

## تعیین توزیع شعاعی دما و سرعت در شعله به وسیله ترموکوپل

محمدجواد اکبری<sup>۱</sup>، آزاده کبریایی<sup>۲</sup> و علیرضا رنجبران<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، mohammadjavad.akbari@ae.sharif.ir

۲- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، kebriace@sharif.ir

۳- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، شرکت مهندسی و ساخت توربین مینا (توگا)، کرج، ranjbaran.alireza@mapnaturbine.com

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۱۶ دریافت آخرین اصلاحات: ۹۷/۵/۲۷، پذیرش: ۹۷/۶/۱۵)

**چکیده:** امروزه، استفاده از ترموکوپل با جنس مقاوم و نقطه ذوب بالا به عنوان ابزاری کارآمد و ارزان برای اندازه‌گیری دمای گازهای داغ در احتراق استفاده می‌شود. اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل دارای خطای ذاتی ناشی از اتلاف تابشی و هدایتی است و لازم است این خطا اصلاح شود. در این پژوهش، ابتدا، با استفاده از روش عددی ترموکوپل مدل‌سازی می‌شود و صحت کد اولیه، با مقایسه نتایج پژوهش‌های پیشین، اعتبارسنجی می‌شود. سپس، اثر، قطر ترموکوپل و سرعت متوسط جریان بر مقدار خطای ترموکوپل بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش قطر ترموکوپل از ۰/۵ به ۱ میلی‌متر، خطا ۵۰ درصد افزایش یافته و با افزایش سرعت متوسط جریان از ۱ به ۵ متر بر ثانیه، خطا ۴۱ درصد کاهش می‌یابد. در مقایسه با داده‌های یک کار تجربی، نتایج مدل‌سازی ترموکوپل نشان می‌دهد که بیشینه مقدار خطا برای ترموکوپل ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی در شرایط مورد بررسی به ترتیب برابر ۳۰/۸ و ۳۹/۶ درصد است. در ادامه پژوهش، الگوریتمی به منظور محاسبه توزیع شعاعی همزمان دما و سرعت جریان پیشنهاد شده و نتایج بیانگر دقت قابل قبول این الگوریتم برای شرایط جریان با دمای بالاست. نتایج مربوطه نشان می‌دهد که خطای الگوریتم ۲ درصد است.

**کلیدواژگان:** ترموکوپل، توزیع دمای شعله، اصلاح خطای اندازه‌گیری

### مقدمه

در طول دهه‌های اخیر، اندازه‌گیری دمای شعله از اهمیت قابل توجهی در زمینه احتراق برخوردار بوده است. دمای شعله حاوی اطلاعات ارزشمندی در مورد نرخ واکنش‌های شیمیایی، آلاینده‌ها و بازده فرایند احتراق است. روش‌های بسیار متنوع و مختلفی برای اندازه‌گیری دمای شعله وجود دارد که عموماً می‌توان آن‌ها را به دو دسته اپتیک‌پایه<sup>۱</sup> و پروب‌پایه<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی کرد. پیاده‌سازی روش‌های اپتیکی پیچیده و پرهزینه است. از طرفی، کاربرد این روش‌ها در سیستم‌های احتراق صنعتی سخت بوده و در برخی شرایط امکان‌ناپذیر است [۱].

در بین روش‌های پروب‌پایه، ترموکوپل از مابقی روش‌ها ارزان‌قیمت‌تر، قابل اطمینان‌تر و ساده‌تر است [۲]. تاکنون ترموکوپل در شکل‌های مختلفی مانند ترموکوپل سیم لخت<sup>۳</sup>، غلاف‌دار<sup>۴</sup>، مکشی<sup>۵</sup> و غیره ساخته و مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. ترموکوپل‌های لخت نسبت به انواع دیگر دارای پاسخ زمانی بهتری بوده و با استفاده از ترموکوپل با قطر میکرونی، اثرات اغتشاشی بر روی جریان احتراقی شعله قابل صرف‌نظر است [۴، ۵]. بنابراین، ترموکوپل‌های لخت به‌طور گسترده در اندازه‌گیری دمای شعله مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۶، ۷].

1. Optical Based
2. Probe Based
3. Bare Wire Thermocouple
4. Sheathed Thermocouple
5. Suction Pyrometry

استفاده از ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای شعله دارای خطای سیستماتیک است. این خطا ناشی از اتلاف حرارت از طریق فرایند انتقال حرارت تابشی<sup>۱</sup> و هدایتی<sup>۲</sup> است. دمای سطح ترموکوپل در شرایط پایا از تعادل 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 طرحواره نشان داده شده است. بنابراین، دمایی که ترموکوپل نشان می‌دهد با دمای واقعی شعله متفاوت است.

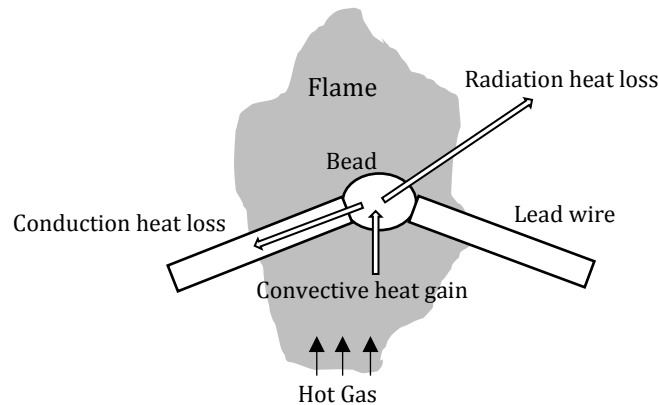


Figure 1- Schematic of the heat transfer process in thermocouple

شکل ۱- طرحواره سازوکار انتقال حرارت در ترموکوپل

تخمین و اصلاح خطای ترموکوپل پیچیده است. زیرا، عدم قطعیت‌های زیادی در پارامترهایی همچون ضریب محلی انتقال حرارت جابه‌جایی، ضریب صدور<sup>۳</sup> و جذب<sup>۴</sup> ترموکوپل در شعله و همچنین نقطه اتصال دو سیم ترموکوپل، که اصطلاحاً به حسگر<sup>۵</sup> ترموکوپل شناخته می‌شود، وجود دارد. به صورت کلی پنج روش برای تصحیح خطاهای اندازه‌گیری دمای ترموکوپل در پژوهش‌های پیشین استفاده شده است، که عبارت‌اند از:

- ۱- روش برون‌یابی<sup>۶</sup>
- ۲- روش چندالمانی<sup>۷</sup>
- ۳- روش جبران الکتریکی<sup>۸</sup>
- ۴- روش خطای تابش کاهش‌یافته<sup>۹</sup>
- ۵- روش شبیه‌سازی عددی ترموکوپل<sup>۱۰</sup>

در روش برون‌یابی، با اندازه‌گیری دمای شعله به کمک چند ترموکوپل با قطرهای مختلف و برون‌یابی مقادیر به دست آمده به ازای قطر صفر، دمای واقعی شعله تخمین زده می‌شود. زیرا به لحاظ تئوری قطر صفر اتلاف حرارت ناشی از تابش ندارد [۹-۱۳]. در روش چندالمانی نیز، از دو یا سه ترموکوپل با قطرهای مختلف به منظور تخمین دمای واقعی شعله استفاده می‌شود. در این روش، با استفاده از اعمال معادلات ساده تعادل حرارتی بر روی سر حسگر ترموکوپل، خطای ناشی از انتقال حرارت تابشی

1. Radiation
2. Conduction
3. Emissivity
4. Absorptivity
5. Bead
6. Extrapolation Method
7. Multi-element Method
8. Electrical compensation method
9. Reduced radiation error method
10. Numerical Method

اصلاح می‌شود. دی [۱۴]، با استفاده از این روش، روابطی برای تخمین خطای ناشی از اتلاف انتقال حرارت تابشی ارائه داد که مستقل از ضریب صدور سیم ترموکوپل و همچنین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین سیم و شعله بوده و تنها به قطر سیم ترموکوپل و دماهای اندازه‌گیری شده متناظر بستگی دارد.

در روش جبران الکتریکی، با مقایسه پاسخ ترموکوپل در شعله و در شرایط خلا و تحت اعمال ولتاژ بالا، خطای ترموکوپل تخمین زده می‌شود [۱۵]. در روش کاهش خطای تابش یافته، با استفاده از اعمال معادلات ساده تعادل حرارتی در شرایط پایا و فرض ثابت بودن خطای نسبی ناشی از تابش با استفاده از دو ترموکوپل با قطر متفاوت، خطای ترموکوپل تخمین زده می‌شود [۱۶]. لیمار و مینانتیو [۱۷] چهار روش مذکور را برای اصلاح خطای ترموکوپل پیاده‌سازی کرده و نشان دادند که روش جبران الکتریکی از سایر روش‌ها دقیق‌تر بوده و البته پیچیدگی آن نیز بیشتر است. از طرفی، روش کاهش خطای تابش یافته، ضمن سادگی پیاده‌سازی، از دقت مناسبی برخوردار است (۲/۱ درصد اختلاف نسبت به روش جبران الکتریکی). روش‌های برون‌یابی و چندالمانی نیز ساده بوده و دارای دقت کمتری نسبت به روش‌های جبران الکتریکی و خطای تابش کاهش یافته‌اند.

