

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

حمیدرضا عسکری فرد جهرمی^{۱*}، سیامک حسین پور^۲

دانشگاه صنعتی سهند

ha.askarifard@yahoo.com*

چکیده

در این مقاله پایداری احتراق پروپان - هوا در یک میکرو برنر با کانال مستقیم و واگرا مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر سرعت جریان، ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره‌ی کانال و ضریب انتقال حرارت جابجایی جداره بیرونی کانال با محیط اطراف بر مشخصات شعله و مدهای خاموشی آن مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نقش زاویه‌ی واگرایی کانال بر دو پدیده‌ی خروج شعله از کانال و خفگی شعله مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد زاویه‌ی واگرایی تأثیر بسزایی در افزایش محدوده‌های پایداری شعله داشته و تحت شرایط خاصی از جریان زاویه‌دار بودن کانال سبب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی بحرانی تا سه برابر می‌گردد. همچنین این بررسی‌ها نشان می‌دهد زاویه‌ی واگرایی کانال تأثیر زیادی در محل استقرار شعله دائمی دارد و در برخی دیگرام‌های پایداری، الگوی تغییرات در مقایسه با کانال‌های مستقیم متفاوت است.

واژه‌های کلیدی: میکرو برنر، پایداری شعله، کانال واگرا، خفگی و خروج شعله از کانال

۱- مقدمه

احتراق در ابعاد کوچک به عنوان منبع تولید توان الکتریکی، مکانیکی و حرارتی در سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی کاربرد فراوانی دارد، از این رو 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. محفظه‌ی احتراق کوچک با توجه به ضخامتی که احتراق روی می‌دهد نام‌گذاری می‌شوند، بر اساس [۲] اگر این فاصله کمتر از یک میلی‌متر باشد به آن میکرو برنر^۳ و اگر از یک میلی‌متر بیشتر باشد به آن مزو برنر^۴ گفته می‌شود.

ریموندو و همکاران [۳] به بررسی عددی انتشار شعله در یک میکرو کانال به صورت دو بعدی همراه با دفع حرارت به محیط اطراف و باز تولید رادیکال در دیواره پرداختند. آن‌ها همچنین لغزش دما و غلظت گونه‌های شیمیایی در دیواره را نیز مورد توجه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که لغزش‌های 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. در میکرو برنرها به دلیل زیاد بودن نسبت سطح به حجم پدیده‌های انتقال (جرم و حرارت) نسبت به محفظه‌های احتراق عادی با شدت بیشتری انجام می‌پذیرد، از این رو میکرو برنرها مساعد خاموشی بر اثر نفوذ رادیکال در دیواره^۵ و خاموشی گرمایی^۶ هستند. پژوهشگران توانسته-

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی سهند

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی سهند

3-microburner
4- mesoburner
5- radical quenching
6- thermal quenching

اند جنس دیواره محفظه‌های احتراق را به گونه‌ای بسازند که رادیکال‌ها در آن نفوذ نکنند. خروج شعله از کانال^۱ و خفگی^۲ دو نوع خاموشی گرمایی می‌باشند. خروج شعله

از کانال هنگامی روی می‌دهد که زمان ماندگاری سیال در کانال کمتر از زمان انجام واکنش باشد، خفگی هنگامی اتفاق می‌افتد که گرمای تولیدشده به سبب واکنش نتواند بر گرمای از دست رفته به محیط غلبه کند. لیتس و همکاران [۴] نقش انتقال حرارت از دیواره به مخلوط قبل از احتراق و همین‌طور به محیط بیرون را در کارایی یک میکرو برنر سیلیکونی با استفاده از یک مدل بعدی بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که با کاهش اندازه‌ی میکرو برنر نقش انتقال حرارت از جبهه بعد از شعله به قبل از آن در پایداری احتراق افزایش می‌یابد. نورتن و همکاران [۵] مطالعه عددی بر روی مشخصات احتراق و پایداری شعله احتراق متان و هوای پیش مخلوط را با استفاده از نرم‌افزار فلونت انجام دادند. آن‌ها دیاگرامی را ارائه دادند که مقدار ضریب انتقال حرارت بحرانی که به ازای آن خروج شعله از کانال یا خفگی روی می‌دهد را بر حسب ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره مشخص می‌کرد و همچنین نشان دادند در برخی موارد هنگام خفگی شعله جریان و خصوصیات آن به صورت نوسانی خواهد بود. در این بررسی نشان داده شده است که دبی جریان تأثیر بسزایی در پایداری شعله داشته و با افزایش آن انتقال حرارت به خوبی انجام‌نشده و در نتیجه شعله از کانال خارج خواهد گردید. در این مطالعه نشان داده‌شده که اثرات انتقال حرارت تشعشی بر مشخصات شعله‌ی پایدار قابل صرف‌نظر است. نورتن و همکاران [۶] به بررسی تأثیر نوع سوخت در پایداری شعله پرداختند در این تحقیق به جای متان از سوخت پروپان استفاده گردید و نشان داده شد که شعله احتراق پروپان در محدوده بیشتری از ضریب انتقال حرارت پایدار خواهد بود. کیسر و همکاران [۷] جهت کاهش زمان محاسبات و به منظور بهینه‌سازی این نوع برنرها از مدل یک بعدی به جای مدل دو بعدی استفاده کردند. آن‌ها در این بررسی دو نوع سوخت متان و پروپان را مورد بررسی قرار داده و اثر ابعاد میکرو برنر (طول کانال، ضخامت دیواره و عرض شکاف کانال)، سرعت جریان، ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره، ضریب انتقال حرارت جابجایی با محیط و نسبت هم‌ارزی را بر دو مد مختلف مکانیزم خاموشی، خفگی و خروج شعله از کانال بررسی کردند.

جهت افزایش محدوده پایداری شعله درون کانال محفظه احتراق بایستی انتقال حرارت به جریان بالادستی افزایش یافته و درعین حال از خروج شعله از کانال جلوگیری گردد. این خاصیت با ایجاد کانال واگرا در میکرو برنرها تأمین می‌گردد. در ابتدای کانال که انتقال حرارت به جبهه‌ی قبل از شعله اهمیت دارد شکاف کانال کم است و از طرفی در انتها با باز شدن دیواره‌ها از هم خارج شدن شعله به دلیل افزایش زمان ماندگاری به تأخیر می‌افتد. بنابراین میکرو برنرهای واگرا می‌توانند پایداری بیشتری را در شرایط یکسان داشته باشند.

