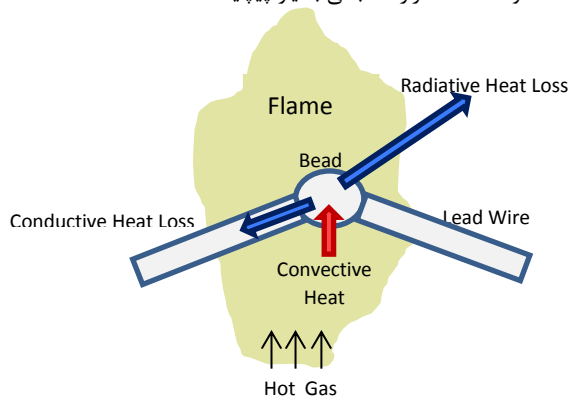
کلمات کلیدی: ترموکوپل، توزیع دمای شعله، اصلاح خطای اندازه‌گیری

مقدمه

در طول دهه‌های اخیر اندازه‌گیری دمای شعله از اهمیت قابل توجهی برخوردار بوده است. دمای شعله حاوی اطلاعات ارزشمندی در مورد نرخ واکنش‌های شیمیایی، آلاینده‌ها و بازده فرآیند احتراق است. روش‌های بسیار متنوع و مختلفی برای اندازه‌گیری دمای شعله وجود دارد که عموماً می‌توان آنها را به دو دسته اپتیک‌پایه و پروب‌پایه تقسیم‌بندی کرد. پیاده‌سازی روش‌های اپتیک‌پایه بسیار پیچیده و مشکل بوده و همچنین این روش‌ها بسیار پرهزینه هستند. در بین روش‌های پروب‌پایه ترموکوپل از مابقی ارزان قیمت‌تر، قابل اطمینان‌تر و ساده‌تر است. تاکنون ترموکوپل در شکل‌های مختلف و متنوعی ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته است مانند ترموکوپل سیم لخت^۱، غلاف‌دار^۲، مکشی^۳ و... [1]. ترموکوپل‌های لخت نسبت به انواع غلاف‌دار دارای پاسخ زمانی بهتری بوده و همچنین اثرات کمتری بر جریان درون شعله دارند.

به همین جهت تاکنون ترموکوپل‌های لخت به منظور اندازه‌گیری دمای شعله به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [2-3]. ترموکوپل از اتصال دو فلز غیر همجنس تولید شده است که در صورت اختلاف دما بین دو سر سیم، اختلاف پتانسیل در حدود چند میلی‌ولت ایجاد شده که قابل اندازه‌گیری بوده و این اختلاف پتانسیل با دمای محل اندازه‌گیری رابطه مستقیم دارد که با کالیبره کردن ترموکوپل می‌توان رابطه اختلاف پتانسیل و دمای مورد اندازه‌گیری را به دست آورد. بسته به جنس فلز مورد استفاده ترموکوپل‌ها دسته بندی می‌شوند. جنس پروب باید به گونه‌ای باشد که در شرایط محیطی شعله واکنش ندهد که بدین جهت آلیاژهای پلاتین-رادپوم مناسب‌ترین مواد هستند که ترموکوپل-های نوع S(Pt-Pt10%Rh) و B(Pt6%Rh-Pt30%Rh) که از آلیاژهای مذکور با درصد ترکیب متفاوت ساخته شده‌اند، بیشترین کاربرد را به منظور اندازه‌گیری دمای شعله دارند.

متأسفانه استفاده از ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای شعله دارای خطای ذاتی بوده که ناشی از اتلاف حرارت از طریق فرآیند انتقال حرارت تابشی^۴ و هدایتی^۵ است، بدین معنا که دمای سطح ترموکوپل در شرایط پایا از بالانس بین انتقال حرارت جابه‌جایی با جریان شعله، انتقال حرارت تشعشع با محیط اطراف و انتقال حرارت هدایت از طریق سیم‌های ترموکوپل به دست می‌آید که در شکل ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است. خطای اندازه‌گیری ترموکوپل در شعله که ناشی از اتلاف انتقال حرارت تابشی و هدایتی است، موجب می‌شود دمایی که ترموکوپل نشان می‌دهد با دمای واقعی شعله متفاوت باشد. تصحیح این خطاها خصوصاً اتلاف حرارت تابشی بسیار پیچیده است.



⁴ Radiation
⁵ Conduction

¹ Bare Wire Thermocouple
² Sheathed Thermocouple
³ Suction Pyrometry

شکل ۱- شماتیک مکانیزم انتقال حرارت در ترموکوپل

ترموکوپل و همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سیم و شعله می‌باشد و تنها به قطر سیم ترموکوپل‌های مورد استفاده و دماهای اندازه‌گیری شده متناظر بستگی دارد. دو روش مذکور بسیار ساده بوده و البته خطای ناشی از انتقال حرارت هدایتی را در نظر نمی‌گیرد. خطای ناشی از انتقال حرارت هدایتی به خصوص برای ترموکوپل‌های با قطر بزرگ و همچنین طول کوتاه بسیار پراهمیت است [2]. روش سوم تصحیح خطای ترموکوپل روش شبیه سازی عددی است که می‌تواند خطای ناشی از انتقال حرارت هدایتی را نیز اصلاح کند بنابراین از دو روش قبلی دقیق‌تر می‌باشد. روش عددی ابتدا توسط بردلی و متیو [2] پیشنهاد شد. ایشان با استفاده از تکنیک حل عددی یک ترموکوپل نوع S را به منظور تصحیح خطای ناشی از اتلاف حرارتی و هدایتی شبیه-سازی کرده و نشان دادند که همواره یک طول کمینه ترموکوپل وجود دارد که خطای ناشی از انتقال حرارت هدایتی کمینه می‌شود و پس از آن با افزایش طول خطا انتقال حرارت هدایتی ثابت می‌ماند.

