

## مطالعه عددی پایداری شعله احتراقی مخلوط پروپان- هوا در یک میکرو برنر با کانال واگرا

حمیدرضا عسکری فرد جهرمی<sup>۱</sup> و سیامک حسین پور<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، ha.askarifard@yahoo.com

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند (نوسینده مخاطب)، hossainpour@sut.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱۹، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۳/۶/۵، پذیرش: ۹۳/۶/۱۲)

در این مقاله، پایداری احتراق پروپان-هوا در یک میکروبرنر با کانال مستقیم و واگرا بررسی شده است. تأثیر سرعت جریان، ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره کانال و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی جداره بیرونی کانال با محیط اطراف بر مشخصات شعله و ناپایداری آن بررسی شده است. همچنین، در این مقاله، نقش زاویه واگرایی کانال بر دو پدیده خروج شعله از کانال و خاموشی شعله مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد زاویه واگرایی تأثیر بسزایی در افزایش محدوده‌های پایداری شعله داشته و تحت شرایط خاصی از جریان زاویه‌دار بودن کانال سبب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بحرانی تا سه برابر می‌شود. همچنین، این بررسی‌ها نشان می‌دهد زاویه واگرایی کانال تأثیر زیادی در محل استقرار شعله پایدار دارد و در برخی نمودارهای پایداری، الگوی تغییرات در مقایسه با کانال‌های مستقیم متفاوت است.

**کلیدواژگان:** میکروبرنر، پایداری شعله، کانال واگرا، خاموشی شعله، خروج شعله از کانال

### مقدمه

احتراق در ابعاد کوچک به‌عنوان منبع تولید توان الکتریکی، مکانیکی و حرارتی در سامانه‌های میکروالکترومکانیکی کاربرد فراوانی دارد. از این‌رو، احتراق در کانال‌های کوچک در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تا سال‌ها تصور می‌شد امکان انتشار شعله در فواصل کمتر از یک میلی‌متر وجود ندارد، تا اینکه در سال ۲۰۰۱ ماسل و همکاران [۱] موفق به ساخت مشعلی با ابعاد کمتر از میلی‌متر شدند. محفظه احتراق کوچک، با توجه به ضخامتی که احتراق روی می‌دهد، نام‌گذاری می‌شود؛ اگر این فاصله کمتر از یک میلی‌متر باشد، به آن میکرو برنر<sup>۱</sup> و اگر از یک میلی‌متر بیشتر باشد، به آن مزوبرنر<sup>۲</sup> گفته می‌شود [۲]. ریموندو و همکاران [۳] به بررسی عددی انتشار شعله در یک میکروکانال به‌صورت دوبعدی همراه با دفع حرارت به محیط اطراف و بازتولید رادیکال در دیواره پرداختند. آن‌ها، همچنین ناپیوستگی دما و غلظت گونه‌های شیمیایی در دیواره را نیز مورد توجه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که ناپیوستگی دما و سرعت برای کانال‌های باریک ناچیز و قابل صرف‌نظر است. همچنین، انتقال حرارت و جذب رادیکال‌ها در ابتدای دیواره نقش حیاتی در پایداری شعله ایفا می‌کنند. ایرانی و همکاران [۴] به بررسی دوبعدی احتراق در ابعاد میکرو پرداختند و شرط لغزش و ناپیوستگی دمایی را بر دیواره اعمال کردند. آن‌ها بیان کردند که اصلاح شرایط مرزی اثر چندانی بر پارامترهای مهم در این‌گونه محفظه‌های احتراق ندارد. در میکروبرنرها، به‌دلیل زیاد بودن نسبت سطح به حجم، پدیده‌های انتقال (جرم و حرارت) نسبت به محفظه‌های احتراق عادی با شدت بیشتری انجام می‌پذیرد. از این‌رو، میکروبرنرها مساعد خاموشی بر اثر نفوذ رادیکال در دیواره<sup>۳</sup> و خاموشی گرمایی<sup>۴</sup> هستند. پژوهشگران توانسته‌اند جنس دیواره

1. Microburner  
2. Mesoburner  
3. Radical quenching  
4. Thermal quenching

محفظه‌های احتراق را به‌گونه‌ای بسازند که رادیکال‌ها در آن نفوذ نکنند. خروج شعله از کانال<sup>۱</sup> و خاموشی<sup>۲</sup> دو نوع ناپایداری گرمایی می‌باشند [۲]. خروج شعله از کانال هنگامی روی می‌دهد که زمان ماندگاری سیال در کانال کمتر از زمان انجام واکنش باشد. خاموشی هنگامی اتفاق می‌افتد که گرمای تولیدشده به سبب واکنش نتواند بر گرمای ازدست‌رفته به محیط غلبه کند. لیچ و همکاران [۵] نقش انتقال حرارت از دیواره به سیال سرد و همین‌طور به محیط بیرون را در کارایی یک میکرو برنر سیلیکونی با استفاده از یک مدل یک‌بعدی بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که با کاهش اندازه میکرو برنر، نقش پیش‌گرم کردن سیال سرد توسط دیواره در پایداری شعله پررنگ‌تر می‌شود. نورتن و همکاران [۶] مطالعه عددی بر روی مشخصات شعله احتراق متان-هوا با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت را انجام دادند. آن‌ها نموداری را ارائه دادند که مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بحرانی برای تشکیل شعله پایدار را برحسب ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره مشخص می‌کرد و همچنین نشان دادند در برخی موارد، هنگام خاموشی شعله، جریان و خصوصیات آن به‌صورت نوسانی خواهد بود. در این بررسی، نشان داده شده است که دبی جریان تأثیر بسزایی در پایداری شعله داشته و با افزایش آن پیش‌گرم کردن سیال توسط دیواره به‌خوبی انجام نشده و در نتیجه شعله از کانال خارج خواهد شد. در این مطالعه، نشان داده شده که اثرات انتقال حرارت تشعشی بر مشخصات شعله پایدار قابل صرف‌نظر است. نورتن و همکاران [۷] به بررسی تأثیر نوع سوخت در پایداری شعله پرداختند. در این تحقیق، به‌جای متان از سوخت پروپان استفاده شد و نشان داده شد که شعله احتراقی پروپان در محدوده بیشتری از ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی پایدار خواهد بود. کیسر و همکاران [۸] جهت کاهش زمان محاسبات و به‌منظور بهینه‌سازی این نوع برنرها از مدل یک‌بعدی به‌جای مدل دوبعدی استفاده کردند. آن‌ها در این بررسی دو نوع سوخت متان و پروپان را مورد بررسی قرار داده و اثر ابعاد میکروبرنر (طول کانال، ضخامت دیواره و عرض شکاف کانال)، سرعت جریان، ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با محیط و نسبت هم‌ارزی را بر دو نوع ناپایداری شعله، خاموشی و خروج شعله از کانال بررسی کردند.

جهت افزایش محدوده پایداری شعله، بایستی انتقال حرارت به جریان بالادستی درون محفظه احتراق افزایش یافته و در عین حال از خروج شعله از کانال جلوگیری شود. این خاصیت با ایجاد کانال واگرا در میکرو برنرها تأمین می‌شود. در ابتدای کانال که انتقال حرارت به سیال سرد اهمیت دارد، شکاف کانال کم است و از طرفی در انتها با بازشدن دیواره‌ها از هم خارج شدن شعله، به‌دلیل افزایش زمان ماندگاری، به‌تأخیر می‌افتد. بنابراین، میکروبرنرهای واگرا می‌توانند پایداری بیشتری را در شرایط یکسان داشته باشند.

زو و همکاران [۹] انتشار ناپایا و شبه‌پایای شعله پیش‌مخلوط (پروپان یا متان-هوا) را درون یک نازل همگرا-واگرا در ابعاد مزو به‌صورت تئوری و آزمایشگاهی مطالعه کردند. آن‌ها اثر سطح مقطع متغیر و تعامل بین دیواره و شعله بر رژیم‌های مختلف شعله و آغاز ناپایداری را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده چهار رژیم مختلف برای شعله (شعله پایدار، شعله پیش‌رونده، شعله روشن و خاموش شونده و شعله چرخشی) را گزارش کردند. با صرف‌نظر از اندازه عدد لویس مخلوط، مشاهدات آزمایشگاهی و تئوری بیان می‌کنند که تعامل بین دیواره و شعله اثر عدد لویس را افزایش می‌دهد و باعث می‌شود که ناپایداری بر اثر نفوذ حرارتی را افزایش دهد.