انتشار نا پایا و شبه پایا شعله (پروپان یا متان-هوا) درون یک نازل همگرا واگرا در ابعاد مزو به صورت پیش مخلوط توسط زو و همکاران [۸] به صورت تئوری و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. 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 (شعله‌ی پایدار، شعله‌ی پیش‌رونده، شعله‌ی روشن و خاموش شونده و شعله چرخشی) را گزارش کردند. با صرف‌نظر از اندازه‌ی 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 [۹] مشخصات و پایداری شعله‌ی متان-هوا را در کانال واگرا در ابعاد مزو با ضرایب هم‌ارزی، زوایای انحراف و دبی‌های مختلف و با اعمال گرادیان دمایی بر دیواره به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در محدوده‌ی نزدیک به برگشت شعله، شعله‌ی مسطح مشاهده شد اما در سرعت‌های متوسط و ضرایب هم‌ارزی بالا یعنی در جایی که نرخ انجام واکنش بالا است شعله کشیده شده، مشاهده گردید. آن‌ها شعله‌های متقارن و نامتقارن را نسبت به محور X با توجه به سرعت و ضریب هم‌ارزی ثبت کردند. در ضریب هم‌ارزی بالا شعله‌ی پایدار در سرعت‌های بالا، ولی برای ضرایب هم‌ارزی پایین

1- blowout

2- extinction

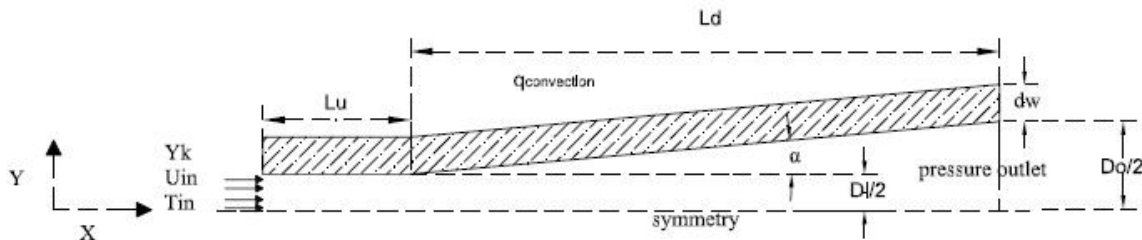
شعله‌ی پایدار در تمامی محدوده‌های سرعت مشاهده شد. آن‌ها بیان کردند که در مقایسه با کانال مستقیم کانال‌های واگرا محدوده‌ی سرعت پایداری شعله را برای مخلوط‌های یکسان به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. آن‌ها همچنین بیان کردند که در تمامی نسبت‌های هم‌ارزی افزایش زاویه انحراف سبب افزایش محدوده‌ی سرعت‌های ورودی برای تشکیل شعله‌ی پایدار می‌شود و این افزایش برای نسبت‌های هم‌ارزی کوچک‌تر از یک، بیشتر است. آن‌ها همچنین نشان دادند که با افزایش سرعت مکان شعله به صورت خطی به جلو حرکت می‌کند و رابطه‌ای را به دست آوردند که سرعت سوختن جریان آرام را برای مخلوط استوکیومتری متان و هوا بیان می‌کند. آن‌ها بیان کردند که مزو برنرها با کاهش سرعت جریان موجب پایداری شعله می‌شوند.

کومار [۱۰] به بررسی عددی دو بعدی احتراق استوکیومتری متان و هوا در کانال واگرا در ابعاد مزو با دیواره‌ای دما ثابت و عایق در حالت پایا پرداخت. وی بیان کرد که افزایش سرعت و تغییر در زاویه‌ی واگرایی موجب تغییر در شکل شعله می‌شود. او گزارش کرد که گردآبه‌های تشکیل شده در اطراف دیواره به خصوص در شرط دما ثابت نقش بسزایی در پایداری شعله دارند درحالی‌که در دیواره‌ی عایق این نقش بسیار کم رنگ‌تر است. آن‌ها بیان کردند در زاویه انحراف کمتر از ۱۰ درجه مکان شعله به زاویه‌ی انحراف وابسته است ولی اگر زاویه انحراف بزرگ‌تر از ۱۰ درجه باشد مکان شعله به زاویه انحراف وابسته نیست بنابراین آن‌ها توصیه کردند که برای کارایی بهتر زاویه انحراف باید کمتر از ۱۰ درجه باشد. باید توجه داشت که استفاده از شرط دما ثابت در دیواره از نظر فیزیکی زیاد معقول به نظر نمی‌رسد.

اغلب کارهای آزمایشگاهی و عددی که زاویه انحراف را مورد بررسی قرار داده‌اند ابعاد محفظه‌ی احتراق را مزو در نظر گرفتند، برای پایدار نگه‌داشتن شعله از یک منبع خارجی استفاده نموده‌اند و از نقش دیواره در پایداری شعله صرف‌نظر کرده‌اند. باید توجه داشت که تعامل بین دیواره و شعله در ابعاد میکرو و مزو با یکدیگر تفاوت بسیاری دارد. هدف مطالعه عددی حاضر بررسی پایداری شعله احتراقی پروپان-هوا در کانال واگرا در ابعاد میکرو و بررسی نقش دیواره‌های کانال در پایداری مورد توجه خواهد بود.

۲- مدل

همان طور که در شکل ۱ مشخص است جریان هوا و پروپان به صورت پیش مخلوط وارد کانال دوبعدی و متقارن می‌شود، کانال در ابتدا دارای عرض ثابت $Di=400\mu m$ به طول $Lu=2mm$ است و پس از آن عرض کانال با زاویه‌ی واگرا می‌شود، به طوری که طول قسمت واگرا $Ld=8mm$ بوده و همچنین ضخامت دیواره برابر با $dw=200\mu m$ است. در این مقاله سه زاویه‌ی واگرایی ۰، ۷/۰ و ۱۵/۰ درجه به گونه‌ای که عرض مقطع خروجی به ترتیب ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میکرومتر است، مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۱- فیزیک مسئله

۲-۱- معادلات حاکم

معادله بقاء جرم:

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

با صرف نظر از نفوذ بر اثر گرادیان دما^۱ معادله ی بقاء هر یک از اجزاء شیمیایی به شکل زیر در می آید:

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

معادله بقاء ممنتوم در راستای x و y به شکل معادلات ۳ و ۴ است.