یکی از مهمترین چالش‌ها در این روش این است که اصلاح دمای ترموکوپل نیازمند مقادیر مناسب ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌باشد که معمولاً از روابط موجود در پژوهش‌های پیشین برای عدد ناسلت^۷ در جریان غیر واکنشی حول استوانه و کره برای سیم و دانه ترموکوپل استفاده می‌شود [2,3]. این روابط شاید ضریب انتقال حرارت همرفتی را به طور کامل دقیق برای جریان احتراقی شعله پیش‌بینی نکند اما با دقت نسبتاً مناسب و در محدوده‌های کاری عدد رینولدز و نسبت هم‌ارزی مختلف هم به صورت تجربی و هم عددی توسط پژوهشگران متعدد توسعه داده شده است [10,11,12]. البته تاکنون تلاشهایی نیز به منظور بدست آوردن ضریب انتقال حرارت همرفتی بین ترموکوپل و جریان احتراقی شعله نیز انجام گرفته است. مقایسه نتایج تجربی ضرایب انتقال حرارت در جریان واکنشی بر اساس پژوهش هیهورست و کیتلسون [13] با روابط کرامر برای ضریب انتقال حرارت در جریان غیر واکنشی که توسط ساتو [3] استفاده شده است، نشان می‌دهد که نتایج کمتر از ۱۰ درصد با هم اختلاف دارند.

یکی دیگر از چالش‌های این روش فقدان اطلاعات دقیق برای ضریب انتقال حرارت هدایتی و تابشی برای فلزها و آلیاژهای مورد استفاده در ترموکوپل است. این اطلاعات نیز به روش‌های مختلف برای ترموکوپل-های نوع B و S که بیشتر برای اندازه‌گیری دمای شعله استفاده می-شوند، توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده است [14,15,16,17].

ضعف اصلی روش عددی بکار گرفته شده توسط بردلی و متیو و همچنین سایر پژوهشگران تاکنون این بوده که دمای شعله در معادلات ثابت فرض شده است، در حالی که بدیهی است همواره در یک فاصله مشخص از سطح برنر یک توزیع برای دمای شعله وجود دارد. همچنین حل عددی مورد استفاده تاکنون مبتنی بر روش حل تکراری بوده است یعنی ابتدا یک دمای اولیه مبتنی بر حدس برای شعله در معادلات قرار می‌گرفته و در هر مرحله اصلاح شده و روند حل تکراری تا جایی که

زیرا عدم قطعیت‌های زیاد در پارامترهایی همچون ضریب محلی انتقال حرارت جابجایی، ضریب تابشی^۱ و جذب^۲ ترموکوپل در شعله و همچنین نقطه اتصال دو سیم ترموکوپل که اصطلاحاً به سر حسگر^۳ ترموکوپل معروف است، وجود دارد.

به صورت کلی سه روش به منظور تصحیح خطاهای اندازه‌گیری در پژوهش‌های پیشین مورد استفاده قرار گرفته است، که عبارت اند از:

- ۱- روش برون‌یابی^۴
- ۲- روش چند المانی^۵
- ۳- روش شبیه سازی عددی ترموکوپل^۶

در روش برون‌یابی با استفاده از اندازه‌گیری دمای ترموکوپل با قطرهای مختلف، سعی می‌شود دمای واقعی شعله تخمین زده شود [4-7]. هنگامی که قطر سیم و سر حسگر ترموکوپل کاهش یابد، در واقع سطح در معرض تابش کاهش یافته و در نتیجه اتلاف حرارت ناشی از تابش نیز کمتر می‌شود و بنابراین دمایی که ترموکوپل نیز نشان می‌دهد به دمای واقعی گاز نزدیک تر می‌شود. لذا دمای واقعی شعله را می‌توان با استفاده از برون‌یابی دماهای بدست آمده در قطرهای مختلف به ازای قطر صفر بدست آورد چراکه به لحاظ تئوری قطر صفر اتلاف حرارت ناشی از تابش ندارد. یکی از محدودیت‌های اصلی این روش، استفاده از آن در شعله‌های آشفته می‌باشد.

در روش چند المانی نیز از دو یا سه ترموکوپل با قطرهای مختلف به منظور تخمین دمای واقعی شعله استفاده می‌شود. بروهزا و همکاران [8] و دی [9] با استفاده از اعمال معادلات ساده تعادل حرارتی روی سر حسگر ترموکوپل خطای ناشی از انتقال حرارت تابشی اصلاح کرده‌اند. برای نمونه روابط تست‌های دو و سه المانی بر اساس پژوهش دی در معادلات ۱ و ۲ نشان داده شده اند.

$$T_g = T_h \frac{T_h - T_{b_2}}{\sqrt{\frac{d_2}{d_1} \frac{T_{b_2}^4 - T_{surr}^4}{T_h^4 - T_{surr}^4} - 1}} \quad (1)$$

$$T_g = T_h \frac{\left(T_h - \sqrt{\frac{d_1}{d_3}} T_{b_3} \right) - \left(T_h - \sqrt{\frac{d_1}{d_2}} T_{b_2} \right) \frac{T_h^4 - T_{b_3}^4}{T_h^4 - T_{b_2}^4}}{\left(1 - \sqrt{\frac{d_1}{d_3}} \right) - \left(1 - \sqrt{\frac{d_1}{d_2}} \right) \frac{T_h^4 - T_{b_3}^4}{T_h^4 - T_{b_2}^4}} \quad (2)$$

در رابطه فوق زیورندهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب متناظر پارامترهای اندازه-گیری شده برای ترموکوپل با قطرهای d_1 ، d_2 و d_3 هستند. نقطه قوت این روش این است که این روابط تحلیلی مستقل از ضریب تابشی سیم

¹ Emissivity
² Absorptivity
³ Bead
⁴ Extrapolation Method
⁵ Multi-element Method
⁶ Numerical Method

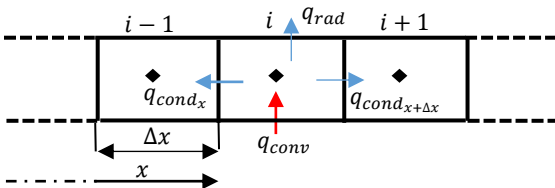
⁷ Nusselt Number

فرضیات انجام شده یعنی گاز تمیز و جسم سیاه فرض کردن محیط پیرامون، فرضیات مناسبی هستند که می توان در شرایط کاری زیادی آن را صادق دانست.