در چهار روش معرفی شده، از خطای ناشی از انتقال حرارت هدایتی صرف‌نظر شده و تنها خطای ناشی از انتقال حرارت تابشی به‌عنوان منبع خطا در نظر گرفته شده و اصلاح می‌شود. خطای ناشی از انتقال حرارت هدایتی، به‌ویژه برای ترموکوپل‌های با قطر بزرگ و طول کوتاه، اهمیت دارد [۷]. در روش مدل‌سازی عددی، خطای ناشی از انتقال حرارت تابشی و هدایتی در نظر گرفته شده، بنابراین از روش‌های قبلی دقیق‌تر است. روش عددی، ابتدا، توسط بردلی و متیو [۷] پیشنهاد شد. ایشان، با استفاده از تکنیک حل عددی، یک ترموکوپل نوع S را برای تصحیح خطای ناشی از اتلاف حرارتی و هدایتی مدل‌سازی کرده و نشان دادند که همواره یک طول کمینه برای ترموکوپل وجود دارد که خطای ناشی از انتقال حرارت هدایتی کمینه می‌شود و پس از آن، با افزایش طول، خطای ناشی از انتقال حرارت هدایتی ثابت می‌ماند. هینداسگری و همکاران [۱۸] نیز، روش مدل‌سازی عددی ترموکوپل را استفاده کرده و دمای شعله پیش‌آمیخته متان و هوا را در سه ارتفاع مشخص از سطح مشعل و با استفاده از سه ترموکوپل نوع B با قطرهای مختلف، در شرایط عدد رینولدز ۱۰۰۰ تا ۲۲۰۰، اندازه‌گیری کرده و خطای آن را محاسبه کردند. ایشان روش‌های چندالمانی و برون‌یابی را نیز انجام داده و نشان دادند که اختلاف این دو روش از مدل عددی به‌ترتیب ۲/۵ و ۴ درصد است. کیم و همکاران [۱۹]، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی دو نوع ترموکوپل سیم لخت و غلاف‌دار را در شرایط احتراقی شبیه‌سازی کرده و خطای اندازه‌گیری دمای ترموکوپل را بررسی کردند. ایشان، همچنین، نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی را با نتایج مدل‌های تجربی، که برپایه معادلات تعادل حرارتی و با فرضیات ساده استخراج شده‌اند، مقایسه کرده و نشان دادند که نتایج تطابق مطلوبی در گستره زیادی از شرایط مختلف احتراقی دارد.

غیر از پنج روش مذکور، روش‌هایی دیگری نیز به‌منظور اصلاح و یا کاهش خطای ترموکوپل استفاده شده است. کریشنان و همکاران [۲۰]، با استفاده از روش ترموکوپل چرخان<sup>۱</sup> و افزایش انتقال حرارت همرفتی، سعی در کاهش این خطا داشته‌اند. ایشان، با استفاده از روش تجربی و همچنین مدل‌سازی انتقال حرارت، رابطه‌ای برای مقدار سرعت دورانی ترموکوپل و دمای شعله پیشنهاد دادند، اما این روش رزولوشن مکانی پایینی داشته و همچنین اثرات اغتشاشی چشمگیری نیز بر جریان احتراقی شعله دارد. روبرتز و همکاران [۲۱] نیز، از ترموکوپل غلاف‌دار برای کاهش اتلاف حرارت تابشی استفاده کرده و سپس با استفاده از روش نیمه‌تجربی سعی در تخمین خطای اندازه‌گیری داشته‌اند. ژو و همکاران [۲۲] نیز، ترموکوپل را با در نظر گرفتن پاسخ زمانی آن، به‌صورت عددی و با روشی جدید، مدل‌سازی کرده و خطای ناشی از اتلاف تابشی و هدایتی و همچنین رفتار دینامیکی آن را مورد بررسی قرار داده‌اند. ایشان نتایج مدل‌سازی را با نتایج تجربی اعتبارسنجی کرده و روابطی را برای پاسخ گذرای ترموکوپل در شرایط مختلف گزارش کرده‌اند.

1. Rotating Thermocouple (RTC)

ضعف اصلی مدل عددی به کار گرفته شده توسط بردلی و متیو [۷] و هینداسگری و همکاران [۱۸] عدم در نظر گرفتن توزیع دمای گاز داغ روی سیم ترموکوپل است. ساتو و همکاران [۸] روشی برای اصلاح خطای ترموکوپل با در نظر گرفتن توزیع دما، مبتنی بر حل عددی، ارائه دادند. ایشان با استفاده از روش پیشنهادی خود پروفیل تصحیح شده دما برای یک مشعل پیش آمیخته هوا-گاز طبیعی و همچنین هوا-هیدروژن را به دست آوردند. روش پیشنهادی ایشان براساس حدس اولیه پروفیل دمای شعله، حل معادلات با استفاده از پروفیل مفروض و روند حل تکراری و اصلاح تابع توزیع دمای در نظر گرفته شده تا رسیدن به شرط همگرایی بود.

یکی از مهم ترین چالش ها در روش عددی این است که اصلاح دمای ترموکوپل نیازمند مقادیر مناسب ضریب انتقال حرارت جابه جایی است که معمولاً از روابط موجود برای عدد ناسلت<sup>۱</sup> در جریان غیرواکنشی حول استوانه و کره برای سیم و حسگر ترموکوپل استفاده می شود [۸،۷]. این ضریب با عدد رینولدز جریان و در نتیجه سرعت آن رابطه مستقیم دارد. این روابط اگرچه ممکن است ضریب انتقال حرارت همرفتی را دقیقاً برای جریان احتراقی شعله پیش بینی نکند، اما، با دقت نسبتاً مناسب و در محدوده های کاری عدد رینولدز و نسبت هم‌ارزی مختلف، هم به صورت تجربی و هم عددی، توسط پژوهشگران متعدد توسعه داده شده اند [۲۳-۲۵]. یکی دیگر از چالش های 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 روش های مختلف برای ترموکوپل های نوع B و S، که بیشتر برای اندازه گیری دمای شعله استفاده می شوند، توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده است [۲۶-۲۹]. در پژوهش های عددی پیشین، فرض بر این بوده که در هر مقطع سرعت تمامی نقاط شعله برابر با سرعت متوسط آن است، حال آنکه در این پژوهش این فرض اصلاح شده و توزیع سرعت جریان احتراقی شعله نیز در نظر گرفته می شود.

در این پژوهش، ابتدا، معادلات حاکم بر ترموکوپل با فرضیات ساده توسعه داده شده و اثر پارامترهای مهمی، همچون قطر و سرعت متوسط، با فرضیات ساده بر خطای ترموکوپل بررسی می شود. در مرحله بعد، با اعمال فرضیات جامع تر، یعنی در نظر گرفتن توزیع دما و سرعت جریان احتراقی شعله روی سیم ترموکوپل، معادلات حاکم و روش حل مسئله تشریح می شوند. در آخر نیز، الگوریتمی جدید برای تخمین خطای ترموکوپل، با هدف اندازه گیری دمای شعله با در نظر گرفتن توزیع دما و سرعت گازهای داغ شعله، ارائه می شود. سپس، با استفاده از داده های دما و سرعت یک مشعل پایدارشونده-چرخشی<sup>۲</sup>، که به صورت تجربی برای شرایط مشخص اندازه گیری شده و توسط پامپالونی و همکاران [۳۰] گزارش شده است، ابتدا، با استفاده از شبیه سازی، داده های مربوط به دمای حسگر ترموکوپل با قطر مشخص محاسبه می شود و آنگاه الگوریتم پیشنهادی برای داده های محاسبه شده اعمال می شود. در مرحله آخر نیز، بر مبنای الگوریتم توسعه داده شده، روشی برای محاسبه همزمان توزیع دما و سرعت گازهای احتراقی با استفاده از داده های ترموکوپل با دو قطر مختلف ارائه شده و این روش برای داده های تجربی نیز اعمال می شود که نتایج مربوطه صحت الگوریتم و کد توسعه داده شده را تایید می کند.

## معادلات حاکم و گسسته سازی

در این بخش، معادله اساسی حاکم بر انتقال حرارت 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<sup>۳</sup> نسبت به تابش سیم ترموکوپل مانند جسم سیاه رفتار می کند. ثانیاً، تبادلات حرارتی ناشی از تابش بین سیم ترموکوپل و گاز داغ نیز ناچیز فرض می شود. این فرض تا زمانی معتبر است که گاز حاصل از احتراق شعله، تمیز و عاری از ذرات جامد دوده باشد. با این فرضیات، برای یک المان دیفرانسیلی  $\Delta x$  از سیم ترموکوپل، با اعمال مکانیزم های انتقال حرارت همرفتی، تابشی و هدایتی در شرایط پایا، می توان رابطه (۱) را به صورت زیر نوشت.