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

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

معادله انرژی با صرف نظر کردن از انتقال حرارت به دلیل اثر دوفر^۲ و با توجه به ثابت بودن فشار ترمودینامیکی به شکل معادله-ی ۵ در می آید.

$$\dots \frac{Dh}{Dt} = \frac{\partial \left(k_f \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(k_f \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial \left(\dots h_i D_{i,mix} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right)}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \left(\dots h_i D_{i,mix} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right)}{\partial y} \right) \right] - \sum_{i=0}^n \dot{S}_i \Delta h_0^f M_i \quad (5)$$

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

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

معادله ی حالت:

$$p_0 = \dots RT \quad (7)$$

گرانروی، ضریب انتقال حرارت ویژه مخلوط و ضریب رسانشی مخلوط از رابطه های زیر به دست می آید:

$$k = \sum_{i=1}^N Y_i k_i, \quad C_p = \sum_{i=1}^N Y_i C_{p_i}, \quad \sim = \sum_{i=1}^n Y_i \sim_i \quad (8)$$

گرانروی، ضریب انتقال حرارت رسانشی و نفوذ هر جزء با استفاده از تئوری جنبش به دست می آید و ضریب انتقال حرارت ویژه هر جزء توسط معادلات چند ضابطه ای^۳ بیان می شود.

۲-۲- شرایط مرزی

مخلوط پروپان و هوا با نسبت استوکیومتری با سرعت و دمای ثابت وارد کانال می گردد. در دیواره ی داخلی شرط عدم لغزش سرعت و عدم نفوذ گونه های شیمیایی برقرار بوده و ارتباط بین فاز جامد و سیال با استفاده از قانون فوریه به دست می آید. پیوستگی دما و شار حرارتی در مرز تماس سیال و جامد برقرار است. در خروج از کانال فشار ثابت و گرادیان بقیه متغیرها صفر اعمال شده است. با توجه به متقارن بودن هندسه و شرایط مرزی از شرط محور تقارن در خط تقارن کانال استفاده شده

1- Soret effects
2- Dufour effect
3- piecewise polynomials

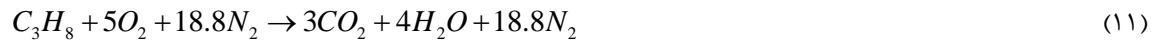
است. ابتدا و انتهای دیواره عایق فرض شده است. در سطح دیواره‌ی خارجی انتقال گرما به محیط توسط قانون سرمایش نیوتن به دست می‌آید.

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

که در آن دمای محیط 300K فرض شده است.

۳-۲- مکانیزم واکنش

در این پروژه هدف بررسی تقابل بین فاز سیال و جامد و نقش دیواره در پایداری شعله است، اگرچه مکانیزم تک مرحله‌ای مکان و دمای دقیق شعله را مشخص نمی‌کند اما این هدف را به خوبی محقق می‌کند و زمان انجام محاسبات را در مقایسه با مکانیزم چند مرحله‌ای کاهش می‌دهد. بنابراین از مکانیزم کلی تک مرحله‌ای بیان شده در مقاله‌ی وست‌بروک و همکاران [۱۱] استفاده شده است.



نرخ انجام واکنش از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$K = 4.836 * 10^9 * \exp(-1.256 * 10^5 / RT) [C_3H_8]^{0.1} [O_2]^{1.65} \quad (12)$$

۴-۲- روش عددی

برای حل معادلات بقاء از روش حجم محدود و نرم‌افزار فلوئنت ۶.۳.۲۶ استفاده شده است. برای گسسته سازی معادلات از روش بالادست مرتبه دوم^۱ و در حل معادلات جفت شده‌ی سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل و همچنین برای همگرایی از روش زیر تخفیف^۲ بهره برده شده است. مقدار مانده‌ی معیار برای همگرایی در همه‌ی معادلات بقاء 10^{-6} است.

۳- بررسی استقلال نتایج از شبکه

از شبکه‌ی چهارضلعی با اندازه یکنواخت در راستای X و غیریکنواخت در راستای y استفاده شده است (شکل ۲الف). در شکل ۲ب نرخ انجام واکنش در محور تقارن برای کانالی با زاویه انحراف 0.7° درجه، $k_{wall}=3\text{W/mK}$ ، $h=20\text{W/m}^2\text{K}$ و سرعت ورودی 0.5 m/s برای چهار شبکه‌ی مختلف با تعداد ۳۰۰۰، ۶۰۰۰، ۹۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ خانه نشان داده شده است. همگرایی در حل با افزایش تعداد خانه‌ها به خوبی در این شکل مشخص است. شبکه‌ای با ۶۰۰۰ خانه از دقت کافی برخوردار است زیرا با افزایش خانه‌ها از ۶۰۰۰ به ۹۰۰۰ خانه بیشینه نرخ انجام واکنش تنها $1/42\%$ افزایش می‌یابد.

۴- اعتبارسنجی نتایج

برای اعتبارسنجی نتایج نقشه‌ی پایداری برای مخلوط استوکیومتری پروپان-هوا در کانالی به عرض $400\mu\text{m}$ با ضخامت دیواره‌ی $20\mu\text{m}$ و سرعت ورودی 0.5m/s با استفاده از مدل دو بعدی رسم و با مدل یک بعدی کیسر و همکاران [۷] مقایسه شده است (شکل ۳). در این شکل علامت مربع نشان‌دهنده‌ی خروج شعله از کانال و مثلث نشان‌دهنده‌ی خفگی است و به ازای هر ضریب رسانشی، ضریب انتقال حرارت جایجایی بیشینه‌ای مشخص شده است، که به ازای آن شعله در آستانه‌ی ناپایداری قرار می‌گیرد. در ضرایب رسانشی بالا تقریباً هر دو نمودار بر هم منطبق‌اند اما در ضرایب رسانشی پایین با یکدیگر اختلاف دارند دلیل این اختلاف نادیده گرفتن انتقال حرارت محوری در فاز سیال توسط مدل یک بعدی است. اما روند تغییرات در هر دو مدل یکسان است بنابراین می‌توان از صحت نتایج اطمینان یافت.