اکرم و همکاران [۱۰] مشخصات و پایداری شعله متان-هوا را در کانال واگرا با زوایای متفاوت در ابعاد مزو با ضرایب هم‌ارزی و دبی‌های مختلف و با اعمال گرادیان دمایی بر دیواره به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در محدوده نزدیک به برگشت شعله، شعله مسطح مشاهده شد، اما در سرعت‌های متوسط و ضرایب هم‌ارزی بالا، یعنی درجایی که نرخ انجام واکنش بالاست، شعله کشیده‌شده مشاهده شد. آن‌ها شعله‌های متقارن و نامتقارن را نسبت به محور  $x$  با توجه به سرعت و ضریب هم‌ارزی ثبت کردند. در ضریب هم‌ارزی بالا، شعله پایدار در سرعت‌های بالا، ولی برای ضرایب هم‌ارزی پایین شعله پایدار

1. Blowout  
2. Extinction

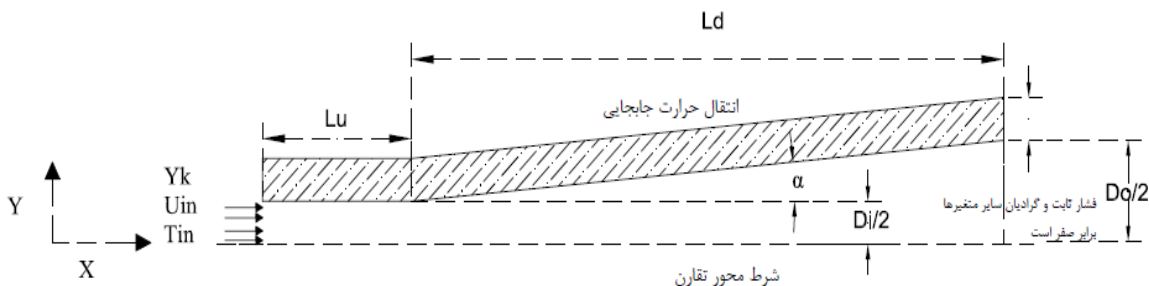
در تمامی محدوده‌های سرعت مشاهده شد. آن‌ها بیان کردند که در مقایسه با کانال مستقیم، کانال‌های واگرا محدود سرعت پایداری شعله را برای مخلوط‌های یکسان به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. آن‌ها، همچنین، بیان کردند که در تمامی نسبت‌های هم‌ارزی افزایش زاویه انحراف سبب افزایش محدوده پایداری شعله می‌شود و این افزایش برای نسبت‌های هم‌ارزی کوچک‌تر از یک، بیشتر است. آن‌ها همچنین نشان دادند که با افزایش سرعت، مکان شعله به‌صورت خطی به جلو حرکت می‌کند و رابطه‌ای را به‌دست آوردند که سرعت سوختن جریان آرام را برای مخلوط استوکیومتری متان و هوا بیان می‌کند. آن‌ها بیان کردند که مزو برنرهای واگرا با کاهش سرعت جریان موجب پایداری شعله می‌شوند.

کومار [۱۱] به بررسی عددی دویعدی احتراق استوکیومتری متان و هوا در کانال واگرا در ابعاد مزو با دیواره‌ای دماتاب و عایق در حالت پایا پرداخت. وی بیان کرد که افزایش سرعت و تغییر در زاویه واگرایی موجب تغییر در شکل شعله می‌شود. او گزارش کرد که گردابه‌های تشکیل‌شده در اطراف دیواره، به‌ویژه در شرط دماتاب، نقش بسزایی در پایداری شعله دارند. درحالی‌که در دیواره عایق این نقش بسیار کم‌رنگ‌تر بوده و در زاویه انحراف کمتر از ۱۰ درجه مکان شعله به زاویه انحراف وابسته است، ولی اگر زاویه انحراف بزرگ‌تر از ۱۰ درجه باشد، مکان شعله به زاویه انحراف وابسته نیست. بنابراین، برای کارایی بهتر میکرو برنر زاویه انحراف باید کمتر از ۱۰ درجه باشد. باید توجه داشت که استفاده از شرط دماتاب در دیواره از نظر فیزیکی زیاد معقول به‌نظر نمی‌رسد.

با توجه به آنچه در بالا ذکر شد، نقش دیواره در کانال‌های واگرا و محدوده‌های پایداری شعله در این نوع کانال‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف مطالعه عددی حاضر بررسی پایداری شعله احتراقی پروپان-هوا در کانال واگرا در ابعاد میکروست و بررسی نقش دیواره‌های کانال در پایداری مورد توجه خواهد بود. نمودارهای پایداری و مکان شعله در کانال‌های واگرا برحسب ضرایب رسانشی دیواره، ضرایب انتقال حرارت جابجایی محیط و سرعت‌های ورودی متفاوت رسم و با کانال‌های مستقیم مقایسه خواهد شد.

## مشخصات مدل

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، جریان هوا و پروپان به‌صورت پیش‌مخلوط وارد کانال دویعدی و متقارن می‌شود. کانال در ابتدا دارای عرض ثابت  $D_i = 400 \mu\text{m}$  به طول  $L_u = 2 \text{ mm}$  است و پس‌از آن عرض کانال با زاویه ثابت  $\alpha$  واگرا می‌شود، به‌طوری‌که طول قسمت واگرا  $L_d = 8 \text{ mm}$  بوده و همچنین ضخامت دیواره برابر با  $d_w = 200 \mu\text{m}$  است. در این مقاله کانال مستقیم و دو کانال واگرا، با زاویه واگرایی ۰/۷ و ۱/۵ درجه، مطالعه شده است. مقطع خروجی برای کانال‌های واگرا ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرومتر است.



شکل ۱- طرحواره میکرو برنر مورد بررسی

## معادلات حاکم

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (1)$$

با صرف نظر از نفوذ برآثر گرادیان دما<sup>۱</sup> معادله بقای هر یک از اجزای شیمیایی به شکل زیر درمی آید:

$$\frac{\partial(\rho u Y_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v Y_i)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( -\rho D_{i,mix} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -\rho D_{i,mix} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) = M_i \dot{\omega}_i \quad (2)$$

در معادله بالا  $M_i$  وزن مولکولی هریک از اجزای شیمیایی است. معادله بقای تکانه در راستای  $x$  و  $y$  به شکل زیر تعریف می شود.

$$\nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (4)$$

با صرف نظر کردن از اثر دو فر<sup>۲</sup> و با توجه به ثابت بودن فشار ترمودینامیکی، معادله انرژی<sup>۳</sup> به شکل معادله زیر بیان می شود.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_f \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_f \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho h_i D_{i,mix} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho h_i D_{i,mix} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) \right] - \sum_{i=0}^n \dot{\omega}_i \Delta h_{i0}^f = 0 \quad (5)$$

و معادله انرژی در فاز جامد با معادله (۶) بیان می شود.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{wall} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{wall} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (6)$$

معادله حالت:

$$p = \rho RT \quad (7)$$

گرانروی، ضریب گرمایی ویژه مخلوط و ضریب رسانشی مخلوط از رابطه های زیر به دست می آید [۶]:

$$k = \sum_{i=1}^N Y_i k_i, \quad C_p = \sum_{i=1}^N Y_i C_{p,i}, \quad \mu = \sum_{i=1}^n Y_i \mu_i \quad (8)$$

لزجت، ضریب انتقال حرارت رسانشی و نفوذ هر جزء با استفاده از تئوری جنبش مولکولی به دست می آید و ضریب گرمایی ویژه هر جزء توسط معادلات چندضابطه ای<sup>۴</sup> بیان می شود.