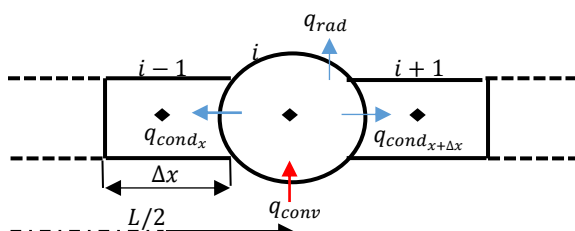
به منظور حل عددی معادله حاکم بر ترموکوپل و گسسته سازی آن از روش حل عددی حجم محدود^۲ استفاده می شود. این روش سلول-پایه برای حل عددی، موجبات گسسته سازی مناسب تر معادلات خصوصاً برای سر حسگر را فراهم می سازد. روش حل عددی المان محدود^۳ نیز توسط پژوهشگرانی مانند بردلی و متیوز^[2] استفاده شده است، اما روش المان محدود در محل نقطه های حل^۴ حساس است و به همین دلیل تغییر هندسه در محل سر حسگر را نمی تواند مدل سازی کند. در پژوهش حاضر، سر حسگر ترموکوپل به صورت یک حجم محدود کروی و سیم های دو طرف ترموکوپل نیز به صورت یک استوانه مدل سازی شده است. سلول های روش حجم محدود و نحوه تبدلات حرارتی هر سلول با سلول های مجاور و همچنین محیط پیرامون برای سیم ترموکوپل و سر حسگر آن به ترتیب در شکل های ۲ و ۳ قابل مشاهده است. در مرحله بعد معادلات بقای انرژی به صورت انتگرالی روی هر سلول نوشته شده و سپس گسسته سازی انجام می گیرد.

با توجه به شارهای حرارتی سلول مرکزی، سلول های مجاور و محیط پیرامون، شکل انتگرالی معادله بقای انرژی در حالت پایا را به صورت معادله ۴ می توان نوشت.

$$\oint dV (q_{convection} - q_{conduction} - q_{radiation}) = 0 \quad (۴)$$



شکل ۲- شماتیک سلول سیم ترموکوپل در روش عددی حجم محدود



شکل ۳- شماتیک سلول سر حسگر ترموکوپل در روش عددی حجم محدود

با استفاده از قضیه دیورژانس می توان انتگرال روی حجم را به انتگرال روی سطح تبدیل کرد که با جایگذاری روابط ۳ در رابطه ۴ و پس از

دمای محاسبه شده برای سر حسگر با دمای اندازه گیری شده برای آن توسط ترموکوپل برابر شود ادامه می یافته است. در این پژوهش روش حل عددی به منظور اصلاح دمای ترموکوپل اعمال شده و از اطلاعات موجود در سایر پژوهش ها برای ضرب انتقال حرارت همرفتی و هدایتی و تابشی استفاده می شود. همچنین بر خلاف سایر پژوهش ها که از روش حل تکراری برای بدست آوردن دمای شعله استفاده کرده اند، از روش حل مستقیم که در ادامه بیشتر توضیح داده می شود استفاده شده است. پس از اعتبارسنجی کد توسعه داده شده، اثر پارامترهای مهمی همچون قطر سیم و سرعت متوسط جریان روی خطای ترموکوپل بررسی شده و در ادامه نیز سعی می شود با استفاده از تکنیک حل مستقیم و همچنین در نظر گرفتن توزیع دمای شعله، فرایند اصلاح خطا انجام شود. لازم به ذکر است در نهایت با انجام تست های تجربی نتایج به دست آمده از اندازه گیری دما به کمک یک ترموکوپل نوع B به کمک الگوریتم پیشنهاد شده اصلاح و مورد بررسی قرار می گیرد.

معادلات حاکم و نحوه گسسته سازی

در این قسمت معادله اساسی حاکم بر ترموکوپل در شعله با در نظر گرفتن اتلاف حرارت ناشی از تابش و هدایت استخراج شده و در مورد شرایط اعتبار آن بحث می شود. برای این امر اولاً فرض می شود که محیط اطراف^۱ نسبت به تابش سیم ترموکوپل مانند جسم سیاه رفتار می کند و ثانیاً تبدلات حرارتی ناشی از تابش بین سیم ترموکوپل و گاز داغ نیز ناچیز فرض می شود، با این فرضیات برای یک المان دیفرانسیلی Δx از سیم ترموکوپل، روابط انتقال حرارت همرفتی، تابشی و هدایتی در شرایط پایا را می توان طبق روابط ۳ نوشت.

$$\begin{aligned} q_{convection} &= \pi d \Delta x (T_g - T) \\ q_{conduction} &= -\frac{\pi d^2}{4} \left(k \frac{dT}{dx} \right) \\ q_{radiation} &= \pi d \Delta x \sigma (\epsilon T_g^4 - T_{surr}^4) \end{aligned} \quad (۳)$$

فرض ناچیز دانستن تبدلات حرارتی بین گاز داغ و شعله و ترموکوپل را زمانی می توان معتبر دانست که گاز حاصل از احتراق شعله، گازی تمیز و عاری از ذرات جامد دوده باشد. بنابراین برای شعله های دیفیوژن حاوی ذرات زیاد و قابل ملاحظه دوده و سایر ذرات جامد باید یک ترم انتقال حرارت تابشی بین این ذرات و ترموکوپل نیز به معادله انتقال حرارت تابشی در روابط ۳ اضافه شود تا این معادله در چنین شرایطی نیز دارای اعتبار باشد. انتقال حرارت تابشی بین ترموکوپل و محیط پیرامون نیز بدین صورت مدل می شود که محیط پیرامون به صورت یک دیواره با رفتار جسم سیاه و با دمای ثابت محیط، عمل می کند، در غیر این صورت باید هندسه واقعی و توزیع دمای محیط پیرامون تست مدل شده و در معادلات لحاظ شود که کاری پیچیده و دشوار خواهد بود. بنابراین با توجه به توضیحات مذکور روابط ۳ برای همه شرایط معتبر نبوده ولی