1. Nusselt Number  
2. Swirl Stabilized  
3. Surrounding Wall

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) + \frac{4h}{d} (T_g - T) - \frac{4\sigma}{d} (\epsilon T^4 - \alpha T_{sur}^4) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه،  $T_g$  و  $T_{sur}$  به ترتیب معرف دمای محیط پیرامون و دمای گاز داغ شعله‌اند.  $h$ ،  $k$  و  $\epsilon$  و  $\alpha$  نیز به ترتیب بیانگر ضریب انتقال حرارت هدایتی، همرفتی، تابشی و جذب‌اند.  $d$  قطر سیم ترموکوپل بوده و  $\sigma$  نیز ثابت استفان-بولتزمن است. اگرچه برای شعله‌های دیفیوژن، که حاوی ذرات دوده زیادی‌اند، باید یک جمله انتقال حرارت تابشی بین این ذرات و ترموکوپل به معادله انتقال حرارت تابشی در معادله (۱) اضافه شود، فرضیات انجام‌شده را می‌توان در شرایط کاری زیادی صادق دانست. به‌منظور حل عددی معادله انتقال حرارت حاکم بر ترموکوپل و گسسته‌سازی آن، از روش حل عددی حجم محدود<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. استفاده از روش سلول-پایه برای حل عددی معادله (۱) سبب گسسته‌سازی مناسب‌تر، به‌ویژه برای حسگر، می‌شود. روش حل عددی المان محدود<sup>۲</sup> نیز توسط پژوهشگرانی مانند بردلی و متیوز [۷] استفاده شده است، اما این روش تغییر هندسه در محل حسگر ترموکوپل را نمی‌تواند مدل‌سازی کند [۱۸]. در کار حاضر، سر حسگر ترموکوپل به صورت یک حجم محدود کروی و سیم‌های دو طرف ترموکوپل به صورت یک استوانه شبیه‌سازی می‌شود. سلول‌های روش حجم محدود و نحوه تبدیلات حرارتی هر سلول با سلول‌های مجاور و محیط پیرامون برای سیم ترموکوپل و حسگر آن، در شکل‌های ۲-الف و ب قابل مشاهده است. برای گسسته‌سازی معادله (۱) بر روی هر سلول، از معادله بقای انرژی انتگرال‌گیری می‌شود.

$$\iiint_{dV} \left( \frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) + \frac{4h}{d} (T_g - T) - \frac{4\sigma}{d} (\epsilon T^4 - \alpha T_{sur}^4) \right) dV = 0 \quad (2)$$

با استفاده از قضیه دیورژانس می‌توان انتگرال روی حجم را به انتگرال روی سطح تبدیل کرد که با استفاده از این قضیه و روش گسسته‌سازی مکانی اختلاف مرکزی ( $O[h^2]$ )، بعد از مرتب‌کردن جمله‌ها، معادلات گسسته‌سازی شده بقای انرژی برای سیم و حسگر ترموکوپل، با توجه به هندسه آن‌ها، به ترتیب زیر خواهد بود.

$$k_i \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} + \frac{4h_i}{d} (T_{gi} - T_i) - \frac{4\sigma}{d} (\epsilon_i T_i^4 - \alpha_i T_{sur}^4) = 0 \quad (3)$$

$$k_i \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} + \frac{4h_i}{\Delta x} \left( \frac{D^2}{d^2} - \frac{1}{2} \right) (T_{gi} - T_i) - \frac{4\sigma}{\Delta x} \left( \frac{D^2}{d^2} - \frac{1}{2} \right) (\epsilon_i T_i^4 - \alpha_i T_{sur}^4) = 0 \quad (4)$$

با معلوم‌بودن توزیع دمای واقعی شعله و سرعت گاز داغ، معادلات گسسته‌سازی شده (۳) و (۴)، با هدف به‌دست آوردن توزیع دمای ترموکوپل، حل می‌شوند. برای حل این معادلات، از روش عددی تخفیف نرمال<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. با توجه به مفروض‌بودن دمای شعله روی هر المان، توزیع دمای ترموکوپل با استفاده از حدس اولیه مناسب و روش تکراری قابل حل است.

$$k_i \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} = W_x \quad (5)$$

با توجه به ساختار سه‌قطری ماتریس ضرایب، از الگوریتم توماس برای حل دستگاه معادلات خطی استفاده می‌شود.

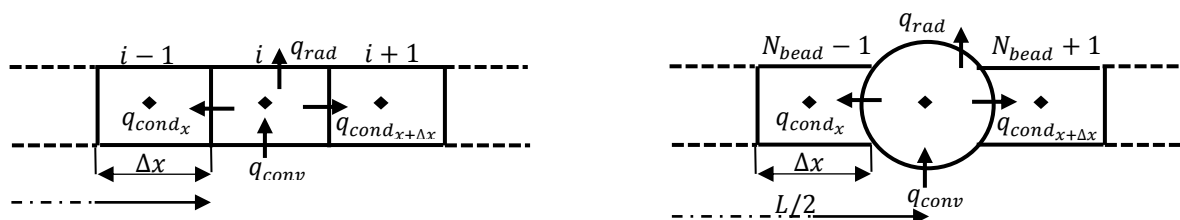


Figure 2- Schematic of thermocouple wire cell in finite volume method for (a) Lead wire and (b) Bead

شکل ۲- طرحواره سلول سیم ترموکوپل در روش عددی حجم محدود برای المان (الف) بدنه ترموکوپل و (ب) سر حسگر

1. Finite Volume
2. Finite Diffrencece
3. Normal Relaxation

## اعتبارسنجی

برای صحت‌سنجی، ابتدا، برای حالت توزیع دما و سرعت یکنواخت در تمام طول ترموکوپل، نتایج حاصل با نتایج عددی بردلی و متیوز [۷]، که در شرایط یکسان انجام شده است، مقایسه شدند. قطر سیم ترموکوپل مورد استفاده ۱۲/۷ میکرومتر بود. روابط تجربی برای ضریب صدور [۲۶] و ضریب رسانش گرمایی [۲۸] برای دو جنس فلز به کاررفته در ترموکوپل نوع S به صورت زیر است.

$$\epsilon_{Pt} = 0.136 \ln T - 0.8047 \quad (۶)$$

$$\epsilon_{Pt-10\%Rh} = 0.1357 \ln T - 0.7887 \quad (۷)$$

$$k_{Pt} = 0.0198T + 64.141 \quad (۸)$$

$$k_{Pt-10\%Rh} = 0.006T + 28.385 \quad (۹)$$

دما در معادلات بالا برحسب کلونین است. ضرایب صدور و رسانایی برای سر حسگر ترموکوپل از میانگین مقادیر ضرایب صدور و رسانایی دو سیم ترموکوپل محاسبه می‌شود [۱۴]. نتایج حل عددی ترموکوپل نوع S با روابط مذکور برای ضرایب انتقال حرارت و شرایط عدد رینولدز و پرنتل مشخص در جدول ۱ آورده شده است. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، با توجه به فقدان اطلاعات در مورد ترکیب شعله، از خواص هوای گرم در دمای شعله استفاده می‌شود [۱۸]. مقایسه نتایج حاضر با نتایج بردلی و متیوز نشان می‌دهد که در بدترین حالت، نتایج کمتر از ۰/۵ درصد اختلاف دارند که دلیل آن نیز استفاده از خواص هوا در دمای شعله به جای خواص گاز داغ بوده است.

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

Table 1- Comparison of temperature correction results for S-type thermocouple with Bradley and Matthews results

no	$Re_d$	$Pr$	$Nu$	Gas Temperature, $T_g(K)$	Bead Temperature, $T_b(K)$	
					Present Results	Bradley and Matthews
1	0.046	0.827	0.516	600	599.8927	599.7
2	0.0137	0.745	0.457	1300	1293.2	1295.725
3	0.0065	0.76	0.442	2100	2041.1	2052.255

استقلال از شبکه برای حل عددی نیز با تغییر اندازه سلول‌ها از  $0.3d$  تا  $3d$  انجام گرفت. به‌طور مثال، برای شرایطی که دمای گاز داغ  $2100$  کلونین باشد، اختلاف دمای آن با دمای خوانده‌شده توسط ترموکوپل حدود  $60$  درجه است، در حالی که اختلاف دما به‌ازای این دو شبکه‌بندی تنها در حدود  $0.3$  درجه است.

## بررسی اثرات قطر ترموکوپل و سرعت جریان بر روی دمای خوانده‌شده ترموکوپل

پس از اعتبارسنجی، اثر پارامترهای مهمی همچون قطر ترموکوپل و سرعت متوسط جریان شعله بر خطای اندازه‌گیری ترموکوپل بررسی شد. برای این منظور، از یک ترموکوپل نوع S برای شبیه‌سازی استفاده شد. طول ترموکوپل به‌گونه‌ای انتخاب شد که از حداقل طول لازم، که خطای انتقال حرارت هدایتی پس از آن ثابت می‌شود، بیشتر باشد [۷]. ضریب انتقال حرارت همرفتی بین ترموکوپل و جریان شعله، که مستقل از جنس ترموکوپل است، نیز توسط روابطی که رانز و مارشال [۲۳] برای حسگر و کرامر [۷] برای سیم ترموکوپل، به‌منظور مدل‌سازی عدد ناسلت ارائه داده‌اند، به‌دست آمد. این روابط به‌ترتیب در معادلات (۱۰) و (۱۱) آورده شده است.

$$Nu_{bead} = 2 + 0.6Re^{0.5}Pr^{0.33} \quad (۱۰)$$

$$Nu_{wire} = 0.42Pr^{0.2} + 0.57Re^{0.5}Pr^{0.33} \quad (۱۱)$$

پارامترهای انتقالی گاز داغ شعله مانند عدد پرنتل و ضریب رسانندگی گرمایی نیز با مقادیر متناظر برای هوا با استفاده از کد Cantera تخمین زده شد.