۵- نتایج

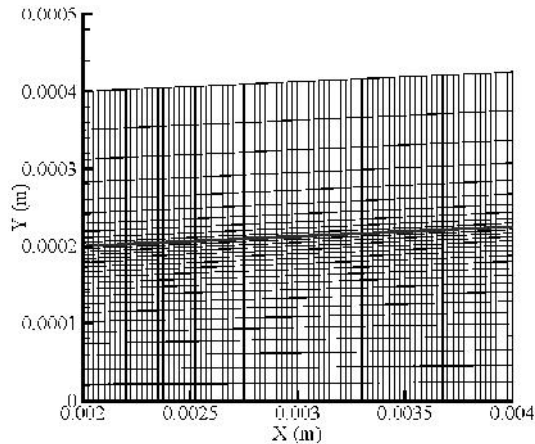
۵-۱- نقش دیواره در پایداری شعله

در شکل ۴ کانتور دما را برای کانال واگرا با زاویه‌ی انحراف 0.7° درجه، $k_{wall}=1\text{W/mK}$ ، $h=20\text{W/m}^2\text{K}$ و $v=0.5\text{m/s}$ نشان داده شده است. گرادیان دمایی در امتداد دیواره نشان‌دهنده‌ی نقش دیواره در خود پایداری شعله است. دیواره گرما را از

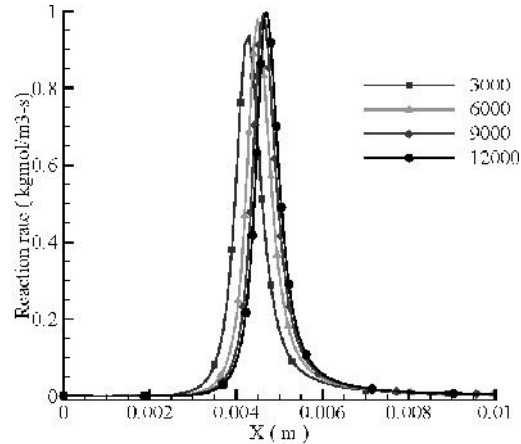
1- second order upwind

2- under relaxation

جبهه‌ی بعد از شعله به قبل از آن منتقل می‌کند، دیواره قبل از شعله چشمه‌ی 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 ۴ شعله به دیواره بسیار نزدیک است و این نزدیکی سبب تشدید اثر متقابل جریان و دیواره می‌شود. در واقع تفاوت عمده‌ی میکرو برنرها و مشعل‌های عادی در همین امر است.

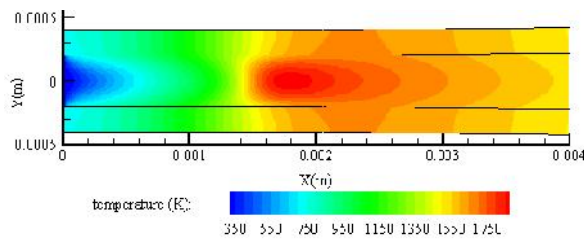


ب- شبکه مورد استفاده



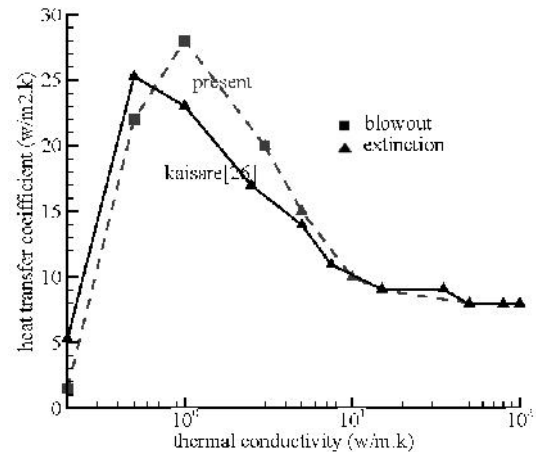
الف- استقلال شبکه

شکل ۲



شکل ۴- کانتور دما برای کانالی با زاویه انحراف ۰/۷ در

$$v=0/\Delta m/s \text{ و } h=20w/m^2K, k_{wall}=1W/mK$$



شکل ۳- مقایسه نتایج پروژه‌ی حاضر با پژوهش [۷] برای

مخلوط پروپان-هوا با سرعت ورودی $v=0/\Delta m/s$ در کانال

مستقیم به عرض $400\mu m$ و ضخامت دیواره $200\mu m$

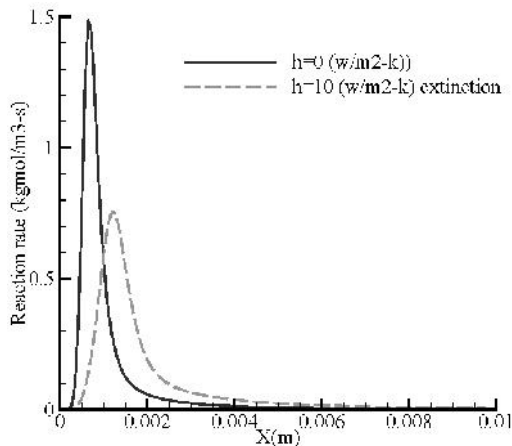
۲-۵- مکانیزم‌های خاموشی

در محفظه‌ی احتراق زمان ماندگاری سیال و زمان انجام واکنش با یکدیگر در رقابت‌اند. اگر زمان ماندگاری کمتر از زمان لازم برای انجام واکنش باشد شعله به سمت پایین کانال کشیده می‌شود، و شعله در آستانه‌ی خروج از کانال قرار می‌گیرد یا به عبارت دیگر خروج شعله زمانی روی می‌دهد که انتقال حرارت از دیواره به مخلوط قبل از اشتعال به کندی صورت گیرد. بدین ترتیب خروج شعله در سرعت ورودی بالا (به دلیل زمان ماندگاری کم) و ضریب انتقال حرارتی پایین (به دلیل کندی در انتقال حرارت) ممکن است روی دهد. اما زمانی که گرمای تولیدشده به سبب واکنش نتواند بر گرمای از دست رفته از دیواره به محیط غلبه کند، خفگی روی می‌دهد. نرخ انجام واکنش به هنگام خروج شعله از کانال در شکل ۵ و به هنگام خفگی در شکل ۶ نشان داده شده است.

در هر دو مکانیزم خاموشی بیشینه نرخ انجام واکنش کاهش می‌یابد این کاهش برای خفگی محسوس‌تر است. به هنگام خفگی برخلاف خروج شعله از کانال ناحیه انجام واکنش پهن و شعله در ابتدای کانال تشکیل می‌شود. در ضرایب رسانشی پایین خروج شعله از کانال و در ضرایب رسانشی بالا خفگی روی می‌دهد. در ضرایب رسانشی متوسط هر دو مکانیزم باهم روی می‌دهد یعنی محدوده‌ی انجام واکنش علاوه بر پهن شدن به سمت پایین کانال نیز کشیده می‌شود.