² Finite Volume

³ Finite Diffrencece

⁴ Node

¹ Surrounding Wall

$$i = N_{bead} - 1$$

$$\frac{k}{\Delta x^2} T_{i-1} - \left(\frac{4h}{d} + \frac{2k}{\Delta x^2} \right) T_i + \frac{4h}{d} T_g = RHS_i$$

$$i = N_{bead}$$

$$\frac{k}{\Delta x^2} T_{i-1} + \frac{k}{\Delta x^2} T_{i+1} + \frac{4h}{\Delta x} \left(\frac{D^2}{d^2} - \frac{1}{2} \right) T_g = RHS_i \quad (7)$$

$$i = N_{bead} + 1$$

$$-\left(\frac{4h}{d} + \frac{2k}{\Delta x^2} \right) T_i + \frac{k}{\Delta x^2} T_{i+1} + \frac{4h}{d} T_g = RHS_i$$

$$i \neq N_{bead} - 1, N_{bead}, N_{bead} + 1$$

$$\frac{k}{\Delta x^2} T_{i-1} - \left(\frac{4h}{d} + \frac{2k}{\Delta x^2} \right) T_i + \frac{k}{\Delta x^2} T_{i+1} + \frac{4h}{d} T_g = RHS_i$$

اگر معادلات ۷ برای تمام سلول‌های ترموکوپل نوشته شود، یک دستگاه معادلات خطی حاصل خواهد شد که ماتریس ضرایب آن نیز برخلاف روش مورد استفاده توسط بردلی و متیوز [2] سه قطری نمی‌شود. مشاهده می‌شود که دمای حاصل از معادلات و متناظر با سلول N_{bead} همان دمای گاز خواهد بود. نکته قابل توجه در معادلات حاضر و همچنین سایر کارهای پیشین این است که دمای گاز داغ برای تمامی سلول‌ها یک مقدار ثابت در نظر گرفته شده است که این فرض نیز در ادامه پژوهش با در نظر گرفتن توزیع دما اصلاح می‌شود. حل دستگاه معادلات حاصل به روش عددی توسط کد توسعه داده شده تحت نرم افزار متلب^۳ انجام می‌گیرد. این امر بدلیل یک بعدی بودن مسئله و در نتیجه تعداد کم سلول‌های مورد نیاز به لحاظ هزینه محاسباتی نیز مقرون به صرفه می‌باشد.

اعتبارسنجی نتایج

به منظور صحت‌سنجی کد، نتایج برای یک ترموکوپل نوع S محاسبه شده و با نتایج بردلی و متیوز [2] که در شرایط یکسان انجام شده است، مقایسه می‌شوند. قطر سیم ترموکوپل مورد استفاده توسط ایشان ۱۲٫۷ میکرومتر می‌باشد. همانگونه که در مقدمه ذکر شد و در معادلات ۷ نیز مشهود است، فرایند حل عددی نیازمند اطلاعات ضریب تابشی و رسانش گرمایی ترموکوپل می‌باشد. روابط تجربی برای ضریب تابشی [14] و رسانش گرمایی [16] برای دو جنس فلز بکار رفته در ترموکوپل نوع S را می‌توان به ترتیب در معادلات ۸ تا ۱۱ مشاهده کرد.

$$\varepsilon_{Pt} = 0.136 \ln T - 0.8047 \quad (8)$$

$$\varepsilon_{Pt-10\%Rh} = 0.1357 \ln T - 0.7887 \quad (9)$$

$$k_{Pt} = 0.0198T + 64.141 \quad (10)$$

$$k_{Pt-10\%Rh} = 0.006T + 28.385 \quad (11)$$

دما در معادلات فوق بر حسب کلونین می‌باشد. میانگین مقادیر ضرایب تابشی و رسانندگی گرمایی دو سیم ترموکوپل را نیز می‌توان به عنوان ضرایب انتقال حرارت تابشی و هدایتی برای سر حسگر ترموکوپل در نظر گرفت [9]. نتایج حل عددی ترموکوپل نوع S با روابط مذکور برای ضرایب انتقال حرارت و شرایط عدد رینولدز و پرتل مشخص و حاصل از

مرتب‌سازی ترم‌ها، معادله بقای انرژی برای یک حجم معیار را می‌توان بر طبق معادله ذیل نوشت.

$$k \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} + \frac{4h}{d} (T_g - T_i) - \frac{4\sigma}{d} (\varepsilon T_i^4 - \alpha T_{surr}^4) = 0 \quad (5)$$

از معادله ۵ مشاهده می‌شود که ترم انتقال حرارت هدایتی در مرز هر سلول به روش اختلاف مرکزی^۱ که روشی مرتبه ۲ است ($O[h^2]$)، گسسته‌سازی شده است [18].

شکل ۳ نیز شماتیک سلول سر حسگر و سلول‌های مجاور و همچنین شار حرارتی بین آن‌ها را نشان می‌دهد. برای سر حسگر نیز همانند سیم کافی است معادلات انرژی را با در نظر گرفتن سطح تماس سلول سر حسگر با سلول‌های مجاور و به همان روش مذکور برای سیم، گسسته‌سازی کرد. پس از نوشتن معادلات و ساده‌سازی آن‌ها برای سر حسگر داریم:

$$k \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} + \frac{4h}{\Delta x} \left(\frac{D^2}{d^2} - \frac{1}{2} \right) (T_g - T_i) - \frac{4\sigma}{\Delta x} \left(\frac{D^2}{d^2} - \frac{1}{2} \right) (\varepsilon T_i^4 - \alpha T_{surr}^4) = 0 \quad (6)$$

روش حل عددی و محاسبه دمای شعله

همانگونه که در مقدمه نیز گفته شد تاکنون از روش حل تکراری برای تصحیح دمای شعله استفاده شده است. از جمله این کارها پژوهش هینداسگری و همکاران [18] و بردلی و متیوز [2] بوده که ایشان معادلات ۵ و ۶ را به روش ضریب تخفیف^۲ حل کرده‌اند.