اثر قطر ترموکوپل بر خطای ناشی از انتقال حرارت تابشی و هدایتی در شکل ۳ آورده شده است. با توجه به شکل ۳، با افزایش قطر ترموکوپل، خطای ناشی از انتقال حرارت تابشی و همچنین هدایتی بیشتر می‌شود. این خطا می‌تواند در شرایط خاصی به چندصد درجه هم برسد. شکل ۴ اثر سرعت متوسط جریان شعله بر خطای اندازه‌گیری دما را نشان می‌دهد. طبق شکل ۴، با افزایش سرعت جریان، خطای اندازه‌گیری ترموکوپل نیز کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سرعت‌های پایین اختلاف دمای خوانده‌شده ترموکوپل و شعله زیاد بوده و با افزایش سرعت این خطا کاهش می‌یابد (خطای اندازه‌گیری از حدوداً ۳۴۰ درجه برای سرعت ۱ متر بر ثانیه به ۱۸۰ درجه در ۵ متر بر ثانیه رسیده است). با افزایش سرعت جریان، طبق روابط (۱۰) و (۱۱)، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در سیم ترموکوپل بیشتر شود. بدیهی است، با افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی از جریان احتراقی شعله به ترموکوپل، اثر جمله اتلاف حرارت ناشی از تشعشع و هدایت در معادلات نسبت به جمله انتقال حرارت همرفتی کمتر شده و خطای اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. از طرفی، با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، می‌توان دریافت که اثر اتلاف حرارتی تابشی بیشتر از هدایت است.

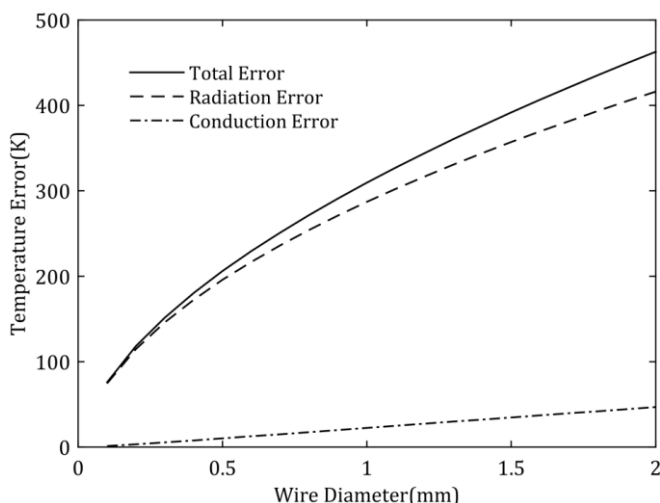


Figure 3- The effect of wire diameter on thermocouple error,  $T_b = 1700K, L = 20cm, D = 2d, v = 10m/s$   
 شکل ۳- اثر قطر سیم بر خطای ترموکوپل در شرایط  $T_b = 1700K, L = 20cm, D = 2d, v = 10m/s$

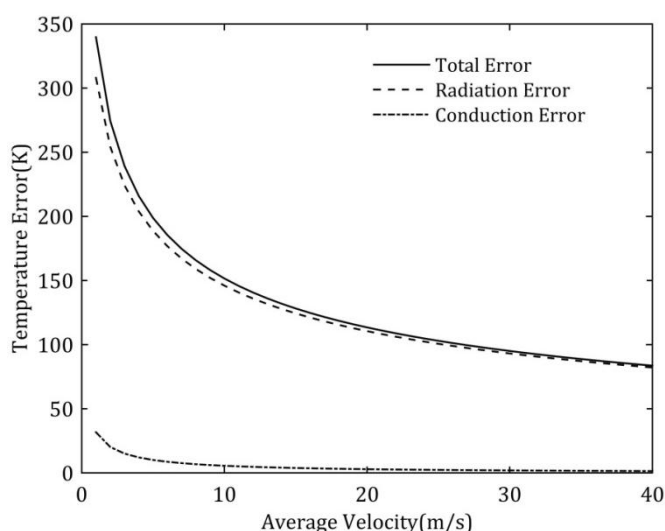


Figure 4- The effect of average flow velocity on thermocouple error,  $T_b = 1700K, L = 20cm, D = 2d, d = 0.3mm$   
 شکل ۴- اثر سرعت متوسط جریان بر خطای ترموکوپل،  $T_b = 1700K, L = 20cm, D = 2d, d = 0.3mm$

### شبیه‌سازی ترموکوپل در شعله

هدف از این بخش شبیه‌سازی ترموکوپل با در نظر گرفتن توزیع دمای گاز داغ و توزیع سرعت روی سیم ترموکوپل است. به این منظور، فرض می‌شود داده‌های مربوط به دمای گاز شعله و همچنین سرعت جریان، در نقاطی به فاصله یکسان، در ارتفاع مشخصی از سطح مشعل موجود است. برای حل معادلات (۳) و (۴) و یافتن دمای نقاط حسگر ترموکوپل، توزیع دمای گاز بین نقاط خطی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به فرض خطی بودن توزیع دما، هر چه فاصله نقاط کمتر باشد، دقت روش نیز بالاتر می‌رود. برای بررسی نتایج شبیه‌سازی، از داده‌های تجربی دما و سرعت یک مشعل پایدارشونده-چرخشی<sup>۱</sup>، که برای شرایط مشخص دما و سرعت آن اندازه‌گیری شده است [۳۰]، استفاده می‌شود. طرحواره مشعل در شکل ۵ قابل مشاهده است. داده‌های شعاعی مربوط به دما برای این مشعل در شرایط نسبت هم‌ارزی ۰/۷ با استفاده از روش اپتیکی پراکندگی رایلی<sup>۲</sup> در ارتفاع‌های مختلف از سطح مشعل اندازه‌گیری شده است. همچنین، داده‌های سرعت برای مشعل مذکور با استفاده از روش سرعت‌سنجی لیزر داپلر<sup>۳</sup> اندازه‌گیری شده است. داده‌های مورد استفاده ۲۵ نقطه با فاصله ۱ میلی‌متر است. منحنی‌های توزیع دما و سرعت نتایج تجربی در ارتفاع ۱۰ میلی‌متری از سطح مشعل، پس از برازش، در شکل ۶ نشان داده شده است.

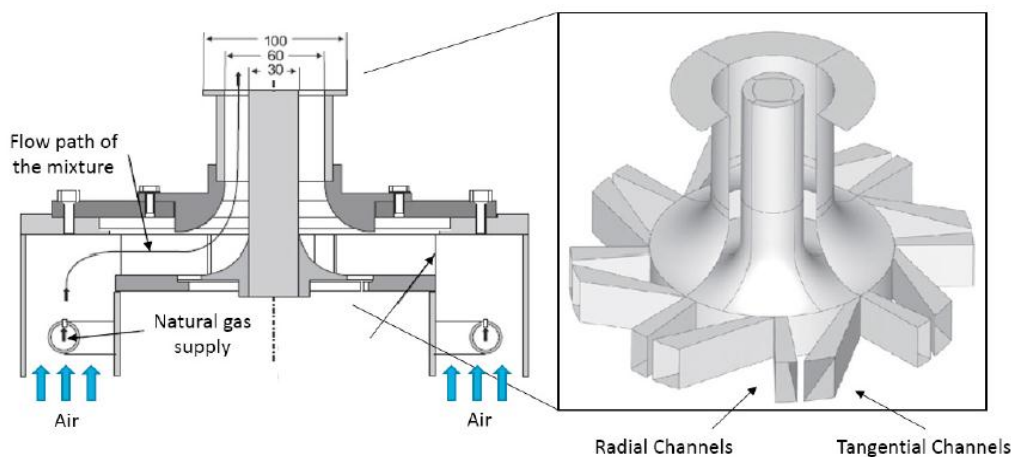


Figure 5- Schematic of Burner studied by Pampaloni et al. [30]

شکل ۵- طرحواره برنر مورد مطالعه توسط پامپالونی و همکاران [۳۰]