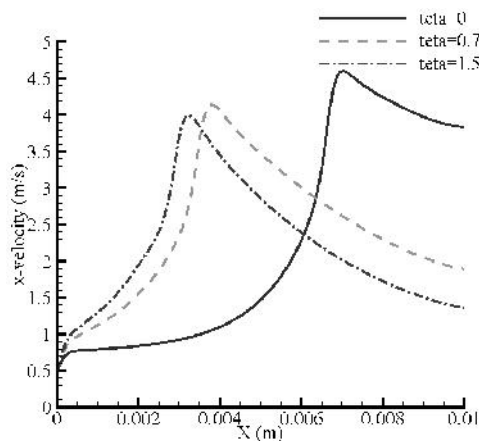
۳-۵- سرعت در راستای x در طول کانال

نمودار سرعت در راستای x در خط تقارن برای سه زاویه‌ی متفاوت و $k_{wall}=1W/mK$ در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. در شکل ۷ $h=20W/m^2K$ است و شعله در هر سه هندسه در یک مکان و در قسمت مستقیم کانال قرار دارد. سرعت قبل از جبهه‌ی شعله به دلیل افزایش دما، افزایش و پس از آن به دلیل کاهش دما، کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه‌ی واگرایی، کاهش سرعت به دلیل افزایش سطح مقطع افزایش می‌یابد. با افزایش h به میزان $25W/m^2K$ شعله در کانال مستقیم در آستانه‌ی خروج از کانال قرار می‌گیرد (شکل ۸). زاویه‌ی واگرایی موجب افزایش زمان ماندگاری سیال در کانال می‌شود و از خروج شعله جلوگیری می‌کند. با افزایش زاویه‌ی واگرایی، شعله در فاصله‌ی نزدیک‌تری تشکیل می‌شود. افزایش زمان ماندگاری به معنای کاهش سرعت سیال و متعاقب آن کاهش نرخ انجام واکنش است.



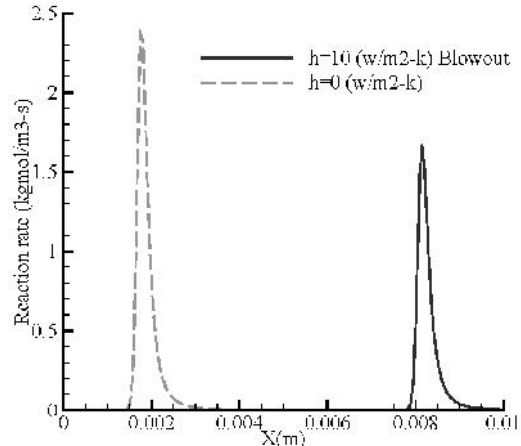
شکل ۵- پدیده‌ی خروج شعله از کانال- نرخ انجام واکنش در محور تقارن برای کانالی با زاویه انحراف ۰/۷ درجه در $k_{wall}=15W/mK$

$$v=0/\Delta m/s \text{ و } h=10W/m^2K$$



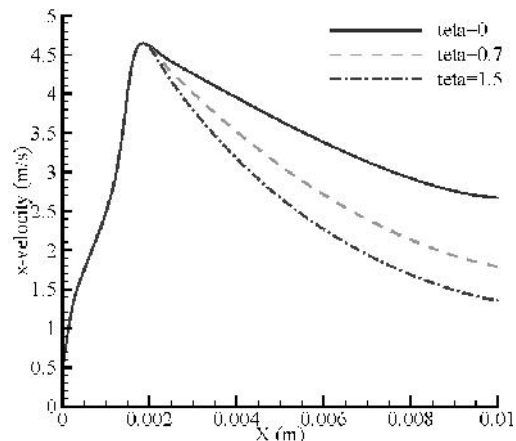
شکل ۶- نمودار سرعت در راستای محور x در محور تقارن با سه زاویه‌ی متفاوت در حالتی که $h=25W/m^2K$, $k_{wall}=1W/mK$

$$v=\Delta m/s$$



شکل ۷- پدیده‌ی خروج شعله از کانال- نرخ انجام واکنش در محور تقارن برای کانالی با زاویه انحراف ۰/۷ درجه در

$$v=0/\Delta m/s \text{ و } h=10W/m^2K, k_{wall}=0/2W/mK$$



شکل ۸- نمودار سرعت در راستای محور x در محور تقارن با سه زاویه‌ی متفاوت در حالتی که $h=20W/m2K$, $k_{wall}=1W/mK$

$$v=0/\Delta m/s$$

۴-۵- تأثیر ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره

دمای دیواره‌ی داخلی برای کانال مستقیم با دیواره‌ی خارجی عایق و سرعت ورودی 0.5 m/s برای سه ضریب انتقال حرارت رسانشی مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. با افزایش ضریب انتقال حرارت رسانشی، نمودار دما یکنواخت تر می‌شود و در فاصله‌ی کمتری به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در ضرایب انتقال حرارت رسانشی پایین دمای دیواره مقدار بیشتری را دارد.

کانتور نرخ انجام واکنش برای کانال مستقیم، $h=0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ و سرعت ورودی 0.5 m/s در سه ضریب انتقال حرارت رسانشی متفاوت در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