## شرایط مرزی

مخلوط پروپان و هوا با نسبت استوکیومتری با سرعت و دمای ثابت وارد کانال می شود. در سطح دیواره داخلی شرط عدم لغزش سرعت و عدم نفوذ گونه های شیمیایی وجود دارد. در مرز تماس سیال و جامد پیوستگی دما و شار حرارتی (با استفاده از قانون فوریه) برقرار است. در خروجی کانال، فشار ثابت و گرادیان بقیه متغیرها صفر است. با توجه به متقارن بودن هندسه و شرایط مرزی، از شرط محور تقارن در خط تقارن کانال استفاده شده است. ابتدا و انتهای دیواره عایق است. در سطح دیواره خارجی اتلاف گرما با استفاده از قانون سرمایش نیوتن مدل می شود.

$$q = h(T_{wall} - T_{ambient}) \quad (10)$$

1. Soret effects
2. Dufour effect
3. Piecewise polynomials

که در آن دمای محیط  $300\text{K}$  فرض شده است. براساس مرجع [۲] اثر تشعشع داخلی، زمانی که نسبت طول به عرض کانال بیش از ۲۵ باشد، قابل صرف نظر است و سازوکار غالب در پیش گرم کردن سیال سرد، انتقال حرارت محوری در دیواره است. برای به دست آوردن شرایط اولیه، ابتدا جریان بدون انجام واکنش حل می شود و پس از همگرایی، برای شروع احتراق دمای تعدادی از سلول ها بالا برده می شود.

### سینتیک

هدف پروژه حاضر بررسی تقابل حرارتی بین فاز سیال و جامد و نقش دیواره در پایداری شعله است. در این مطالعه، به منظور کاهش حجم محاسبات لازم برای تعیین محدوده پایداری شعله، از سنتیک تک مرحله ای استفاده شده است. برای تعیین نرخ احتراق پروپان-هوا از سنتیک تک مرحله ای مقاله وست بروک و همکاران [۱۲] استفاده شده است.



که در آن نرخ انجام واکنش با رابطه زیر محاسبه می شود.

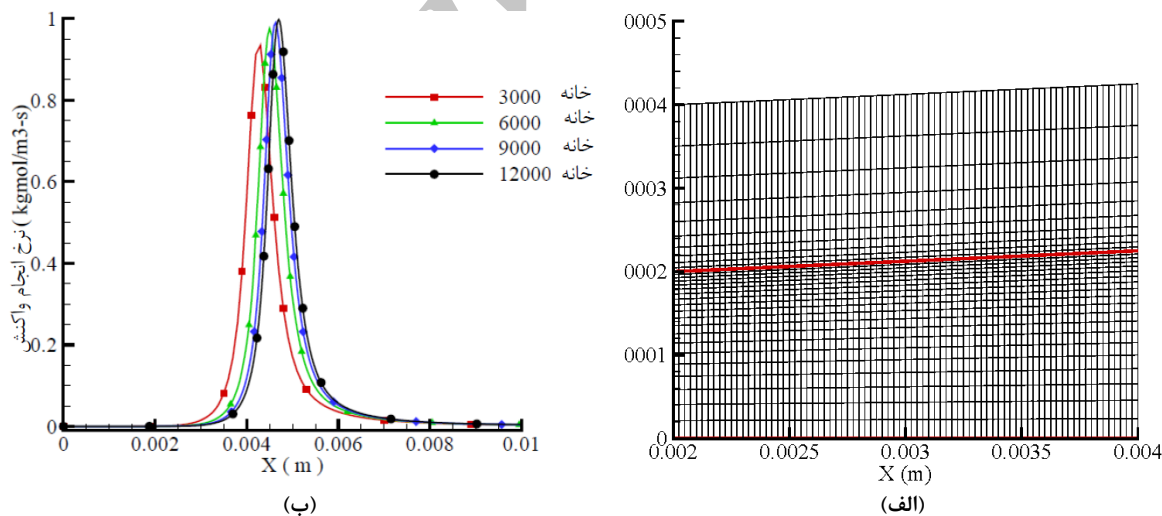
$$K = 4.836 * 10^9 * \exp(-1.256 * 10^5 / RT) [\text{C}_3\text{H}_8]^{0.1} [\text{O}_2]^{1.65} \quad (12)$$

### روش عددی

برای حل معادلات بقاء از روش حجم محدود و نرم افزار فلوئنت ۶.۳.۲۶ استفاده شده است. برای گسسته سازی معادلات از روش بالادست مرتبه دوم<sup>۱</sup> و در حل معادلات کوپل شده سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل<sup>۲</sup> و همچنین برای همگرایی از روش زیرتخفیف<sup>۳</sup> بهره برده شده است. مقدار مانده معیار برای همگرایی در همه معادلات بقاء  $10^{-6}$  است.

### بررسی استقلال نتایج از شبکه

در این پروژه، از شبکه چهارضلعی با اندازه یکنواخت در راستای x و غیریکنواخت در راستای y استفاده شده است (شکل ۲-الف).



شکل ۲- الف) بخش بزرگ نمایی شده از شبکه بندی مورد استفاده، (ب) نمودار تغییرات نرخ پیشرفت واکنش در محور تقارن میکروبرنر

1. Second order upwind
2. Simple
3. Under relaxation

ابتدا استقلال شبکه در راستای  $y$  بررسی شد. پس از اطمینان از استقلال شبکه در راستای  $y$  شبکه‌ای با تعداد ۳۰ خانه (تعداد ۲۰ خانه در درون کانال و ۱۰ خانه در دیواره) انتخاب شد.  $\Delta y$  در درون کانال در جهت محور تقارن با نسبت ۱/۱ و در دیواره به سمت محیط بیرون با نسبت ۱/۳ بزرگ می‌شود. برای بررسی استقلال شبکه در راستای  $x$  شبکه‌هایی به تعداد ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ خانه در این راستا و تعداد ۳۰ خانه در راستای  $y$  در نظر گرفته شد. در شکل ۲-ب نرخ انجام واکنش در محور تقارن (به‌عنوان معیار استقلال شبکه) برای کانالی با زاویه انحراف ۰/۷ درجه،  $K_{wall}=3W/mk$ ،  $h=20W/m^2k$  و سرعت ورودی  $0.5m/s$  برای این چهار شبکه مختلف نشان داده شده است. همگرایی در حل، با افزایش تعداد المان‌ها، به‌خوبی در شکل مشخص است. همان‌طور که از این نمودار مشاهده می‌شود، شبکه‌ای با ۶۰۰۰ المان از دقت کافی در نتایج برخوردار است، به‌طوری‌که با افزایش تعداد المان‌ها از ۶۰۰۰ به ۹۰۰۰ بیشینه نرخ انجام واکنش تنها ۱/۴۲ درصد افزایش می‌یابد.

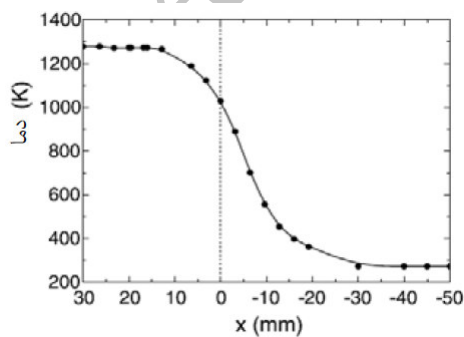
### اعتبارسنجی نتایج

ماروتا و همکاران [۱۳] در یک پژوهش تجربی به بررسی خصوصیات احتراق پیش مخلوط، در یک لوله به قطر ۲mm، پرداختند. آن‌ها با اعمال گرادیان دمایی بر دیواره لوله (شکل ۳) بیان کردند که برای مخلوط پروپان-هوا با نسبت هم‌ارزی ۰/۵ و سرعت ورودی ۳۰cm/s و با بیشینه دمای ۱۳۲۰K شعله پایدار و ثابت در فاصله ۴mm از مبدأ تشکیل می‌شود. برای اعتبارسنجی همین شرایط در نرم افزار فلوئنت اعمال شد. در شکل ۴، دمای دیواره و محور تقارن نشان داده شده است. در این شکل تشکیل شعله پایدار و ثابت در مبدأ به‌خوبی مشخص است. محل تشکیل شعله پایدار در هر دو پژوهش تفاوت دارد، اما در این فاصله دمای دیواره چندان تغییر نمی‌کند. بنابراین، دمای دیواره در مکانی که احتراق در آن روی می‌دهد در هر دو پژوهش چندان متفاوت نیست. همچنین، در هر دو پژوهش، در شرایط یکسان، شعله پایدار و ثابت تشکیل می‌شود.