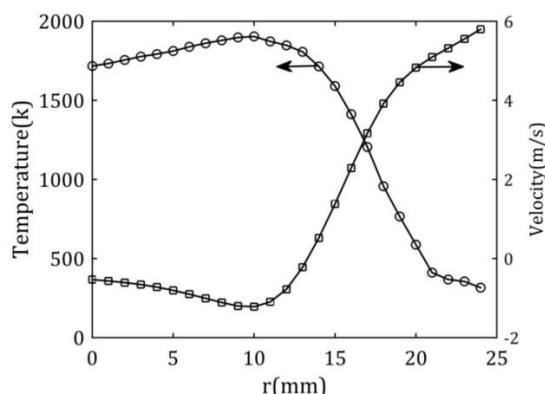


Figure 6- Temperature and velocity Distribution of Burner studied by Pampaloni et al. [26]

شکل ۶- توزیع دما و سرعت برنر مورد مطالعه توسط پامپالونی و همکاران [۲۶]

1. Swirl Stabilized
2. Rayleigh scattering
3. Laser Doppler Velocimetry (LDV)



با فرض استفاده از ترموکوپل نوع B برای اندازه‌گیری دمای این مشعل، مقادیر ضریب رسانایی گرمایی با استفاده از تئوری ویدمان و فرانز [۱۸]، مطابق با روابط (۱۲) و (۱۳)، محاسبه می‌شوند.

$$k_{Pt-6\%Rh} = 16.065 \ln(T) - 54.389 \quad (12)$$

$$k_{Pt-30\%Rh} = 31.383 \ln(T) - 134.52 \quad (13)$$

ضریب صدور تابشی برای ترموکوپل نوع B نیز با استفاده از روابط تئوری ارائه‌شده توسط داویژن و ویکس [۲۹]، مطابق روابط (۱۴) و (۱۵)، به‌دست می‌آید.

$$\epsilon_{Pt-6\%Rh} = -2 \times 10^{-8} T^2 + 0.0001T + 0.051 \quad (14)$$

$$\epsilon_{Pt-30\%Rh} = -1 \times 10^{-8} T^2 + 0.0001T + 0.047 \quad (15)$$

نتایج شبیه‌سازی برای دو ترموکوپل با قطر ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی در شکل ۷ آورده شده است. با توجه به شکل ۷، مشاهده می‌شود که در دماهای پایین، خطای ترموکوپل اندک است و با نزدیک شدن به محور مشعل و در نتیجه افزایش دمای گاز، مقدار خطای ترموکوپل نیز، افزایش می‌یابد. این افزایش خطای ناشی از دو عامل است. اول اینکه اتلاف حرارتی ناشی از تابش با توان چهارم دما رابطه داشته و از این رو با افزایش دما، خطای نیز افزایش می‌یابد. از طرفی، طبق پروفیل سرعت، با نزدیک شدن به محور مشعل سرعت جریان کاهش می‌یابد که این امر نیز در افزایش خطای اثرگذار است. به‌طور مثال، در فاصله ۱۳ میلی‌متری از محور مشعل، ترموکوپل با قطر ۳۰۰ میکرون دارای خطای بیشینه ۵۵۶/۶۵۱ درجه سانتی‌گراد (در حدود ۳۰/۸ درصد) است که با توجه به کمترین مقدار سرعت در این نقطه این نتیجه مورد انتظار نیز است. همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، هرچه قطر ترموکوپل بیشتر باشد، خطای متناظر نیز بیشتر خواهد بود. بیشینه خطای در ترموکوپل ۵۰۰ میکرونی در حدود ۷۱۶/۳ درجه سانتی‌گراد (۳۹/۶ درصد) است که اهمیت تخمین خطای ترموکوپل را نشان می‌دهد.

از آنجا که در کاربردهای واقعی هدف به‌دست آوردن توزیع دمای گاز داغ شعله با استفاده از ترموکوپل است، در ادامه، کار الگوریتمی برای تخمین خطای ترموکوپل و با در نظر گرفتن توزیع سرعت و دما روی سیم آن، پیشنهاد می‌شود.

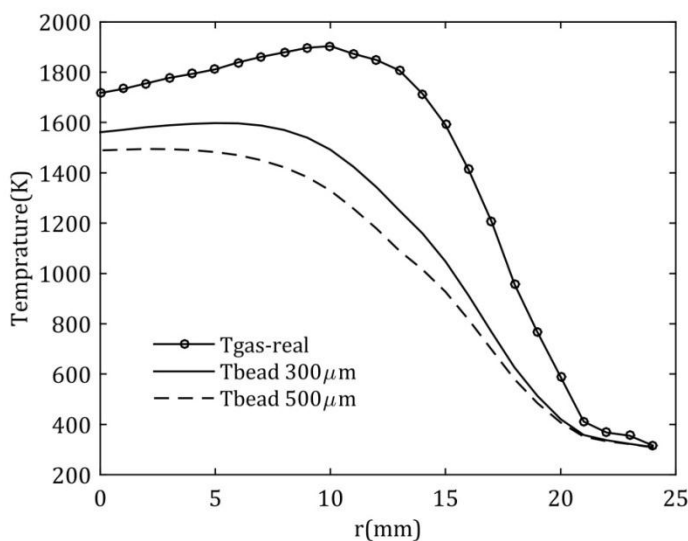


Figure 7- Bead temperature simulation of thermocouple

شکل ۷- شبیه‌سازی دمای حسگر ترموکوپل

### تخمین خطای ترموکوپل در خواندن توزیع دمای شعله

در این بخش، معادلات به‌گونه‌ای حل می‌شوند که دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل در نقاط مختلف شعله و توزیع سرعت به‌عنوان ورودی‌های مسئله بوده و دمای گاز داغ، به‌صورت مستقیم، محاسبه می‌شود. در این صورت، علاوه بر دمای المان‌های ترموکوپل، دمای شعله نیز به‌عنوان مجهول در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب، معادلات (۳) و (۴) به‌صورت زیر برای سلول‌های مختلف قابل بازنویسی‌اند:

$$\begin{aligned}
 & i = N_{\text{bead}} - 1 \\
 & \frac{k_i}{\Delta x^2} T_{i-1} - \left( \frac{4h_i}{d} + \frac{2k_i}{\Delta x^2} \right) T_i + \frac{4h_i}{d} T_{g_i} = RHS_{N_{\text{bead}}-1} \\
 & i = N_{\text{bead}} \\
 & \frac{k_i}{\Delta x^2} T_{i-1} + \frac{k_i}{\Delta x^2} T_{i+1} + \frac{4h_i}{\Delta x} \left( \frac{D^2}{d^2} - \frac{1}{2} \right) T_{g_i} = RHS_{N_{\text{bead}}} \\
 & i = N_{\text{bead}} - 1 \\
 & - \left( \frac{4h_i}{d} + \frac{2k_i}{\Delta x^2} \right) T_i + \frac{k_i}{\Delta x^2} T_{i+1} + \frac{4h_i}{d} T_{g_i} = RHS_{N_{\text{bead}}+1} \\
 & i \neq N_{\text{bead}} - 1, N_{\text{bead}}, N_{\text{bead}} + 1 \\
 & \frac{k_i}{\Delta x^2} T_{i-1} - \left( \frac{4h_i}{d} + \frac{2k_i}{\Delta x^2} \right) T_i + \frac{k_i}{\Delta x^2} T_{i+1} + \frac{4h_i}{d} T_{g_i} = RHS_i \tag{۱۶} \\
 & B.C.: T(x=0) = T(x=L) = T_{\text{sur}}
 \end{aligned}$$

در معادلات (۱۶)، دمای سیم ترموکوپل در همه سلول‌ها به‌جز سلول حسگر و همچنین دمای گاز داغ مجهول‌اند:

$$T_i, \quad i = 2, 3, \dots, N - 1, \quad i \neq N_{\text{bead}}, \quad T_{g_k}, \quad k = 1, 2, \dots, K$$

از آنجا که معادلات (۱۶) را برای همه سلول‌ها، جز سلول اول و آخر، می‌توان نوشت، این مسئله به‌ازای هر نقطه اندازه‌گیری دارای  $N - 3 + K$  مجهول و  $N - 2$  معادله است. لذا، در ادامه، یک روند حل برای محاسبه مجهولات مسئله ارائه می‌شود.