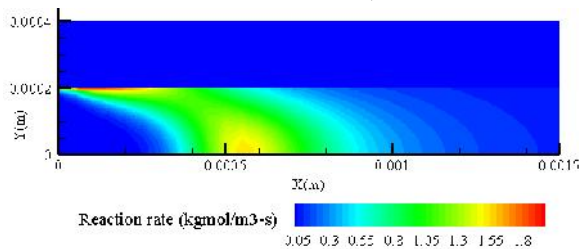
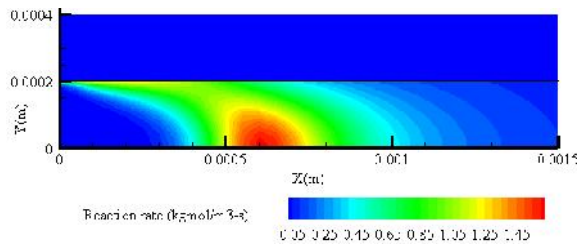
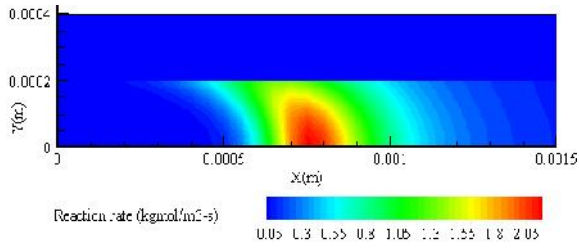
با توجه به شکل ۱۰، با کاهش ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره انتقال حرارت از جبهه‌ی پس از شعله به جریان سرد ورودی با کندی بیشتری صورت می‌پذیرد و شعله در فاصله‌ی دورتری از ابتدای کانال تشکیل می‌شود. در ضرایب رسانشی پایین به دلیل بالا بودن دما، نرخ انجام واکنش بیشتر و محدوده‌ی انجام واکنش باریک تر است. در ضرایب انتقال حرارت رسانشی بالا نرخ انجام واکنش در اطراف دیواره به دلیل بالا بودن دما در ابتدای کانال (شکل ۹) بزرگ تر است، به گونه‌ای که در $k_{\text{wall}}=5.0 \text{ W/mK}$ نرخ انجام واکنش در اطراف دیواره از نرخ انجام واکنش از وسط کانال بیشتر است اما این نرخ واکنش بالا، تنها در ناحیه‌ی کوچکی در کنار دیواره برقرار است و در وسط کانال نرخ انجام واکنش از نرخ انجام واکنش با ضرایب رسانشی پایین، کمتر است. در مجموع هرچه ضریب انتقال حرارت رسانشی کمتر باشد دمایی که واکنش در محفظه‌ی احتراق روی می‌دهد بیشتر است و احتراق به صورت کامل تری انجام می‌پذیرد. نتایج مشابهی برای کانال‌های واگرا نیز به دست آمد.

۵-۵- تأثیر سرعت ورودی

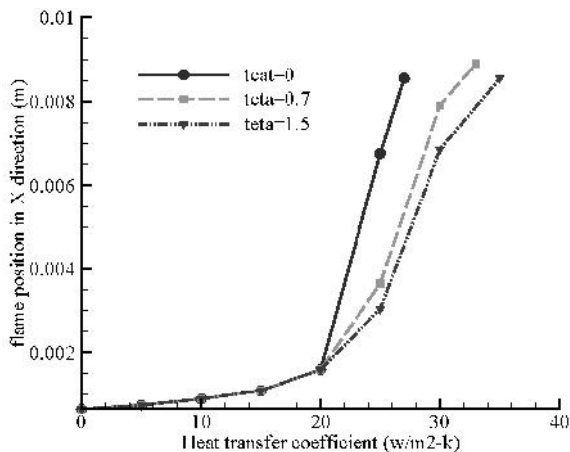
تأثیر سرعت ورودی بر روی نرخ انجام واکنش در شکل ۱۱ برای کانال مستقیم با $k_{\text{wall}}=2.0 \text{ W/mK}$ و $h=1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ نشان داده شده است. با افزایش سرعت ورودی، اجزاء واکنش دهنده با سرعت بالاتری به جبهه‌ی شعله نزدیک می‌شوند از این رو نرخ انجام واکنش افزایش می‌یابد و شعله نیز به سمت پایین کانال کشیده می‌شود. افزایش نرخ انجام واکنش دمای محفظه-ی احتراق و متعاقب آن دمای دیواره را افزایش می‌دهد، به گونه‌ای که دمای بیشینه برای سرعت 0.6 ، 2 و 4 متر بر ثانیه به ترتیب 1680 ، 2260 و 2400 کلوین است. افزایش دمای دیواره ممکن است سبب تخریب دیواره شود بنابراین سرعت ورودی یکی از پارامترهای مهم در ساخت میکرو برنرها محسوب می‌شود. افزایش سرعت باعث تغییر شکل شعله می‌شود به گونه‌ای که در سرعت پایین شعله در یک نقطه متمرکز است اما در سرعت‌های بالا شعله در امتداد کانال کشیده می‌شود. در سرعت‌های متوسط بیشینه نرخ انجام واکنش در اطراف دیواره قرار دارد در حالی که در سرعت‌های بالا و پایین بیشینه نرخ انجام واکنش در خط تقارن است.

۶-۵- تأثیر زاویه‌ی واگرایی و ضریب انتقال حرارت جابجایی بر مکان شعله

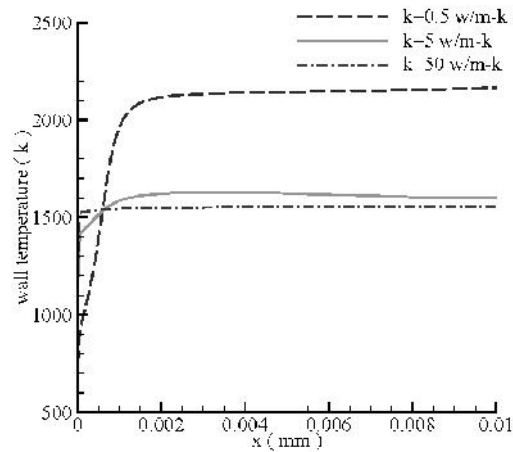
در شکل ۱۲ مکان شعله بر حسب ضریب انتقال حرارت جابجایی محیط برای $k_{\text{wall}}=1 \text{ W/mK}$ و سرعت ورودی 0.5 m/s در سه زاویه‌ی مختلف نشان داده شده است. مکان شعله بر اساس مکان بیشینه نرخ انجام واکنش محاسبه شده است. با افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در هر سه زاویه شعله به سمت پایین کانال جابجا و در ضریب جابجایی مشخصی سرانجام شعله از کانال خارج می‌شود. در واقع با افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی، انتقال حرارت به محیط اطراف افزایش و انتقال حرارت به جبهه‌ی قبل از شعله 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 جابجایی که به ازای آن شعله از کانال خارج می‌شود مربوط به کانال مستقیم و بیشترین ضریب مربوط به کانال واگرا با زاویه‌ی انحراف $1/5$ درجه است. تا زمانی که ضریب انتقال حرارت جابجایی کمتر از مقدار مشخصی ($h=2.0 \text{ W/m}^2\text{K}$) است و شعله در قسمت تخت کانال قرار دارد مشخصات شعله در هر سه زاویه یکسان است. در یک ضریب ثابت و بزرگ تر از 2.0 شعله در کانال واگرا در مکان نزدیک تری از ورودی نسبت به کانال مستقیم قرار می‌گیرد و هرچه زاویه‌ی واگرایی بیشتر شود، شعله در فاصله‌ی نزدیک تری تشکیل می‌شود.