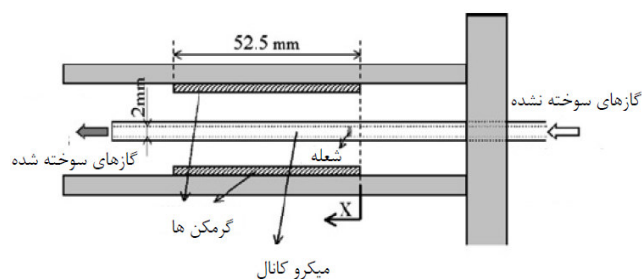
### نتایج

#### نقش دیواره در پایداری شعله

در شکل ۵، کانتور دما برای کانال واگرا با زاویه انحراف ۰/۷ درجه،  $k_{wall}=1W/mK$ ،  $h=20W/m^2K$  و  $v=0.5m/s$  نشان داده شده است. گرادیان دمایی در امتداد دیواره نشان‌دهنده پیش‌گرم کردن مخلوط قبل از احتراق و متعاقب آن پایداری شعله است. دیواره، قبل از شعله، چشمه حرارتی و پس از آن، چاه حرارتی است. البته، باید توجه داشت که دیواره با انتقال گرما به محیط بیرون نیز سبب ناپایداری شعله می‌شود. بنابراین، دیواره نقشی دوگانه در پایداری شعله دارد. با توجه به شکل ۵، شعله به دیواره بسیار نزدیک است و این نزدیکی سبب تشدید اثر متقابل جریان و دیواره می‌شود. در واقع تفاوت عمده میکروبرنرها و مشعل‌های عادی در همین امر است.

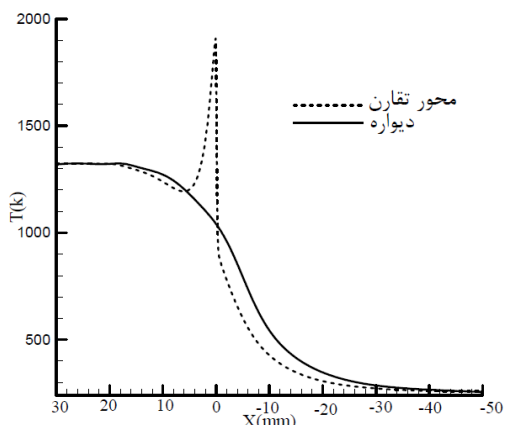


ب

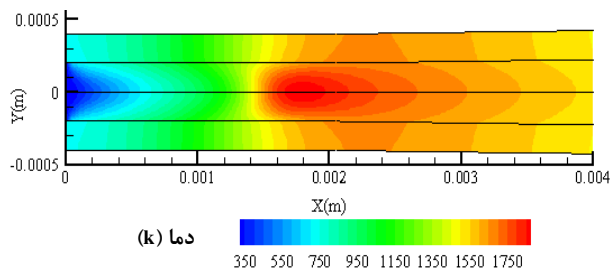


الف

شکل ۳- الف) شماتیک میکروبرنر و گرم‌کننده‌ها، ب) نمودار گرادیان دمایی اعمال شده بر لوله [۱۳]



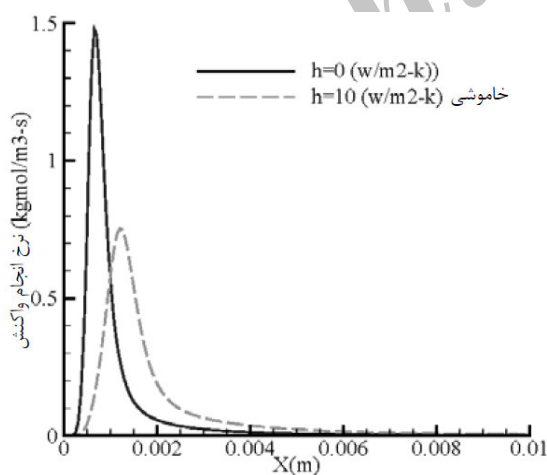
شکل ۴- نمودار دمای دیواره و محور تقارن برای شعله ثابت و پایدار در مبدا با ضریب هم‌ارزی ۰/۵، سرعت ورودی و ۳۰cm/s و بیشینه دمای ۱۳۲۰K



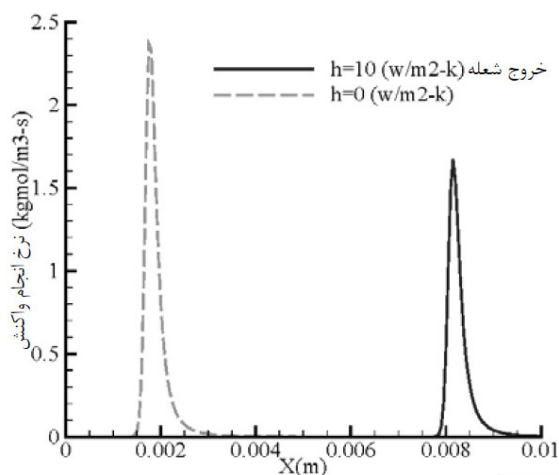
شکل ۵- کانتور دما برای کانالی با زاویه انحراف ۰/۷ در  $v=۰/۵\text{m/s}$  و  $h=۲۰\text{w/m}^2\text{K}$ ,  $k_{\text{wall}}=۱\text{W/mK}$

### خروج و خاموشی شعله

نرخ انجام واکنش در محور تقارن برای محفظه احتراقی با ضریب رسانشی  $۰/۲\text{W/mK}$  و سرعت ورودی  $۰/۵\text{m/s}$  در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب جابه‌جایی از  $۰\text{W/m}^2\text{K}$  به  $۱۰\text{W/m}^2\text{K}$  ناحیه انجام واکنش به سمت پایین کانال کشیده می‌شود و شعله در آستانه خروج از کانال قرار می‌گیرد. همچنین، نرخ انجام واکنش در محور تقارن محفظه احتراقی با ضریب رسانشی  $۱۵\text{W/mK}$  و سرعت ورودی  $۰/۵\text{m/s}$  در شکل ۷ نشان داده شده است. با افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در این ضریب رسانشی برخلاف خروج شعله، محدوده انجام واکنش بدون حرکت، به سمت پایین کانال، پهن می‌شود. اگر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بیش از این افزایش یابد، شعله دچار خاموشی می‌شود. در هر دو حالت بیشینه نرخ انجام واکنش کاهش می‌یابد، اما این کاهش در حالت خاموشی بسیار بیشتر است.



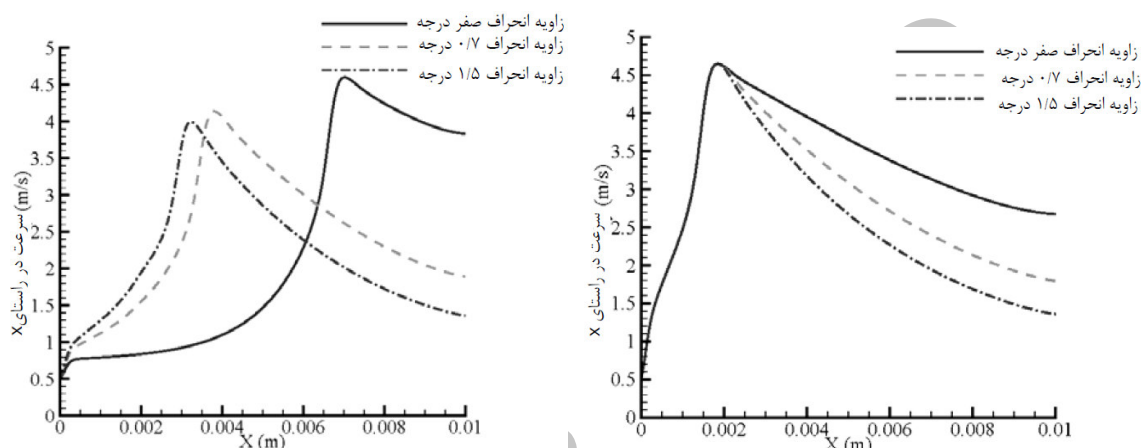
شکل ۷- نرخ انجام واکنش برای شعله پایدار و شعله در آستانه خاموشی در محور تقارن کانالی با زاویه انحراف ۰/۷ درجه در  $v=۰/۵\text{m/s}$  و  $k_{\text{wall}}=۱۵\text{W/mK}$