بر پایه این الگوریتم، در یک ارتفاع مشخص از سطح مشعل، دمای تعداد مشخصی نقطه با فاصله معلوم با استفاده از ترموکوپل، مطابق شکل ۸، اندازه‌گیری می‌شود. فرایند انجام آزمون از بیرونی‌ترین نقطه از محور مشعل شروع می‌شود. تست اول در نقطه‌ای انجام می‌شود که دمای آن تقریباً با دمای محیط برابر باشد. به‌همین دلیل، دمای نقطه اول با دمای گاز در آن نقطه برابر فرض می‌شود. ادامه فرایند تعیین دمای گاز داغ، برای نقطه دوم به بعد نیز، با پیشروی به سمت محور شعله ادامه پیدا می‌کند. برای بیان توزیع دمای گاز داغ بر روی ترموکوپل می‌توان گفت که اگر فرایند تصحیح در نقطه آزمون زام در شکل ۸ انجام شود، در این صورت دمای گاز شعله طبق معادله (۱۷) روی طول سیم ترموکوپل اعمال می‌شود.

$$\begin{aligned}
 X < X(q=1): & \quad T_g = \frac{T_{\text{sur}} + T(q=1)}{2} \\
 X(q=1) < X < X(q=j): & \quad T_g = \alpha T_j + (1 - \alpha) T_{j-1}
 \end{aligned} \tag{۱۷}$$

که فاصله بین نقطه  $X$  با نقطه زام و  $1 - \alpha$  زام به ترتیب برابر  $(1 - \alpha)\Delta X$  و  $\alpha\Delta X$  است. فرض می‌شود دمای گاز روی دو شاخه ترموکوپل دارای توزیع یکسان است. مجهول معادلات در این حالت دمای گاز در نقطه  $Z$  است، از این رو، طبق روابط (۱۷)، در فواصل کمتر از  $X(q=j-1)$  دمای گاز روی ترموکوپل مشخص و معلوم است و تنها دمای گاز در نقطه زام مجهول است. بنابراین، در آزمون تعیین دما در نقطه زام، می‌توان معادلات (۱۶) را برای تمام سلول‌های ترموکوپل نوشت. در نتیجه، یک دستگاه معادلات خطی حاصل خواهد شد. حل دستگاه معادلات حاصل، به‌روش عددی، توسط کد توسعه داده‌شده تحت نرم‌افزار متلب انجام می‌گیرد. به‌دلیل یک‌بعدی بودن مسئله و در نتیجه تعداد کم سلول‌های مورد نیاز، این روش از لحاظ هزینه محاسباتی زمان‌بر نیست. بنابراین، اگر الگوریتم توضیح داده‌شده برای همه نقاط تست به ترتیب اعمال شود، در حقیقت، توزیع اصلاح‌شده دمای گاز داغ شعله حاصل می‌شود. فلوجارت فرایند اصلاح دما با معلوم در نظر گرفتن توزیع سرعت در شکل ۹ آورده شده است.

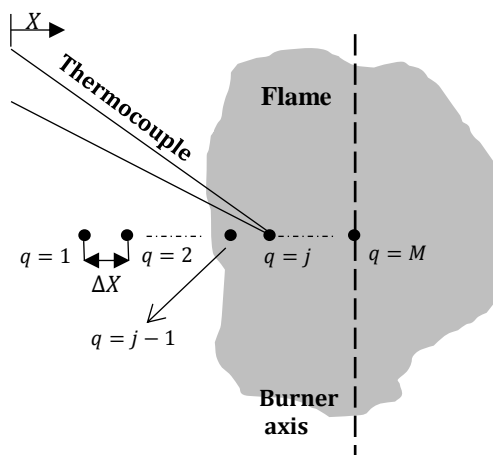


Figure 8- Schematic of temperature correction with regard to the distribution of flame temperature  
 شکل ۸- طرحواره اصلاح دما با در نظر گرفتن توزیع دمای شعله

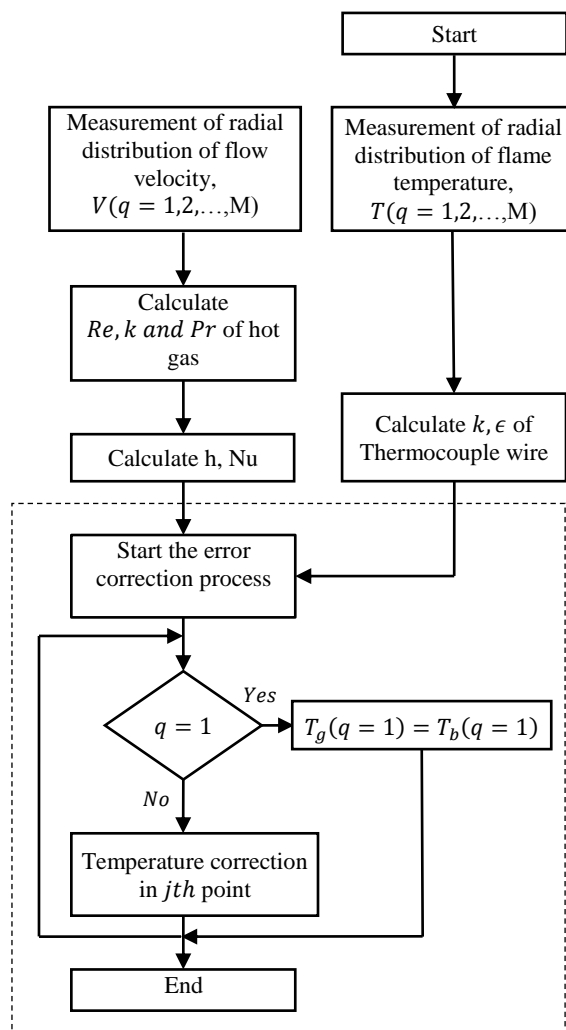


Figure 9- Thermocouple error correction method with respect to temperature distribution  
 شکل ۹- روش تصحیح خطای ترموکوپل با در نظر گرفتن توزیع دما

برای بررسی صحت الگوریتم مذکور، داده‌های مربوط به سرعت در شکل ۶ برای ترموکوپل ۳۰۰ میکرونی استفاده شد. نتایج به‌دست آمده برای تخمین دمای گاز شعله با استفاده از الگوریتم شکل ۹، در شکل ۱۰، نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰، مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی برای پیش‌بینی دمای گاز واقعی تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارد و بیشترین اختلاف در حدود ۲ درصد است.

طبق الگوریتم پیشنهادی، به‌منظور به‌دست‌آوردن دمای واقعی گازهای داغ، کافی است سرعت جریان به‌عنوان ورودی الگوریتم در نظر گرفته شود. اندازه‌گیری سرعت جریان احتراقی شعله به‌علت نیاز به تجهیزات اپتیکی، فرایند پیچیده و پرهزینه‌ای است. برای رفع این مشکل، در ادامه، الگوریتمی پیشنهاد می‌شود که توزیع دمای گاز و سرعت به‌طور همزمان، با استفاده از فرضیات مذکور در بخش قبل، پیش‌بینی شود. برای این کار، فرایند اندازه‌گیری دما با استفاده از دو ترموکوپل با قطرهای متفاوت، طبق روش پیشنهادی در شکل ۸، برای شرایط یکسان انجام می‌گیرد. سپس، فرایند پیش‌بینی دما و سرعت از اولین نقطه اندازه‌گیری آغاز شده و تا محور مشعل ادامه می‌یابد.

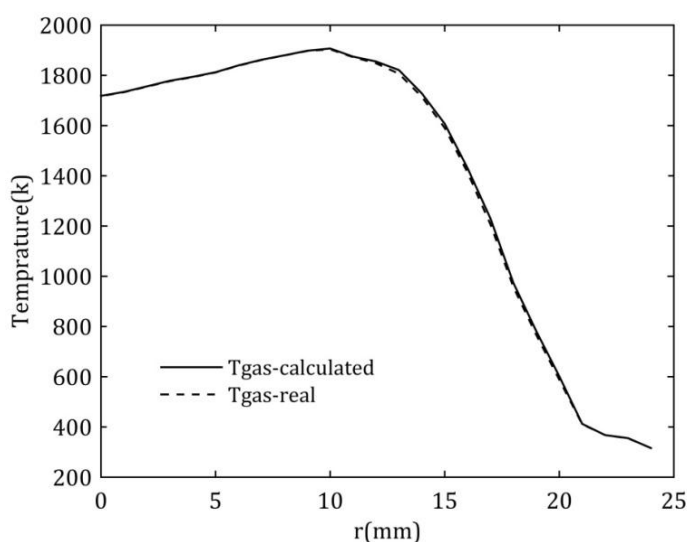


Figure 10- Distribution of calculated gas temperature from the algorithm for 300 micron thermocouple data

شکل ۱۰- توزیع دمای گاز محاسبه شده از الگوریتم برای داده‌های ترموکوپل ۳۰۰ میکرونی

در روند سعی و خطا، در هر نقطه تست، یک مقدار مشخص برای سرعت پیش‌بینی شده و با استفاده از آن دمای گاز داغ متناظر با دمای هر دو ترموکوپل محاسبه می‌شود. سپس، با توجه به اختلاف دماهای به‌دست‌آمده، سرعت اصلاح شده و فرایند اصلاح، تا جایی که دمای گاز محاسبه شده متناظر برای دو ترموکوپل برابر شود، ادامه می‌یابد. با انجام این الگوریتم برای همه نقاط تست، توزیع سرعت و دمای گاز داغ با هم به‌دست می‌آید. فلوجارت الگوریتم در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

به‌منظور بررسی و صحت‌سنجی، داده‌های مربوط به دمای حسگر متناظر با قطر ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرون به‌عنوان ورودی مسئله در نظر گرفته می‌شود. نتایج در شکل ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. طبق شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که توزیع به‌دست‌آمده دمای گاز داغ شعله از دقت بسیار مناسبی برخوردار است و اختلاف در بیشترین حالت در حدود ۱/۵ درصد است. بررسی نتایج شکل ۱۳ نشان می‌دهد که سرعت به‌دست‌آمده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی داده‌های تجربی را به‌صورت کلی دنبال می‌کند. هرچند که دقت سرعت محاسبه شده در فواصل شعاعی زیاد از محور مشعل به‌نسبت کم بوده، با نزدیک شدن

به محور مشعل دقت نیز افزایش یافته و از فاصله ۱۰ میلی متری تا محور مشعل می توان گفت که نتایج با داده های تجربی با دقت خوبی برابر است. علت این امر را می توان این گونه توجیه کرد که در فواصل دورتر از محور مشعل، مقدار دما کم بوده و در دمای کم، اصولاً، مقدار خطای ترموکوپل هم اندک بوده و در نتیجه سرعت جریان در این حالت اثر کمتری بر مقدار دما دارد. به همین جهت، در دماهای پایین، این روش به صورت دقیق نمی تواند سرعت را پیش بینی کند.