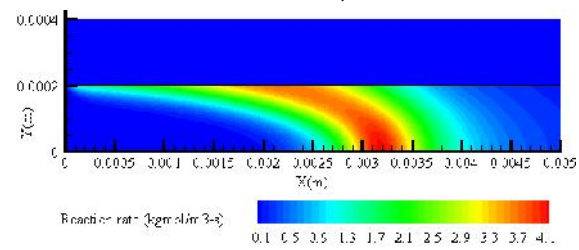
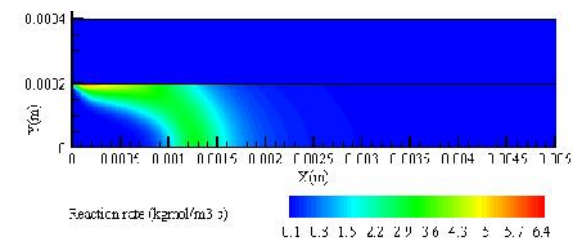
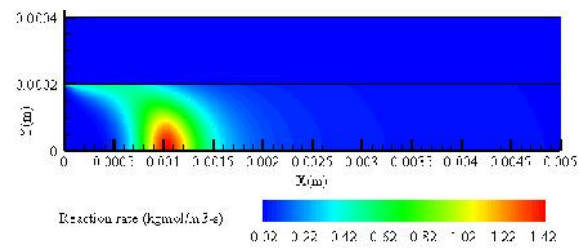
شکل ۱۰- نرخ انجام واکنش در کانال مستقیم برای سه ضریب رسانشی مختلف، $v=0 \text{ m/s}$ و $h=0 \text{ W/m}^2\text{K}$



شکل ۱۲- مکان شعله بر حسب ضریب انتقال حرارت جابجایی برای سه زاویه‌ی مختلف در $k_{wall}=1 \text{ W/mK}$ و $v=1 \text{ m/s}$



شکل ۹- نمودار دمای دیواره‌ی داخلی برای سه ضریب انتقال حرارت رسانشی متفاوت در کانال مستقیم در حالی که $v=0 \text{ m/s}$ و $h=0 \text{ W/m}^2\text{K}$



شکل ۱۱- نرخ انجام واکنش در کانال مستقیم برای سه سرعت ورودی در حالت $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ و $k_{wall}=20 \text{ W/mK}$

۵-۷- نقشه‌های پایداری

۱-۷-۵- ضریب انتقال حرارت جابجایی بحرانی بر حسب ضریب رسانشی دیواره

در شکل ۱۳ نقشه پایداری بر حسب ضریب انتقال حرارت جابجایی بحرانی و ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره در سرعت ورودی ۰/۵ متر بر ثانیه برای کانال مستقیم، کانال با زاویه‌ی واگرایی ۰/۷ و ۱/۵ درجه نشان داده شده است. به ازای هر ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره ضریب انتقال حرارت جابجایی وجود دارد که به ازای آن، شعله یا در آستانه‌ی خروج یا در آستانه خفگی قرار می‌گیرد. علامت مربع نشان‌دهنده‌ی خروج شعله و مثلث نشان‌دهنده‌ی خفگی است. محور ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره لگاریتمی است. همان طور که در شکل ۱۳ مشخص است نمودار در زاویه‌ی واگرایی ۱/۵ درجه به صورت کامل رسم نشده است. دلیل این امر آن است که در $k_{wall}=5$ و 2W/mK نوع ناپایداری از نوع خروج شعله و خفگی نیست. در ادامه در این باره بیشتر توضیح داده خواهد شد.

کانال مستقیم: در ضرایب انتقال حرارت رسانشی کمتر از ۰/۱، حتی با دیواره‌ی عایق شعله از کانال خارج می‌شود. در ضرایب انتقال حرارت رسانشی بین ۰/۱ و ۱ خاموشی از نوع خروج شعله و در ضرایب بیش از ۱ از نوع خفگی است. در ضرایب انتقال حرارت رسانشی پایین گرچه انتقال حرارت به محیط اطراف ناچیز است ولی انتقال حرارت به جبهه‌ی قبل از شعله نیز به کندی روی می‌دهد و سبب تشکیل شعله در فاصله‌ی دورتری از ورودی می‌شود بنابراین در این ضرایب خاموشی از نوع خروج شعله است. در ضرایب انتقال حرارت رسانشی بالا، انتقال حرارت به جبهه‌ی قبل از شعله 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 از دست رفته بر گرمای تولیدشده غلبه می‌کند و موجب خفگی شعله می‌شود. با توجه به شکل ۱۳، با افزایش ضریب انتقال حرارت رسانشی تا مقدار 1W/mK ضریب انتقال حرارت جابجایی بحرانی افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده‌ی نقش دوگانه‌ی دیواره در پایداری شعله است. بیشینه ضریب انتقال حرارت جابجایی بحرانی به میزان $28\text{W/m}^2\text{K}$ در ضریب رسانشی 1W/mK است. در ضرایب رسانشی بالاتر از 15W/mK با تغییر ضریب انتقال حرارت رسانشی، ضریب انتقال حرارت جابجایی بحرانی تغییر چندانی نمی‌کند.

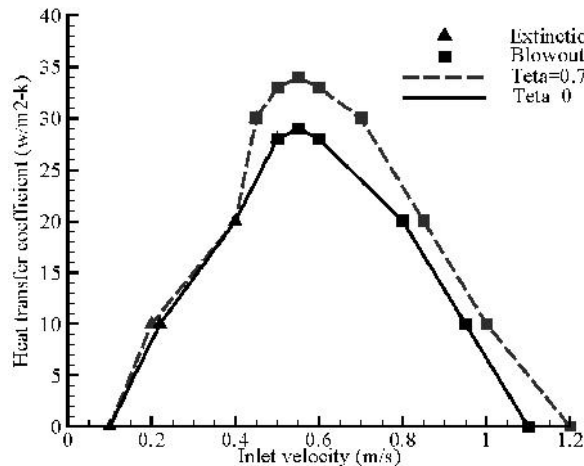
کانال با زاویه‌ی واگرایی ۰/۷ درجه: واگرایی ناحیه‌ی پایداری را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد، به گونه‌ای که در $k_{wall}=100\text{W/mK}$ ، ضریب انتقال حرارت جابجایی بحرانی نسبت به کانال مستقیم تقریباً سه برابر می‌شود. کمترین مقدار افزایش در ضریب انتقال حرارت جابجایی بحرانی برای ضرایب رسانشی متوسط ($k_{wall} = 15\text{W/mK}$) است. همانند کانال مستقیم در ضرایب رسانشی کمتر از ۰/۱ تشکیل شعله‌ی پایدار به هیچ‌وجه امکان‌پذیر نیست. نوع خاموشی در ضرایبی که کوچک‌تر از ۳ است از نوع خروج شعله و در ضرایب بزرگ‌تر از نوع خفگی است. الگوی تغییرات ضریب انتقال حرارت 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 پدیده‌ی خروج شعله می‌شود. اما همان طور که مشاهده می‌شود زاویه‌ی واگرایی سبب تأخیر در پدیده‌ی خفگی نیز می‌شود به گونه‌ای که بیشینه افزایش ضریب بحرانی برای خفگی روی می‌دهد. دلیل این امر آن است که واگرایی با کاهش سرعت، برای انتقال حرارت بین سیال و دیواره در قبل و بعد از جبهه‌ی شعله فرصت بیشتری را ایجاد می‌کند.