در روش مورد استفاده توسط ایشان دمای گاز داغ یعنی T_g به عنوان مقداری معلوم در معادلات فرض شده و با استفاده از روش حل تکراری ابتدا یک دمای اولیه برای T_g حدس زده شده و پس از اصلاح در هر مرحله، فرایند حل تا همگرا شدن دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل با دمای سر حسگر محاسبه شده ادامه می‌یافت. در این پژوهش معادلات به گونه‌ای حل می‌شوند که دمای حاصل از اندازه‌گیری به عنوان ورودی مسئله بوده و دمای گاز داغ شعله به صورت مستقیم محاسبه شود. برای این امر کافی است علاوه بر دمای هر سلول و سلول‌های مجاور، دمای شعله نیز به عنوان مجهول در نظر گرفته شود. این روند حل برای معادلات ۵ و ۶ را می‌توان به صورت ذیل برای سلول‌های مختلف باز نویسی کرد:

¹ Central Difference Scheme

² Normal Relaxation Method

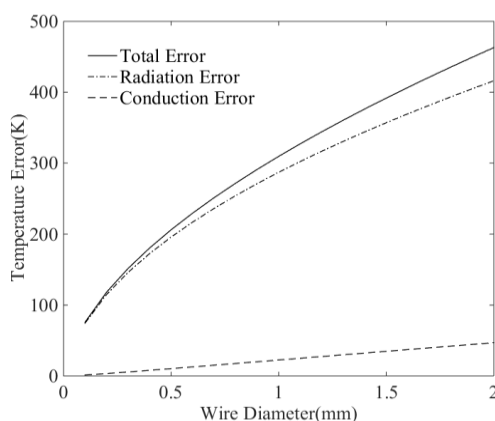
³ MATLAB

ترموکوپل به دست می‌آید. از طرفی مشاهده می‌شود که با افزایش دمای شعله خطای اندازه‌گیری ترموکوپل افزایش می‌یابد. نتایج حاضر با نتایج بردلی و متیوز در بیشترین حالت کمتر از ۰.۵ درصد اختلاف دارند که دلیل آن هم استفاده از خواص هوا در دمای شعله به جای خواص گاز داغ بوده است.

تست‌های تجربی بردلی و متیوز [2] در جدول ۱ آورده شده است. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت هدایتی گازهای داغ شعله نیز مورد نیاز است که با توجه به فقدان اطلاعات در مورد ترکیب شعله، می‌توان از خواص هوای گرم در دمای شعله استفاده کرد [18]. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با کارهای پژوهش مذکور نشان می‌دهد که نتایج قابل قبولی از اصلاح دمای

جدول ۱- مقایسه نتایج اصلاح دما برای ترموکوپل نوع S با نتایج بردلی و متیوز

no	Re_d	Pr	Nu	Bead Temperature, T_b (K)	Gas Temperature, T_g (K)	
					Present Results	Bradley and Matthews
1	0.046	0.827	0.516	599.7	599.8192	600
2	0.0137	0.745	0.457	1295.725	1302.5	1300
3	0.0065	0.76	0.442	2052.255	2110.4	2100



شکل ۴- اثر قطر سیم بر خطای ترموکوپل در شرایط $T_b = 1700K, L = 20cm, D = 2d, v = 10m/s$

با توجه به شکل ۴ می‌توان دریافت که با افزایش قطر ترموکوپل خطای ناشی از انتقال حرارت تابشی و هم چنین هدایتی نیز بیشتر می‌شود. این خطا می‌تواند در شرایط خاصی به چند صد درجه هم برسد. شکل ۵ نیز اثر سرعت متوسط جریان شعله را بر خطای اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. بر طبق شکل ۵ با افزایش سرعت جریان خطای اندازه‌گیری ترموکوپل نیز کاهش می‌یابد و البته اثر این کاهش در سرعت‌های پایین زیاد بوده و به تدریج و با افزایش سرعت اثر آن کمتر می‌شود. با افزایش سرعت جریان در واقع عدد رینولدز جریان افزایش می‌یابد و بر طبق روابط ۱۲ و ۱۳ با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد و افزایش این عدد در واقع موجب می‌شود ضریب انتقال حرارت جابجایی در سیم ترموکوپل بیشتر شود.

استقلال از شبکه برای حل عددی نیز با تغییر اندازه سلول‌ها از $0.3d$ تا $3d$ انجام گرفت. به طور مثال برای شرایطی که دمای سر حسگر حدوداً 2050 کلوین باشد، اختلاف دمای واقعی گاز داغ با دمای قرائت شده توسط ترموکوپل حدود 60 کلوین می‌باشد، در حالیکه اختلاف نتیجه به ازای این دو شبکه‌بندی تنها در حدود 0.3 درجه می‌باشد.

نتایج و بحث بر روی روند حل

پس از اعتبارسنجی کد، اثر پارامترهای مهمی همچون قطر ترموکوپل و سرعت متوسط جریان شعله را بر خطای اندازه‌گیری ترموکوپل بررسی می‌گردد. برای این منظور از یک ترموکوپل نوع S استفاده می‌شود. طول ترموکوپل به گونه‌ای انتخاب می‌شود که از حداقل طول لازم که خطای انتقال حرارت هدایتی پس از آن ثابت می‌شود، بیشتر باشد [2]. ضرایب انتقال حرارت تابشی و هدایتی نیز با استفاده از معادلات ۸ تا ۱۱ محاسبه می‌شود.

ضریب انتقال حرارت همرفتی بین ترموکوپل و جریان شعله که مستقل از جنس ترموکوپل است نیز توسط روابطی که رانز و مارشال [10] برای سر حسگر و کرامر [2] برای سیم ترموکوپل، به منظور مدل سازی عدد ناسلت ارائه داده‌اند، بدست می‌آید. این روابط به ترتیب در معادلات ۱۲ و ۱۳ آورده شده است.

$$Nu = 2 + 0.6Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (12)$$

$$Nu = 0.42Pr^{0.2} + 0.57Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (13)$$

پارامترهای انتقالی گاز داغ شعله مانند عدد پرنتل و ضریب رسانندگی گرمایی نیز با مقادیر متناظر برای هوا با استفاده از کد کنترال^۱ تخمین زده می‌شود. اثر قطر ترموکوپل بر خطای ناشی از انتقال حرارت تابشی و هدایتی برای شرایط مشخص را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد.