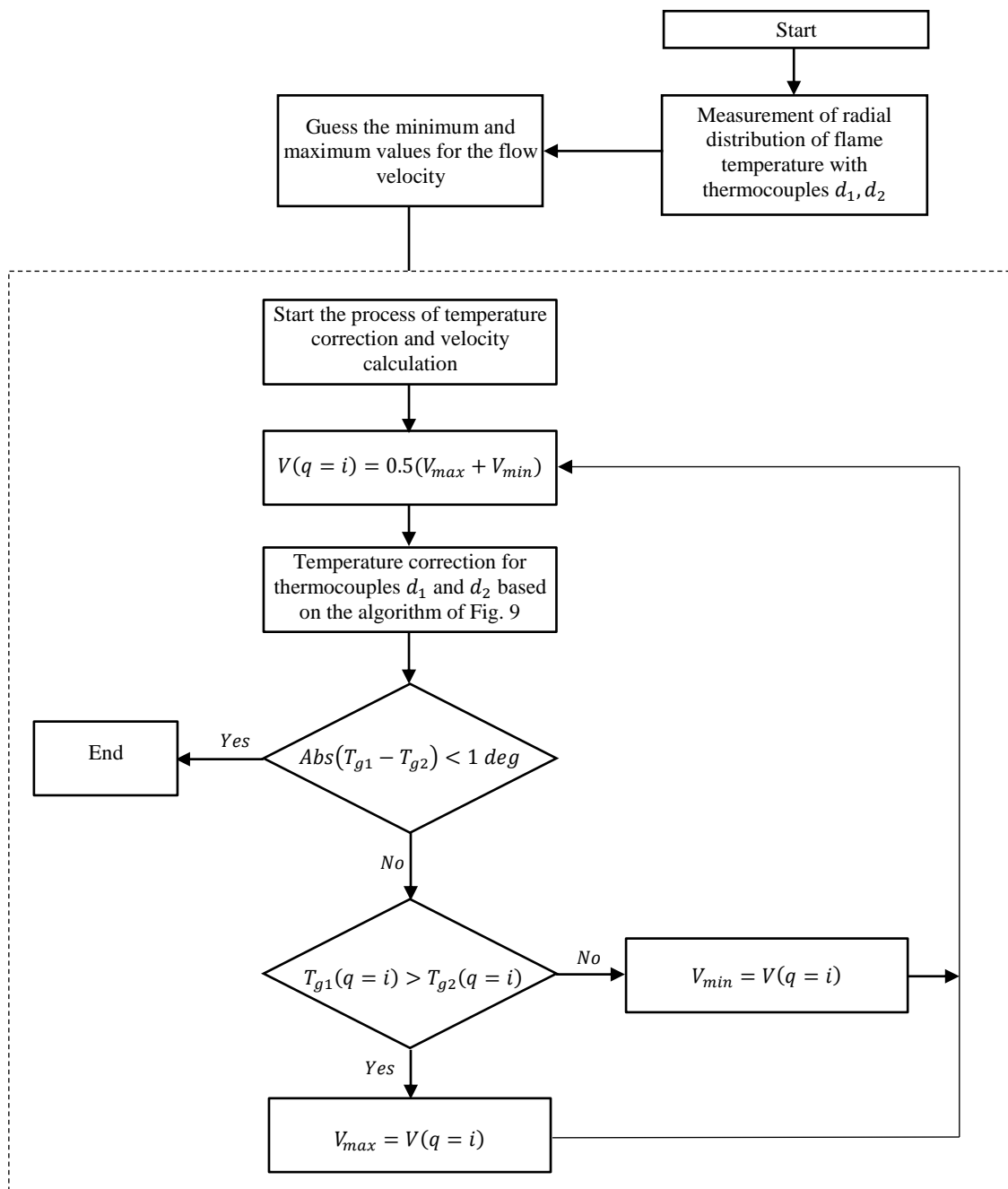


Figure 11- The method of estimating temperature and velocity and Calculation their radial distribution

شکل ۱۱- روش تخمین دمای گاز و سرعت و محاسبه توزیع شعاعی آنها

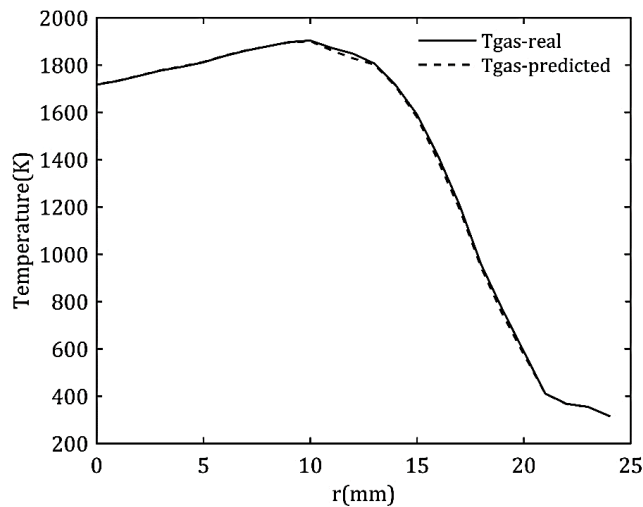


Fig. 12 Distribution of gas temperature by using the algorithm for obtaining velocity and temperature  
 شکل ۱۲ توزیع دمای گاز به دست آمده با استفاده از الگوریتم به دست آوردن سرعت و دما

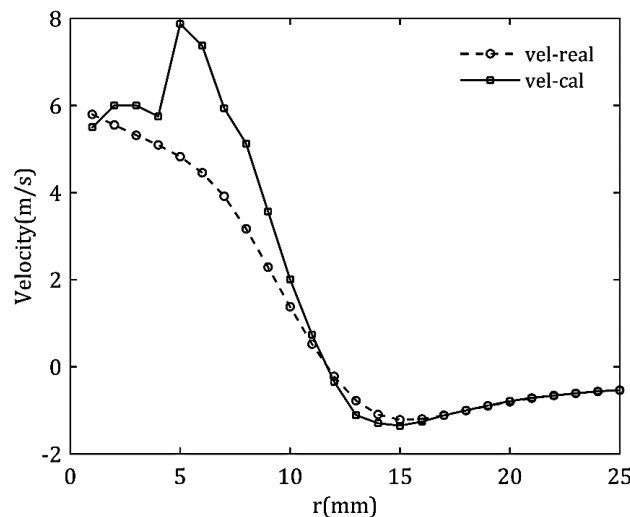


Fig. 13 Distribution of gas velocity by using the algorithm for obtaining velocity and temperature  
 شکل ۱۳ توزیع سرعت به دست آمده با استفاده از الگوریتم به دست آوردن سرعت و دما

## نتیجه گیری

در این پژوهش، روش عددی با رویکردی متفاوت از کارهای پیشین، به منظور اصلاح خطای اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل معرفی شد. ابتدا، با در نظر گرفتن توزیع دما و سرعت یکنواخت روی سطح ترموکوپل، اعتبارسنجی کد حاصل بررسی شد. سپس، اثر دو پارامتر مهم قطر ترموکوپل و سرعت متوسط جریان برای شرایط مشخص روی خطای اندازه‌گیری دما بررسی شد. نتایج بیانگر آن بودند که با افزایش قطر ترموکوپل مقدار خطا افزایش یافته و همچنین با افزایش سرعت متوسط جریان، خطای اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. سپس، معادلات با فرض عدم توزیع یکنواخت سرعت و دما توسعه داده شد و با استفاده از داده‌های پژوهش تجربی پیشین، با فرض استفاده از دو ترموکوپل ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی، خطای اندازه‌گیری شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل نشان داد که بیشینه مقدار خطا برای ترموکوپل ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی، به ترتیب، برابر ۳۰/۸ و ۳۹/۶ درصد است.