شکل ۶- نرخ انجام واکنش برای شعله پایدار و شعله در آستانه خروج در محور تقارن کانالی با زاویه انحراف ۰/۷ درجه در  $v=۰/۵\text{m/s}$  و  $k_{\text{wall}}=۰/۲\text{W/mK}$

### سرعت در راستای x در طول کانال

نمودار سرعت در راستای x در خط تقارن برای سه زاویه متفاوت و  $k_{wall}=1W/mK$  در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. در شکل ۸،  $h=20W/m^2K$  است و شعله در هر سه هندسه در یک مکان و در قسمت مستقیم کانال قرار دارد. سرعت قبل از شعله، به دلیل افزایش دما، افزایش و پس از آن، به دلیل کاهش دما، کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه واگرایی، کاهش سرعت، به دلیل افزایش سطح مقطع، افزایش می‌یابد. با افزایش h به میزان  $25W/m^2K$  شعله در کانال مستقیم در آستانه خروج از کانال قرار می‌گیرد (شکل ۹). زاویه واگرایی موجب افزایش زمان ماندگاری سیال در کانال می‌شود و از خروج شعله جلوگیری می‌کند. با افزایش زاویه واگرایی، شعله در فاصله نزدیک‌تری تشکیل می‌شود.



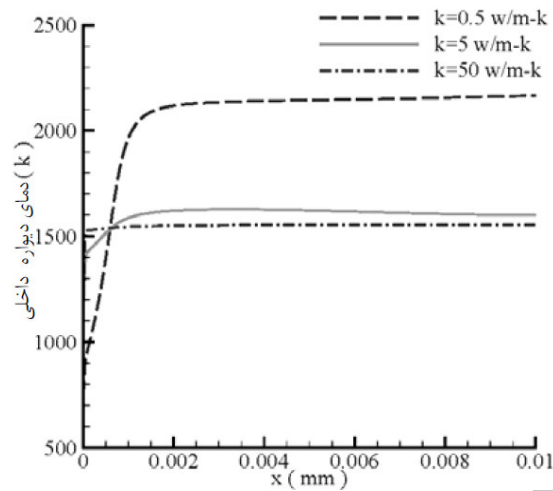
شکل ۸- نمودار سرعت در راستای محور x در محور تقارن با سه زاویه متفاوت در حالتی که  $k_{wall}=1W/mK$  و  $h=20W/m^2K$  و  $v=0.5m/s$  متفاوت در حالتی که  $k_{wall}=1W/mK$  و  $h=25W/m^2K$  و  $v=0.5m/s$  در محور تقارن با سه زاویه

### تأثیر ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره

دمای سطح داخلی دیوار برای کانال مستقیم با دیواره خارجی عایق و سرعت ورودی  $0.5m/s$  برای سه ضریب انتقال حرارت رسانشی مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. هرچه ضریب انتقال حرارت رسانشی بیشتر باشد، بخش گرما در کل محفظه احتراق بهتر صورت می‌پذیرد و نمودار دمای سطح داخلی دیواره یکنواخت‌تر می‌شود. در ضرایب رسانشی پایین، به دلیل پخش کمتر گرما، دمای محفظه احتراق مقدار بیشتری را داراست. کانتور نرخ انجام واکنش برای کانال مستقیم،  $h=0W/m^2K$  و سرعت ورودی  $0.5m/s$  در سه ضریب انتقال حرارت رسانشی متفاوت در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

با کاهش ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره، پیش گرم کردن جریان سرد ورودی با کندی بیشتری صورت می‌پذیرد و شعله در فاصله دورتری از ابتدای کانال تشکیل می‌شود (شکل ۱۱). در ضرایب رسانشی پایین، به دلیل پخش گرمای کمتر و بالا بودن دما، نرخ انجام واکنش بیشتر و محدوده انجام واکنش باریک‌تر است. با توجه به شکل ۱۰، در ابتدای کانال دمای سطح داخلی دیواره با ضریب رسانشی  $50W/m-K$  دارای بیشترین مقدار است. بنابراین، انتظار می‌رود که نرخ انجام واکنش در این ناحیه برای دیواره‌هایی با ضرایب انتقال حرارت رسانشی بالاتر بزرگ‌تر باشد. شکل ۱۱ نیز همین امر را تصدیق می‌کند، به گونه‌ای که نرخ انجام واکنش در اطراف دیواره با افزایش ضریب انتقال حرارت رسانشی افزایش می‌یابد. در مجموع در شرایط یکسان هرچه ضریب انتقال حرارت رسانشی کمتر باشد، دمای محفظه احتراق بیشتر است و احتراق به صورت کامل‌تری انجام می‌پذیرد، به گونه‌ای که در ضریب رسانشی  $0.5W/m-K$  کسر جرمی پروپان در خروجی صفر است، اما در ضرایب رسانشی بالا این کسر جرمی صفر نیست. نتایج مشابهی برای کانال‌های واگرا نیز به دست آمد.

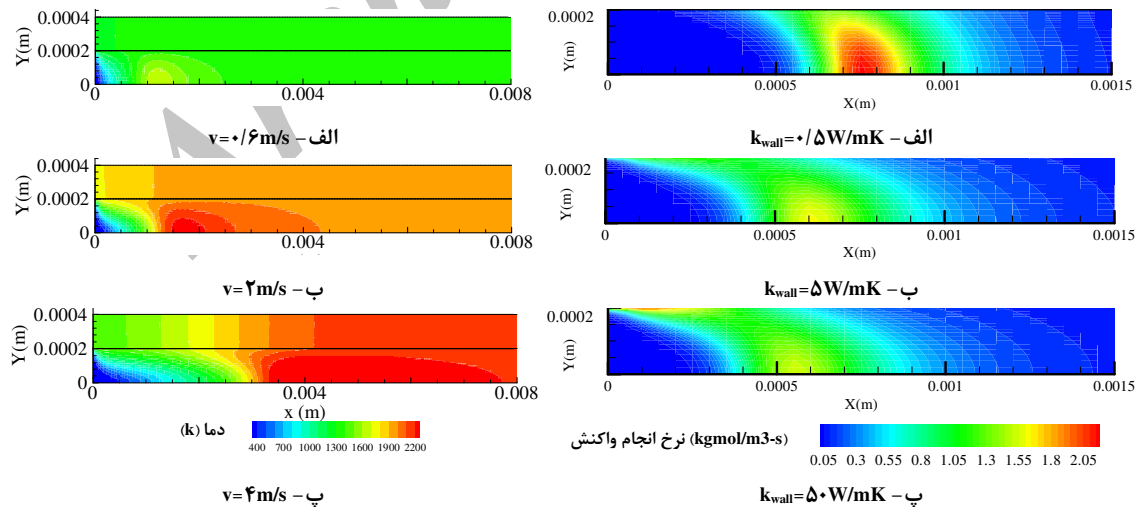




شکل ۱۰- نمودار دمای سطح داخلی دیوار برای سه ضریب انتقال حرارت رسانشی متفاوت در کانال مستقیم ( $h=10\text{ W/m}^2\text{K}$  و  $v=0.6\text{ m/s}$ )

### تأثیر سرعت ورودی

کانتور دما برای کانال مستقیم با  $k_{\text{wall}}=20\text{ W/mK}$ ،  $h=10\text{ W/m}^2\text{K}$  و سه سرعت ورودی متفاوت در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در سرعت‌های ورودی پایین پخش گرما در محفظه احتراق به خوبی انجام می‌شود و دمای محفظه احتراق نسبت به دیگر سرعت‌های ورودی کمتر است. با کاهش دمای محفظه احتراق، نرخ انجام واکنش نیز کاهش می‌یابد. برعکس، در سرعت‌های ورودی بالا سیال فرصت کمتری برای تبادل گرما با دیواره را دارد. از این رو، اتلاف حرارت از دیواره خارجی و انتقال حرارت در امتداد کانال کاهش می‌یابد و پخش گرما در محفظه احتراق کمتر صورت می‌پذیرد و از سوی دیگر سوخت سریع‌تر به ناحیه واکنش می‌رسد و واکنش در دما و نرخ بالاتری روی می‌دهد. بیشینه دمای سطح داخلی دیوار برای سرعت‌های ورودی  $0.6$ ،  $2$  و  $4$  متر بر ثانیه به ترتیب  $1351$ ،  $1979$  و  $2169$  کلوین است. افزایش دمای بیش از اندازه محفظه احتراق سبب تخریب دیواره می‌شود. بنابراین، سرعت ورودی یکی از پارامترهای مهم در ساخت میکرو برنرهاست.