¹ Cantera

شده و در معادلات وارد می‌شوند، توضیحات فوق را می‌توان بر حسب روابط ذیل مدل‌سازی نمود.

$$X < X(1): \quad T_g = \frac{T_{ref} + T(1)}{2} \quad (14)$$

$$X(1) < X < X(i): \quad T_g = \alpha T_i + (1-\alpha)T_{j-1}$$

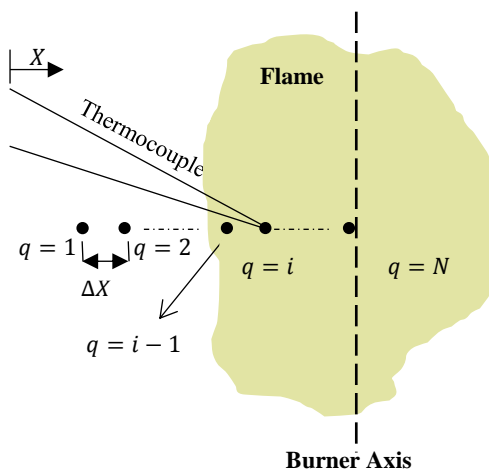
که فاصله بین نقطه X با نقطه z ام و $z-1$ ام به ترتیب برابر $(1-\alpha)\Delta x$ و $\alpha\Delta x$ می‌باشد. فرض می‌شود دمای گاز روی دو شاخه ترموکوپل نیز دارای توزیع یکسان هستند. مجهول معادلات در این حالت دمای گاز در نقطه i می‌باشد، از این رو طبق روابط ۱۴ مشاهده می‌شود که در فواصل کمتر از $X(i-1)$ دمای گاز روی ترموکوپل معلوم است و تنها توزیع دمای گاز در نقطه i مجهول می‌باشد.

به این ترتیب، با اعمال این تغییرات، روند حل جامع که به کمک آن توزیع اصلاح شده دمای گاز داغ شعله با استفاده از ترموکوپل به دست می‌آید، توسعه داده شد. با انجام این فرآیند برای تمامی نقاط حاصل از تست، در واقع توزیع دمای اصلاح شده شعله بدست می‌آید. فلوچارت فرایند اصلاح دما با در نظر گرفتن توزیع را نیز می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد.

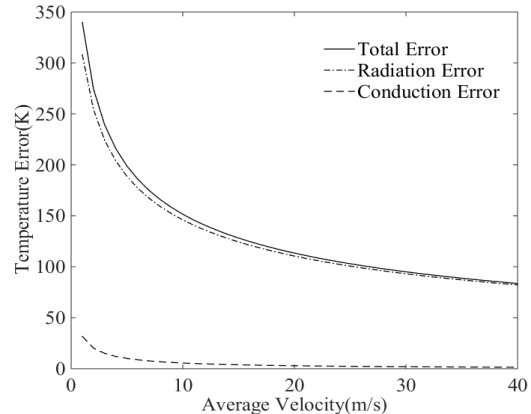
بررسی اصلاح خطای ترموکوپل

به منظور مشاهده و بررسی نتایج کد توسعه داده شده برای اصلاح خطا، با در نظر گرفتن توزیع دما، از نتایج یک آزمایش تجربی بر روی یک برنر تحقیقاتی استفاده شد.

سرعت متوسط جریان احتراقی در شرایط تست برای مقطع اندازه‌گیری ۰٫۵ متر بر ثانیه بوده است. برای اندازه‌گیری دما از ترموکوپل نوع B با قطر سیم ۰٫۵ میلی‌متر و قطر سر حسگر ۱ میلی‌متری استفاده شده است.



شکل ۶- شماتیک اصلاح دما با در نظر گرفتن توزیع شعله



شکل ۵- اثر سرعت متوسط جریان بر خطای ترموکوپل در شرایط $T_b = 1700K, L = 20cm, D = 2d, d = 0.3mm$

بدیهی است که با افزایش انتقال حرارت جابجایی از جریان احتراقی شعله به ترموکوپل، اثر ترم اتلاف حرارت ناشی از تشعشع و هدایت در معادلات نسبت به ترم انتقال حرارت همرفتی نیز کمتر می‌شود و در نهایت سبب می‌شود خطای اندازه‌گیری کمتر شود.

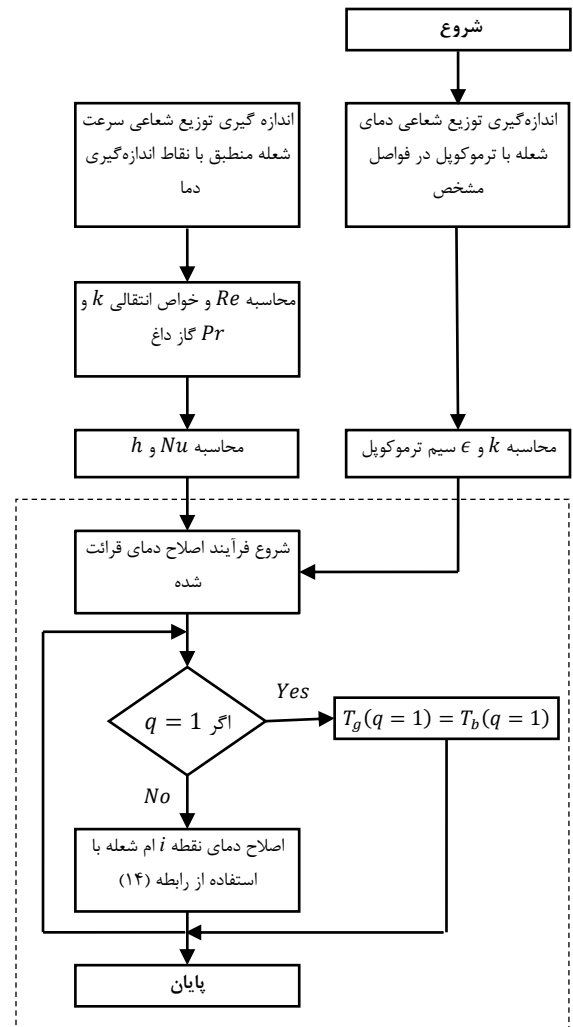
از طرفی با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان دریافت که اثر اتلاف حرارتی ناشی بسیار بیشتر از هدایت است.

همانگونه که در مقدمه هم گفته شد، عمدتاً در کارهای عددی که به منظور اصلاح خطای ترموکوپل انجام شده، دمای گاز داغ روی سراسر طول سیم ترموکوپل ثابت فرض می‌شده است. حال آنکه همواره در هر مقطع شعله با فاصله مشخص از سطح برنر یک توزیع دما وجود دارد. هدف از این بخش پیشنهاد روشی مبتنی بر حل عددی است که بر مبنای آن اصلاح دمای ترموکوپل با در نظر گرفتن توزیع دمای گاز داغ انجام می‌شود.