بنابراین، در ادامه پژوهش، الگوریتمی برای تخمین دمای شعله با همان فرضیات شبیه‌سازی ارائه شد. در این الگوریتم، با معلوم فرض کردن توزیع سرعت گاز داغ اطراف سیم ترموکوپل و خواندن دمای شعله به کمک ترموکوپل، توزیع واقعی شعاعی دمای شعله تعیین شد. بررسی داده‌های شبیه‌سازی شده ترموکوپل ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرونی نشان داد که مقدار خطای الگوریتم در حدود ۲ درصد است. با توجه به فقدان داده‌های توزیع سرعت، در ادامه کار، روشی به منظور توزیع همزمان دما و سرعت جریان، بر پایه اندازه‌گیری دما به کمک دو ترموکوپل و روش سعی و خطا، پیشنهاد شد. نتایج بررسی این الگوریتم نشان داد که خطای این روش برای تخمین دمای شعله ۱/۵ درصد است. همچنین، دقت این روش در اندازه‌گیری سرعت در دماهای بالا قابل قبول است. در حالی که در دماهای پایین، به علت حساسیت کمتر دمای خوانده شده توسط ترموکوپل به مقدار سرعت، خطای محاسبه سرعت بیشتر است.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت ساخت و مهندسی توربین مینا (توگا) برای تأمین هزینه‌های تحقیقاتی این پژوهش، تحت عنوان مطالعات تجربی بر روی مشعل تحقیقاتی آزمایشگاه احتراق، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## منابع

1. A. C. Eckbreth, *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, Vol. 3, Amsterdam, Netherlands, Gordon and Breach Publisher, 1996.
2. A. H. Khalid and K. Kontis, "Thermographic phosphors for high temperature measurements: principles, current state of the art and recent applications," *Sensors*, 8, No. 9, 2008, pp. 5673-5744.
3. C. R. Shaddix, "Correcting thermocouple measurements for radiation loss: a critical review," *Proceedings of the 33rd National Heat Transfer Conference*, Albuquerque, New Mexico, 1999.
4. G. L. Selman and R. Rushforth, "The Stability of Metal-sheathed Platinum Thermocouples," *Platinum Metals Review*, 15, No. 3, 1971, pp. 82-89.
5. A. G. Tereshchenko, D. A. Knyaz'kov, P. A. Skovorodko, A. A. Paletsky, and O. P. Korobeinichev, "Perturbations of the flame structure due to a thermocouple. I. Experiment," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 47, No. 4, 2011, pp. 403-414.
6. P. A. Skovorodko, A. G. Tereshchenko, A. A. Paletsky, D. A. Knyaz'kov, and O. P. Korobeinichev, "Perturbations of the flame structure due to a thermocouple. II. Modeling," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 47, No. 4, 2011, pp. 414-426.
7. D. Bradley and J. K. Matthews, "Measurement of High Gas Temperatures with Fine Wire Thermocouple," *Journal of Mechanical Engineering Science*, 10, No. 4, 1968, pp. 299-305.
8. A. Sato, K. Hashiba, M. Hastani, S. Sugiyama, and J. Kimura, "A correctional calculation method for thermocouple measurements of temperatures in flames," *Combustion and Flame*, 24, 1975, pp. 35-41.
9. M. Katsuki, Y. Mizutani and Y. Matsumoto, "An improved thermocouple technique for measurement of fluctuating temperatures in flames," *Combustion and Flame*, 67, 1987, pp. 27-36.
10. D. Bradley, A. K. C. Lau and M. Missaghi, "Response of Compensated Thermocouples to Fluctuating Temperatures: Computer Simulation, Experimental Results and Mathematical Modelling," *Combustion Science and Technology*, 64, 1989, pp. 119-134.
11. M. Tagawa and Y. Ohta, "Two-thermocouple probe for fluctuating temperature measurement in combustion Rational estimation of mean and fluctuating time constants," *Combustion and Flame*, 109, 1997, pp. 549-560.
12. P. C. Hung, G. Irwin, R. Kee, and S. McLoone, "Difference equation approach to two-thermocouple sensor characterization in constant velocity flow environments," *Review of Scientific Instruments*, 76, No. 2, 2005, p. 024902.
13. G. E. Daniels, "Measurement of gas temperature and the radiation compensating thermocouple," *Journal of Applied Meteorology*, 7, No. 6, 1968, pp. 1026-1035.
14. D. S. De, "Measurement of flame temperature with a multi-element thermocouple," *Journal of the Institute of Energy*, 54, 1981, pp. 113-16.
15. F. H. Holderness, J. R. Tilston, and J. J. MacFarlane, "Electrical Compensation for Radiation Loss in Thermocouples," *National Gas Turbine Establishment*, Note No. NT, 1969, p. 758.
16. S. Brohez, C. Delvosalle, and G. Marlair, "A two-thermocouple probe for radiation corrections of measured temperatures in compartment fires," *Fire Safety Journal*, 39, No. 5, 2004, pp. 399-411.
17. R. Lemaire and S. Menanteau, "Assessment of radiation correction methods for bare bead thermocouples in a combustion environment," *International Journal of Thermal Sciences*, 122, 2017, pp. 186-200.

18. V. Hindasageri, R. P. Vedula, S. V. Prabhu, "Thermocouple Error Correction for Measuring the Flame Temperature with Determination of Emissivity And Heat Transfer Coefficient," *Review of Scientific Instruments*, 84, No. 2, 2013, p. 024902.
19. S. C. Kim, A. Hamins, M. F. Bundy, G. H. Ko and E. L. Johnsson. "Analysis of thermocouple behavior in compartment fires," *Fire Safety Science*, 7, 2007, pp. 136-136.
20. S. Krishnan, B. M. Kumfer, W. Wu, J. Li, A. Nehorai and R. L. Axelbaum, "An approach to thermocouple measurements that reduces uncertainties in high-temperature environments," *Energy & Fuels*, 29, No. 5, 2015, pp. 3446-3455.
21. I. L. Roberts, J. E. R. Coney, B. M. Gibbs, "Estimation of Radiation Losses from Sheathed Thermocouples," *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31, No. 14-15, pp. 2262-2270.
22. Z. Xu, X. Tian and H. Zhao, "Tailor-making thermocouple junction for flame temperature measurement via dynamic transient method," *Proceedings of the Combustion Institute*, 36, No. 3, 2017, pp. 4443-4451.
23. S. C. R. Dennis, J. D. A. Walker and J. D. Hudson, "Heat transfer from a sphere at low Reynolds numbers," *Journal of Fluid Mechanics*, 60, No. 2, 1973, pp. 273-283.
24. T. H. Van der Meer, "Stagnation point heat transfer from turbulent low Reynolds number jets and flame jets," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 4, No. 1, 1991, pp. 115-126.
25. C. E. Baukal, Jr. and B. Gebhart, "A review of empirical flame impingement heat transfer correlations," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 17, No. 4, 1996, pp. 386-396.
26. D. Bradley and G. A. Entwistle, "Determination of the emissivity, for total radiation, of small diameter platinum-10% rhodium wires in the temperature range 600-1450°C," *British Journal of Applied Physics*, 12, No. 12, 1961, pp. 708-711.
27. C. M. Cade, "The thermal emissivity of some materials used in thermionic valve manufacture," *IRE Transactions on Electron Devices*, 8, No. 1, 1961, pp. 56-69.
28. R. W. Powell and R. P. Tye, "The promise of platinum as a high temperature thermal conductivity reference material," *British Journal of Applied Physics*, 14, No. 10, 1963, p. 662.
29. C. Davisson and J. R. Weeks, "The Relation between the Total Thermal Emissive Power of a Metal and its Electrical Resistivity," *Journal of the Optical Society of America*, 8, No. 5, 1924, pp. 581-605.
30. D. Pampaloni, D. Bertini, S. Puggelli, L. Mazzei, and A. Andreini, "Methane swirl-stabilized lean burn flames: assessment of scale-resolving simulations," *Energy Procedia*, 126, 2017, pp. 834-841.

## English Abstract

### Determination of radial distribution of flame temperature and flame velocity by the thermocouple

Mohammad Javad Akbari<sup>1</sup>, Azadeh Kebriaee<sup>2\*</sup> and Alireza Ranjbaran<sup>3</sup>

1- Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, mohammadjavad.akbari@ae.sharif.ir

2- Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, kebriaee@sharif.ir

3- Combustion Division, MAPNA Turbine Engineering and Manufacturing Company (TUGA), Karaj, Iran, ranjbaran.alireza@mapnaturbine.com

\*Correspondent author

(Received: 2018.07.07, Received in revised form: 2018.08. 18, Accepted: 2018.09. 06)

Nowadays, the use of resistant and high melting point thermocouples is considered as an efficient and inexpensive tool for measuring the temperature of hot gases produced by combustion. Temperature measurement by thermocouples has inherited errors due to the radiation loss and conduction loss. Therefore, it is necessary to correct this error. In this research, the thermocouple is firstly modeled using a numerical method. The validity of the original code is accredited by comparing the results with a similar previous study. Then, the effects of thermocouple diameter and average flow velocity are investigated on the thermocouple error. The error increases about 50% with increasing the thermocouple diameter from 0.5 to 1 mm. Besides, the error decreases about 41% with increasing the average velocity from 1 to 5 m/s. Based on a previous experimental study, the thermocouple modeling results indicate that the maximum errors for thermocouples with diameter of 300 and 500 microns are 30.8% and 39.6% under these conditions, respectively. In the following, a novel comprehensive solution is suggested to calculate the simultaneous distribution of temperature and velocity. Its results confirm that this algorithm has acceptable accuracy for high temperature flow conditions.

**Keywords:** Thermocouple, Flame temperature distribution, Correcting measurement error