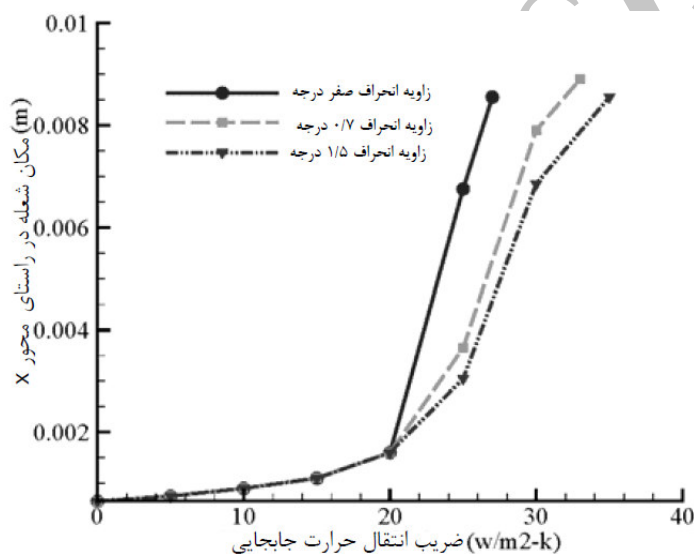


شکل ۱۲- کانتور دما در کانال مستقیم برای سه سرعت ورودی متفاوت در  $k_{\text{wall}}=20\text{ W/m-K}$  و  $h=10\text{ W/m}^2\text{-K}$

شکل ۱۱- نرخ انجام واکنش در کانال مستقیم برای سه ضریب رسانشی مختلف در  $h=10\text{ W/m}^2\text{K}$  و  $v=0.6\text{ m/s}$

## تأثیر زاویه واگرایی و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بر مکان شعله

در شکل ۱۳، مکان شعله برحسب ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محیط برای  $k_{wall}=1\text{W/mK}$  و سرعت ورودی  $v=0.5\text{m/s}$  در سه هندسه مختلف نشان داده شده است. مکان شعله براساس مکان بیشینه نرخ انجام واکنش محاسبه شده است. با افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، در هر سه هندسه شعله به سمت پایین کانال جابه‌جا و در ضریب جابه‌جایی مشخصی سرانجام شعله از کانال خارج می‌شود. در واقع، با افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، میزان انتقال حرارت به محیط اطراف افزایش و انتقال حرارت محوری برای پیش‌گرم کردن سیال کاهش می‌یابد و گرمای لازم برای ایجاد شعله در فاصله دورتری از ورودی تأمین می‌شود؛ در نتیجه، شعله به سمت خروجی حرکت می‌کند. کمترین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی که به‌ازای آن شعله از کانال خارج می‌شود مربوط به کانال مستقیم و بیش‌ترین ضریب مربوط به کانال واگرا با زاویه انحراف  $1/5$  درجه است. تا زمانی که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی کمتر از مقدار مشخصی ( $h=20\text{W/m}^2\text{-K}$ ) است و شعله در قسمت تخت کانال قرار دارد، مشخصات شعله در هر سه هندسه یکسان است. در یک ضریب ثابت و بزرگ‌تر از  $20$ ، شعله در کانال واگرا در مکان نزدیک‌تری از ورودی نسبت به کانال مستقیم قرار می‌گیرد و هرچه زاویه واگرایی بیشتر شود، شعله در فاصله نزدیک‌تری تشکیل می‌شود.



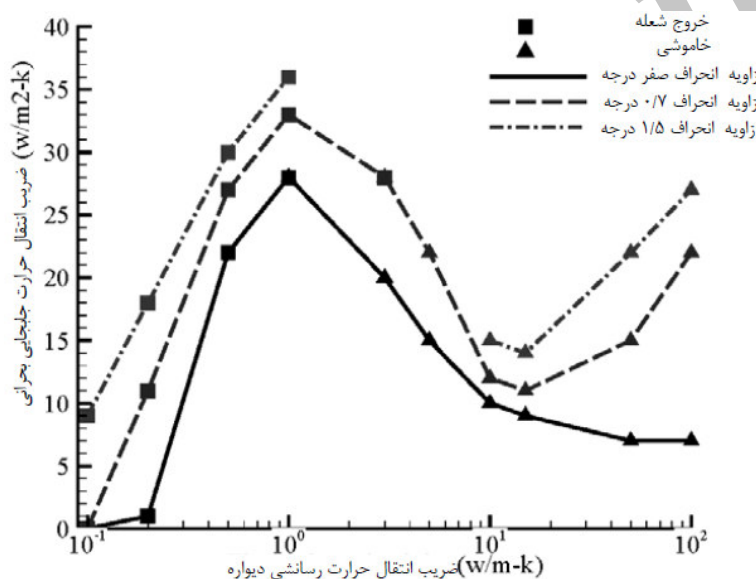
شکل ۱۳- مکان شعله برحسب ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای سه زاویه مختلف در  $k_{wall}=1\text{W/mK}$  و  $v=0.5\text{m/s}$

## نقشه‌های پایداری

## ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بحرانی برحسب ضریب رسانشی دیواره

در شکل ۱۴ نقشه پایداری برحسب ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بحرانی و ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره در سرعت ورودی  $0.5$  متر بر ثانیه برای کانال مستقیم، کانال با زاویه واگرایی  $0.7$  و  $1.5$  درجه نشان داده شده است. به‌ازای هر ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی وجود دارد که به‌ازای آن، شعله یا در آستانه خروج یا در آستانه خاموشی قرار می‌گیرد. علامت مربع نشان‌دهنده خروج شعله و مثلث نشان‌دهنده خاموشی است. محور ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره لگاریتمی است. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشخص است، نمودار در زاویه واگرایی  $1.5$  درجه به‌صورت کامل رسم نشده است. دلیل این امر متفاوت بودن نوع ناپایداری در  $3\text{W/mK}$  و  $5\text{W/mK}$  است. در ادامه در این باره بیشتر توضیح داده خواهد شد.

کانال مستقیم: در ضرایب انتقال حرارت رسانشی کمتر از  $0.1 \text{ W/mK}$ ، حتی با دیواره عایق شعله از کانال خارج می‌شود. در ضرایب انتقال حرارت رسانشی بین  $0.1 \text{ W/mK}$  و  $1 \text{ W/mK}$  ناپایداری از نوع خروج شعله و در ضرایب بیش از  $1 \text{ W/mK}$  از نوع خاموشی است. در ضرایب انتقال حرارت رسانشی پایین پیش‌گرم کردن سیال در فاصله بیشتری و به‌کندی روی می‌دهد و سبب تشکیل شعله در فاصله دورتری از ورودی می‌شود. بنابراین، در این حالت، ناپایداری از نوع خروج شعله است. در ضرایب انتقال حرارت رسانشی بالا، پیش‌گرم کردن سیال سرد سریع روی می‌دهد و سبب تشکیل شعله در ابتدای کانال می‌شود. البته، در این ضرایب، انتقال حرارت به محیط اطراف نیز محسوس است. از این رو، گرمای ازدست‌رفته بر گرمای تولیدشده غلبه می‌کند و موجب خاموشی شعله می‌شود. با توجه به شکل ۱۴، با افزایش ضریب انتقال حرارت رسانشی تا مقدار  $1 \text{ W/mK}$ ، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بحرانی افزایش و پس‌از آن کاهش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده نقش دوگانه دیواره در پایداری شعله است. بیشینه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بحرانی به میزان  $28 \text{ W/m}^2\text{K}$  در ضریب رسانشی  $1 \text{ W/mK}$  است. در ضرایب رسانشی بالاتر از  $15 \text{ W/mK}$ ، با تغییر ضریب انتقال حرارت رسانشی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بحرانی تغییر چندانی نمی‌کند.