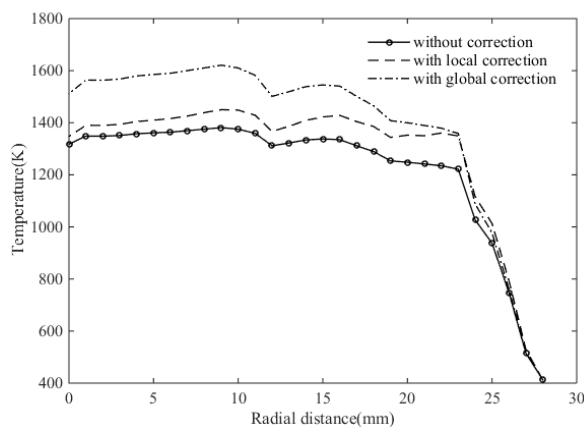
برای این منظور ابتدا لازم است توزیع دمای شعله با استفاده از اندازه‌گیری با ترموکوپل تعیین گردد. به این منظور در یک ارتفاع مشخص از سطح برنر با استفاده از ترموکوپل، دمای تعداد مشخصی نقطه با فاصله معلوم اندازه‌گیری می‌شود.

فرایند اصلاح دما از بیرونی‌ترین نقطه از محور برنر شروع می‌شود. تست اول از نقطه‌ای آغاز می‌شود که دمای آن خیلی بالا نباشد (عموماً زیر ۸۰۰ درجه) و به همین جهت دمای نقطه اول با دمای گاز در آن نقطه برابر فرض می‌شود. سپس فرایند اصلاح برای نقطه دوم به بعد با توجه به توزیع دمای اعمالی روی سیم ترموکوپل، ادامه می‌یابد. فرض کنید فرایند تصحیح در نقطه تست i ام (شکل ۶) انجام می‌شود، در این صورت دمای گاز واقعی برای بازه طول ترموکوپل کمتر از طول نقطه تست اول با میانگین دمای اندازه‌گیری شده در $q = 1$ و دمای محیط، برابر در نظر گرفته می‌شود. دمای گاز در بازه طول ترموکوپل بین طول نقطه تست اول و نقطه قبل از i ام را با استفاده از میانبایی خطی نقطه‌ای که دمای آنها در مراحل قبلی اصلاح شده‌اند، بدست می‌آید. در آخر دمای گاز بین نقطه i ام و نقطه قبلی آن نیز به صورت خطی در نظر گرفته

نتایج به دست آمده در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. شکل ۸ علاوه بر توزیع دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل، اصلاح خطای آن را با فرض در نظر گرفتن توزیع و عدم در نظر گرفتن توزیع دما نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در دماهای کمتر یعنی نقاط اولیه تست، اختلاف نتایج تخمین خطا با استفاده از دو فرض مذکور بسیار پایین است که با توجه به پایین بودن دما و کم بودن اثر ترم انتقال حرارت تابشی امری بدیهی است. با افزایش دمای اندازه‌گیری شده، مشاهده می‌شود که اختلاف نتایج چشمگیر می‌باشد. با استفاده از فرض توزیع دما روی ترموکوپل حداکثر خطا ۱۲۷ درجه و در فاصله ۲۳ میلی‌متری از محور برنر رخ می‌دهد در صورتی که بدون در نظر گرفتن این فرض حداکثر خطا ۲۴۰ درجه رخ می‌دهد. البته برای تمام نقاط متناظر می‌توان اختلاف نتایج را مقایسه کرد که بیشترین اختلاف مربوط به نقطه متناظر محور برنر است که اختلاف ۱۷۵ درجه می‌باشد. این امر با توجه به این که دمای گاز داغ روی ترموکوپل روی تمام سطح آن ثابت در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه اتلاف حرارتی ناشی از تابش نیز نسبت به حالت در نظر گرفتن توزیع دما، بیشتر بوده کاملاً مورد انتظار است. خطای فرض اصلاح محلی دما برای تمامی نقاط اندازه‌گیری شده بصورت مستقل و بدون در نظر گرفتن توزیع دما نسبت به فرض اصلاح شده‌ی در نظر گرفتن توزیع دما روی ترموکوپل در محور مشعل به بیشترین مقدار یعنی حدوداً ۶۰۰ درصد می‌رسد که این نتیجه اهمیت اصلاح خطا با فرض در نظر گرفتن توزیع دما را نشان می‌دهد. یکی دیگر از نکات مهمی که از شکل ۸ استنتاج می‌شود این است که خطای ترموکوپل علاوه بر مقدار دما، به گرادیان توزیع دما نیز بستگی دارد، بدین ترتیب که در شرایط توزیع تقریباً یکنواخت دما خطای ترموکوپل به تدریج کمتر می‌شود ولی در شرایطی که گرادیان دما وجود دارد خطای ترموکوپل نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۷- روش تصحیح خطای ترموکوپل با در نظر گرفتن توزیع دما



شکل ۸- نمودار توزیع دمای اندازه‌گیری شده و اصلاح آن

نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش عددی با رویکردی متفاوت از کارهای پیشین به منظور اصلاح خطای اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل معرفی شد. روش

اندازه‌گیری دما از خارج شعله شروع شده و با فواصل یک میلی‌متر تا محور برنر ادامه می‌یابد.

مقادیر رسانندگی گرمایی برای ترموکوپل نوع B با استفاده از تئوری ویدمان و فرانز [18] مطابق با روابط ۱۵ و ۱۶ محاسبه می‌شوند.

$$k_{Pr-6\%Rh} = 16.065 \ln T - 54.384 \quad (15)$$

$$k_{Pr-30\%Rh} = 31.383 \ln T - 134.52 \quad (16)$$

ضریب انتقال حرارت تابشی برای ترموکوپل نوع B نیز با استفاده از روابط تئوری ارائه شده توسط داویژن و ویکس [17] مطابق روابط ۱۷ و ۱۸ محاسبه می‌شوند.

$$\varepsilon_{Pr-16\%Rh} = -2 \times 10^{-8} T^2 + 10^{-4} T + 0.051 \quad (17)$$

$$\varepsilon_{Pr-30\%Rh} = -1 \times 10^{-8} T^2 + 10^{-4} T + 0.047 \quad (18)$$

حال با توجه داده‌های تجربی می‌توان با در نظر گرفتن توزیع دما، میزان خطای داده‌های تجربی را بدست آورد. این فرآیند با استفاده از کد توسعه‌داده شده بدون در نظر گرفتن توزیع نیز انجام می‌گیرد.