شکل ۱۴- ضریب انتقال حرارت بحرانی بر حسب ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره در سه زاویه مختلف با سرعت ورودی  $0.5$  متر بر ثانیه

کانال با زاویه واگرایی  $0.7$  درجه: واگرایی کانال ناحیه پایداری را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد، به‌گونه‌ای که در  $k_{\text{wall}} = 100 \text{ W/mK}$  ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بحرانی نسبت به کانال مستقیم تقریباً سه برابر می‌شود. کمترین مقدار افزایش در ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بحرانی برای ضرایب رسانشی متوسط ( $10 \leq k_{\text{wall}} \leq 15 \text{ W/mK}$ ) است. همانند کانال مستقیم، در ضرایب رسانشی کمتر از  $0.1$  تشکیل شعله پایدار به‌هیچ‌وجه امکان‌پذیر نیست. نوع ناپایداری، در ضرایبی که کوچکتر از  $3$  است، از نوع خروج شعله و در ضرایب بزرگتر از نوع خاموشی است. الگوی تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بحرانی بر حسب انتقال حرارت رسانشی در این حالت با حالت کانال مستقیم متفاوت است. با افزایش ضریب انتقال حرارت رسانشی، ضریب انتقال حرارت بحرانی ابتدا افزایش سپس کاهش و مجدداً افزایش می‌یابد. مطابق انتظار، واگرایی با افزایش زمان ماندگاری جریان در کانال سبب تأخیر در پدیده خروج شعله می‌شود. اما، همان‌طور که مشاهده می‌شود، زاویه واگرایی سبب تأخیر در پدیده خاموشی نیز می‌شود، به‌گونه‌ای که بیشینه افزایش ضریب بحرانی برای خاموشی روی می‌دهد.

کانال با زاویه واگرایی ۱/۵ درجه: در ضریب رسانشی  $0.1 \text{ W/mK}$  محدوده پایداری نسبت به دو حالت قبل به شدت افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در این ضریب رسانشی تا  $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$  شعله پایدار تشکیل می‌شود. بیشینه ضریب انتقال حرارت بحرانی نیز برابر با  $36 \text{ W/m}^2\text{K}$  است. الگوی تغییرات ضریب انتقال حرارت بحرانی برحسب ضریب انتقال حرارت رسانشی همانند کانال با زاویه واگرایی ۰/۷ درجه است. در این زاویه واگرایی هر دو پدیده خروج شعله و خاموشی نسبت به کانال مستقیم به شدت به تأخیر می‌افتد. قسمتی از نمودار کانال با زاویه واگرایی ۱/۵ درجه در شکل ۱۴ به دلیل تفاوت در ناپایداری رسم نشده است. در دو ضریب رسانشی  $3 \text{ W/mK}$  و  $5$  به ترتیب تا ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$  و  $23$  شعله پایا و پایدار تشکیل می‌شود. با افزایش ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی، برخلاف دو حالت قبل، نه پدیده خاموشی و نه خروج شعله روی می‌دهد و مسئله در حالت پایا همگرا نمی‌شود. حل‌های اولیه به صورت ناپایا تشکیل شعله نوسانی را نشان می‌دهد. این نوع از ناپایداری توسط نورتن و همکاران [۶] نیز گزارش شد. البته مطالعه این نوع ناپایداری نیازمند تحلیل‌های بیشتری است. به طور خلاصه، واگرایی نه تنها سبب تأخیر در پدیده خروج شعله، بلکه باعث تأخیر در خاموشی نیز می‌شود و الگوی نقشه پایداری در کانال واگرا با کانال مستقیم متفاوت است.

### محدوده سرعت برای شعله پایدار برحسب ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

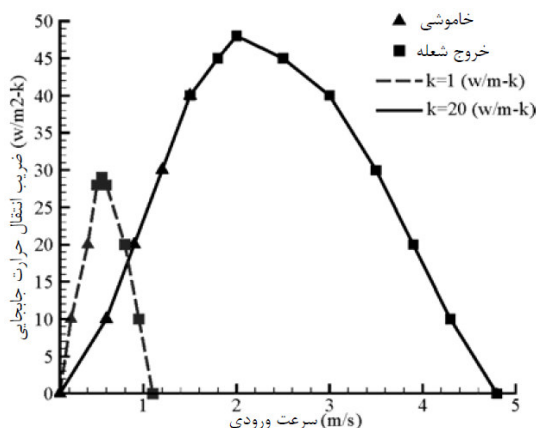
در شکل ۱۵، بیشینه و کمینه سرعت برای تشکیل شعله پایدار برحسب ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در کانال مستقیم و کانال با زاویه واگرایی ۰/۷ درجه نشان داده شده است. علامت مربع نشان‌دهنده خروج شعله و علامت مثلث نشان‌دهنده خاموشی شعله است.

کانال مستقیم: برای دیواره عایق ( $h=0 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) کمینه سرعت ۰/۱ و بیشینه سرعت ۱/۱ متر بر ثانیه است. با افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محدوده سرعت برای تشکیل شعله پایدار کوچک‌تر می‌شود، به گونه‌ای که در ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برابر با  $29 \text{ W/m}^2\text{K}$  شعله تنها با سرعت ورودی ۰/۵۵ متر بر ثانیه پایدار است. در سرعت‌های پایین ناپایداری از نوع خاموشی و در سرعت‌های بالا از نوع خروج شعله است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، در سرعت‌های پایین نرخ انجام واکنش کم است و گرمای تولیدشده به اندازه‌ای نیست که بتواند سبب پایداری شعله شود. بنابراین، شعله دچار خاموشی می‌شود. در سرعت‌های بالا دمای سطح داخلی دیواره در فاصله دورتری به مقدار بیشینه خود می‌رسد (شکل ۱۳). بنابراین، کندی در پیش‌گرم کردن سیال از یک طرف و عدم تأمین زمان کافی برای انجام واکنش از طرف دیگر باعث خروج شعله در سرعت‌های بالا می‌شود.

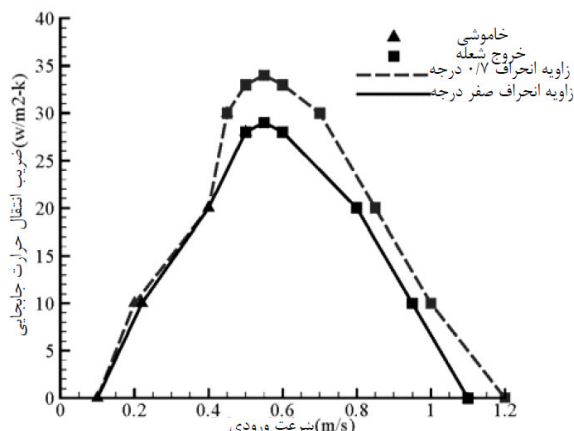
کانال واگرا با زاویه ۰/۷ درجه: در کانال واگرا الگوی تغییرات همانند کانال مستقیم است. واگرایی بر کمینه سرعت و یا همان خاموشی تأثیر چندانی ندارد، ولی بیشینه سرعت را افزایش می‌دهد و خروج شعله را به تأخیر می‌اندازد، زیرا واگرایی سبب افزایش زمان ماندگاری سیال در کانال می‌شود. واگرایی، همچنین، موجب می‌شود بیشینه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، که به ازای آن شعله پایدار تشکیل می‌شود، نیز افزایش یابد. در  $h=34 \text{ W/m}^2\text{K}$  تنها با سرعت ۰/۵۵ متر بر ثانیه شعله پایدار تشکیل می‌شود.

در شکل ۱۶، تأثیر ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره بر کمینه و بیشینه سرعت برای کانال مستقیم در دو ضریب رسانشی  $1 \text{ W/mK}$  و  $20$  نشان داده شده است. افزایش ضریب انتقال حرارت رسانشی در ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ثابت، سبب افزایش کمینه و بیشینه سرعت برای تشکیل شعله پایدار می‌شود. به عنوان مثال، کمینه سرعت در  $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$  برای دیواره‌هایی با ضریب رسانشی  $1 \text{ W/mK}$  و  $20 \text{ W/mK}$  به ترتیب  $0.25$  و  $0.6$  متر بر ثانیه و بیشینه سرعت  $0.95$  و  $4/3$  متر بر ثانیه است. در ضرایب رسانشی بالا پیش‌گرم کردن سیال سرد سریع روی می‌دهد. بنابراین، در سرعت‌های بالا، که زمان ماندگاری سیال در کانال کم است، مقاومت بیشتری نسبت به ضرایب رسانشی پایین در برابر خروج شعله از خود نشان می‌دهد. در سرعت‌های پایین ورودی، به دلیل کاهش نرخ انجام واکنش، شعله دچار خاموشی می‌شود. در ضرایب رسانشی پایین دیواره،

دمای میکروبرنر و نرخ انجام واکنش بالاست و از طرفی دیگر اگر سرعت ورودی پایین باشد، به دلیل کاهش دما و نرخ انجام واکنش، خاموشی روی می‌دهد. بنابراین، انتظار می‌رود که در شرایط یکسان میکروبرنر با ضریب رسانشی کم‌تر در برابر خاموشی بر اثر سرعت‌های ورودی پایین مقاومت بیشتری از خود نشان دهد، که شکل ۱۶ این مطلب را تصدیق می‌کند.



شکل ۱۶- نقشه پایداری - محدوده سرعت برحسب ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی دیواره برای کانال مستقیم با دو ضریب رسانشی  $k_{wall}=20\text{W/mK}$  و  $k_{wall}=1\text{W/mK}$



شکل ۱۵- نقشه پایداری - محدوده سرعت برحسب ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی دیواره در  $k_{wall}=1\text{W/mK}$  برای کانال مستقیم و کانال واگرا با زاویه  $0/7$  درجه

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، به مطالعه عددی و دوبعدی احتراق پروپان-هوا در میکروبرنر پرداخته شد. تأثیر ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره و سرعت ورودی بر مشخصات شعله و ناپایداری آن مورد ارزیابی قرار گرفت:

- در ضرایب رسانشی بالا، نسبت به ضرایب رسانشی پایین، پخش گرما در میکروبرنر بیشتر صورت می‌پذیرد و دمای محفظه احتراق مقدار کمتری دارد. بنابراین، نرخ انجام واکنش نیز کمتر است و ناپایداری از نوع خاموشی است. در ضرایب رسانشی پایین، به دلیل کندبودن پیش‌گرم کردن سیال ناپایداری از نوع خروج شعله است.
- در سرعت‌های ورودی بالا، به دلیل عدم پخش مناسب گرما، دمای محفظه احتراق در مقایسه با سرعت‌های ورودی کمتر، بسیار بالاتر است و واکنش با نرخ بیشتری انجام می‌شود. در سرعت‌های ورودی بالا، پیش‌گرم کردن سیال در فاصله بیشتری انجام می‌پذیرد. از این رو، ناپایداری در این سرعت‌ها از نوع خروج شعله است. در سرعت‌های پایین، به دلیل کاهش نرخ انجام واکنش، ناپایداری از نوع خاموشی می‌باشد.
- در این مقاله اثر واگرایی بر پایداری شعله نیز مورد ارزیابی قرار گرفت:
- زاویه واگرایی نه تنها خروج شعله از کانال بلکه خاموشی را نیز به تأخیر می‌اندازد، به گونه‌ای که در برخی موارد ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بحرانی را تا سه برابر افزایش می‌دهد. الگوی تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بحرانی برحسب ضریب انتقال حرارت رسانشی در کانال واگرا با کانال مستقیم متفاوت است.
- در ضریب انتقال حرارت رسانشی ثابت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی یکسان، واگرایی سرعتی را که به‌ازای آن شعله در آستانه خروج قرار می‌گیرد افزایش می‌دهد.
- با افزایش ضریب انتقال حرارت رسانشی در ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ثابت کمینه و بیشینه سرعت ورودی، که به‌ازای آن شعله پایدار تشکیل می‌شود، افزایش می‌یابد.

- [1] R. I. Masel and M. A. Shannon, "Microcombustor having Submillimeter Critical Dimensions," Patent No. US6193501 B1, 2001.
- [2] N. S. Kaisare and D. G. Vlachos, "A Review on Microcombustion: Fundamentals, Devices and Applications," *Prog. Energy Combust. Sci.*, 38, No. 3, pp. 321-359, Jun. 2012.
- [3] S. Raimondeau, D. Norton, D. G. Vlachos, and R. I. Masel, "Modeling of high-Temperature Microburners," *Proc. Combust. Inst.*, 29, No. 1, pp. 901-907, Jan. 2002.
- [4] M. Irani Rahaghi, A. Saidi, M. S. Saidi, and M. H. Shafiei, "Two-dimensional Numerical Investigation of a Micro Combustor," *Scientia Iranica*, Vol. 6, No. 17, pp 433-442, 2011.
- [5] T. T. Leach and C. P. Cadou, "The role of structural Heat Exchange and Heat Loss in the Design of Efficient Silicon Micro-Combustors," *Proc. Combust. Inst.*, 30, No. 2, pp. 2437-2444, Jan. 2005.
- [6] D. G. Norton and D. G. Vlachos, "Combustion Characteristics and Flame Stability at the Microscale: a CFD Study of Premixed Methane/Air Mixtures," *Chem. Eng. Sci.*, 58, No. 21, pp. 4871-4882, Nov. 2003.
- [7] D. G. Norton and D. G. Vlachos, "A CFD Study of Propane/Air Microflame Stability," *Combust. Flame*, 138, No. 1-2, pp. 97-107, Jul. 2004.
- [8] N. S. Kaisare and D. G. Vlachos, "Optimal Reactor Dimensions for Homogeneous Combustion in Small Channels," *Catal. Today*, 120, No. 1, pp. 96-106, Jan. 2007.
- [9] B. Xu and Y. Ju, "Experimental Study of Spinning Combustion in a Mesoscale Divergent Channel," *Proc. Combust. Inst.*, 31, No. 2, pp. 3285-3292, Jan. 2007.
- [10] M. Akram and S. Kumar, "Experimental Studies on Dynamics of Methane-Air Premixed Flame in Meso-Scale Diverging Channels," *Combust. Flame*, 158, No. 5, pp. 915-924, May 2011.
- [11] S. Kumar, "Numerical Studies on Flame Stabilization Behavior of Premixed Methane-Air Mixtures in Diverging Mesoscale Channels," *Combust. Sci. Technol.*, 183, No. 8, pp. 779-801, Apr. 2011.
- [12] F. L. D. Charles and K. Westbrook, "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames.pdf," *Combust. Sci. anti Technol.*, 27, pp. 31-43, 1981.
- [13] R. F. Kaoru Marutaa, Takuya Kataokaa, Nam Il Kima and Sergey Minaevb, "Characteristics of Combustion in a Narrow Channel with a Temperature Gradient," *Proc. Combust. Inst.*, 30, pp. 2429-2436, 2005.

## English Abstract

### Numerical Study of Propane-Air Combustion Stability in a Diverging Microburner

Hamid Reza Askarifard Jahromi and Siamak Hossainpour

Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz

(Received: 2014.3.10, Received in revised form: 2014.8.27, Accepted: 2014.9.3)

In this paper, propagation of propane-air premixed flame in a 2D diverging micro channel has been investigated numerically by emphasizing on the role of wall in flame stability. Effect of inlet velocity, wall thermal conductivity, heat loss coefficient and divergence angle on two modes of instability, blowout and extinction, has been studied. Stability maps have been drawn for straight and diverging channel and it has been shown that divergence angle changes stability map pattern and increases critical heat loss coefficient dramatically. In a certain case, heat loss coefficient of a channel with  $0.7^\circ$  divergence angle is about three times larger than the straight one. The variations of flame position with divergence angle and heat loss coefficient have also been presented.

**Keywords:** Microburner, Extinction, Blowout, Thermal wall conductivity, Heat loss coefficient