- 1 G. L. Selman and R. Rushforth.,1971, "The Stability of Metal-sheathed Platinum Thermocouples", *Platinum Met. Rev.*, **15**(3), 82.
- 2 D. Bradley and J. K. Matthews.,1968, "Measurement of High Gas Temperatures with Fine Wire Thermocouple", *J.Mech.Eng.Sci*, **10**(4),299.
- 3 A. Sato, K. Hashiba, M. Hastani, S. Sugiyama, and J.Kimura.,1975, "A correctional calculation method for thermocouple measurements of temperatures in flames", *Combust.Flame*, **24**, 35.
- 4 Katsuki,M.,Mizutani,Y.,Matsumoto,Y.,1987, "An improved thermocouple technique for measurement of fluctuating temperatures in flames", *Combustion and Flame*, **67**, 27-36.
- 5 Bradley, D., Lau, A.K.C., Missaghi, M.,1989, "Response of Compensated Thermocouples to Fluctuating Temperatures: Computer Simulation, Experimental Results and Mathematical Modelling", *Combustion Science and Technology*, **64**, 119-134.
- 6 Tagawa,M.,Ohta,Y.,1997,"Two-thermocouple probe for fluctuating temperature measurement in combustion—Rational estimation of mean and fluctuating time constants " ,*Combustion and Flame*, **109**, 549-560.
- 7 Hung, PC, Irwin, G, Kee, R & McLoone,S, 2005, "Difference equation approach to two-thermocouple sensor characterization in constant velocity flow environments", *Review of Scientific Instruments*, **76**, 024902-024902-10.
- 8 Brohez,S,Delvosalle.C,Marlair.G,2004, "A two thermocouples probe for radiation corrections of measured temperatures in compartment fires",*Fire Safety Journal*, **39**, 399-411.
- 9 - D. S. De.,1981, "Measurement of flame temperature with a multi-element thermocouple", *J.Inst.Energy* **54**(419), 113.
- 10 S.C.R.Dennis,J.D.A.Walker,andJ.D.Hudson.,1973, "Heat transfer from a sphere at low Reynolds numbers", *J. Fluid Mech.* **60**(2),273.
- 11 T.H.Van der Meer.,1991, "Stagnation point heat transfer from turbulent low reynolds number jets and flame jets", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **4**, 115.
- 12 C.E.Baukal,Jr,B.Gebhart,1996, "A review of empirical flame impingement heat transfer correlations " , *Int. J. Heat Fluid Flow.*, **17**, 386.
- 13 N.A.Hayhurst and B. D. Kittelson,1977, "Heat and mass transfer considerations in the use of electrically heated thermocouples of iridium versus an iridiumrhodium alloy in atmospheric pressure flames " , *Combust. Flame* ., **28**, 301.
- 14 D.Bradley and G. A. Entwistle,1961, "Determination of the emissivity, for total radiation, of small diameter platinum-10% rhodium

پیشنهاد شده مبتنی بر حل مستقیم معادلات بوده است که پس از اعتبارسنجی کد حاصل، اثر دو پارامتر مهم قطر ترموکوپل و سرعت متوسط جریان نیز برای شرایطی مشخص روی خطای اندازه‌گیری دما بررسی شد. نتایج بیانگر این حقیقت بوده که با افزایش قطر ترموکوپل مقدار خطا افزایش یافته و همچنین با افزایش سرعت متوسط جریان، خطای اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. در ادامه پژوهش روشی به منظور تخمین خطا با در نظر گرفتن توزیع دمای گاز داغ روی ترموکوپل ارائه شد. و سپس توزیع دمای شعله با استفاده از ترموکوپل نوع B با قطر ۰.۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از کد توسعه داده شده مقدار خطا با فرض در نظر گرفتن توزیع دما اصلاح شد. نتایج حاکی از آن بوده دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل در بیشترین حالت دارای ۱۲۷ درجه خطا می‌باشد که مقدار قابل ملاحظه‌ای بوده و اهمیت اصلاح خطا را نشان می‌دهد. البته داده‌های بدست آمده توسط ترموکوپل با استفاده از فرض عدم در نظر گرفتن توزیع دما نیز اصلاح شده و مقایسه نتایج حاکی از این بوده که در بیشترین حالت روی محور شعله خطای فرض ثابت بودن دما حدوداً ۶۰۰ درصد است. این مطلب اهمیت در نظر گرفتن توزیع دما برای اصلاح خطای ترموکوپل را نشان می‌دهد.

فهرست علائم

T	دما، K
L	طول ترموکوپل، m
d	قطر سیم ترموکوپل، m
D	قطر حسگر ترموکوپل، m
k	رسانندگی گرمایی، $\frac{W}{m K}$
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی، $\frac{W}{m^2 K}$
Re	عدد رینولدز،
Pr	عدد پرنتل،
Nu	عدد ناسلت،
q	نرخ انتقال حرارت، w
v	سرعت متوسط جریان، $\frac{m}{s}$
فهرست علائم یونانی	
α	ضریب جذب،
ϵ	ضریب تابش،
σ	ثابت بولتزمن، $\frac{W}{m^2 K^4}$
زیر نویس‌ها	
sur	محیط اطراف،
g	گاز داغ،
b	حسگر ترموکوپل،

مراجع

- wires in the temperature range 600-1450°C ", Br. J. Appl. Phys., **12**, 708.
- 15 C.M.Cade.,1961, "The thermal emissivity of some materials used in thermionic valve manufacture", IRE Trans. Electron Devices., **8**(1), 56.
- 16 R.W.Powell,R.P.Tye,1963, "The promise of platinum as a high temperature thermal conductivity reference material " ,Br. J. Appl. Phys. **14**, 662.
- 17 C.Davisson,J.R.Weeks,1924, "The Relation between the Total Thermal Emissive Power of a Metal and its Electrical Resistivity", J. Opt. Soc. Am., **8**, 581.
- 18 Hinasageri V.,Vedula R. P.,Prabhu S.V.,2013, "Thermocouple Error Correction for Measuring the Flame Temperature with Determination of Emissivity And Heat Transfer Coefficient", Review of Scientific Instruments., **84**, 024902.