کانال با زاویه‌ی واگرایی ۱/۵ درجه: در ضریب رسانشی ۰/۱ 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 بر حسب ضریب انتقال حرارت رسانشی همانند کانال با زاویه‌ی واگرایی ۰/۷ درجه است. در این زاویه‌ی واگرایی هر دو پدیده‌ی خروج شعله و خفگی نسبت به کانال مستقیم به شدت تأخیر می‌افتد. قسمتی از نمودار کانال با زاویه‌ی واگرایی ۱/۵ درجه در شکل ۱۳ به دلیل تفاوت در ناپایداری رسم نشده است. در دو ضریب رسانشی 3W/mK و ۵ به ترتیب تا ضریب انتقال حرارت جابجایی $25\text{W/m}^2\text{K}$ و 23 شعله‌ی پایا و پایدار

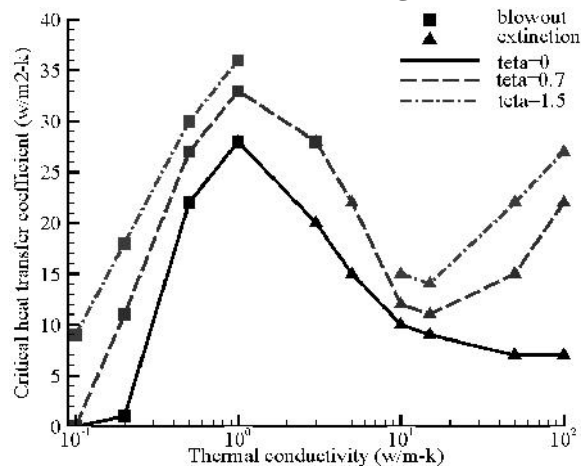
تشکیل می‌شود. با افزایش ضرایب انتقال حرارت جابجایی بر خلاف دو حالت قبل نه پدیده‌ی خفگی و نه خروج شعله روی می‌دهد و مسئله در حالت پایا همگرا نمی‌شود. حل‌های اولیه به صورت نا پایا تشکیل شعله‌ی نوسانی را نشان می‌دهد این نوع از ناپایداری توسط نورتن و همکاران [۵] نیز گزارش شد. البته مطالعه‌ی این نوع ناپایداری نیازمند تحلیل‌های بیشتری است. به طور خلاصه واگرایی نه تنها سبب تأخیر در پدیده‌ی خروج شعله بلکه باعث تأخیر در خفگی نیز می‌شود و الگوی نقشه‌ی پایداری در کانال واگرا با کانال مستقیم متفاوت است.

۲-۷-۵- بیشینه و کمینه‌ی سرعت بر حسب ضریب انتقال حرارت جابجایی

در شکل ۱۴ بیشینه و کمینه‌ی سرعت برای تشکیل شعله‌ی پایدار بر حسب ضریب انتقال حرارت جابجایی در کانال مستقیم و کانال با زاویه‌ی واگرایی ۰/۷ درجه نشان داده شده است. علامت مربع نشان‌دهنده‌ی خروج شعله و علامت مثلث نشان‌دهنده‌ی خفگی شعله است.



شکل ۱۴- نقشه‌ی پایداری- محدوده‌ی سرعت بر حسب ضریب انتقال حرارت جابجایی دیواره در $k_{wall}=1W/mK$ برای کانال مستقیم و کانال واگرا با زاویه‌ی ۰/۷ درجه



شکل ۱۳- ضریب انتقال حرارت بحرانی بر حسب ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره در سه زاویه‌ی مختلف با سرعت ورودی ۰/۵ متر بر ثانیه

کانال مستقیم: برای دیواره‌ی عایق ($h=0W/m^2K$) کمینه سرعت ۰/۱ و بیشینه سرعت ۱/۱ متر بر ثانیه است. با افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی محدوده‌ی سرعت برای تشکیل شعله‌ی پایدار محدودتر می‌شود، به گونه‌ای که در ضریب انتقال حرارت جابجایی برابر با $29W/m^2K$ شعله تنها با سرعت ورودی ۰/۵۵ متر بر ثانیه پایدار است. در سرعت‌های پایین خاموشی از نوع خفگی و در سرعت‌های بالا از نوع خروج شعله است. در سرعت‌های پایین نرخ انجام واکنش کم است و گرمای تولیدشده به اندازه‌ای نیست که بتواند سبب پایداری شعله شود بنابراین شعله دچار خفگی می‌شود. در سرعت‌های بالا به دلیل زمان ماندگاری کوتاه سیال در کانال انتقال گرما به جبهه‌ی قبل از شعله به خوبی صورت نمی‌پذیرد و خاموشی از نوع خروج شعله است.

کانال واگرا با زاویه‌ی ۰/۷ درجه : در کانال واگرا الگوی تغییرات همانند کانال مستقیم است. واگرایی بر کمینه سرعت و یا خفگی 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 باعث افزایش بیشینه ضریب انتقال حرارت جابجایی که به ازای آن شعله پایدار تشکیل می‌شود نیز می‌گردد و در $h=34W/m^2K$ تنها با سرعت ۰/۵۵ متر بر ثانیه شعله پایدار تشکیل می‌شود.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله به مطالعه‌ی عددی و دوبعدی احتراق پروپان و هوا در میکرو برنر پرداخته شد. تأثیر ضریب انتقال حرارت رسانشی و سرعت ورودی بر مشخصات شعله مورد ارزیابی قرار گرفت. نشان داده شد که زاویه‌ی واگرایی نه تنها خروج شعله از کانال بلکه خفگی را نیز به تأخیر می‌اندازد به گونه‌ای که در برخی موارد ضریب انتقال حرارت جابجایی بحرانی را تا سه برابر افزایش می‌دهد. الگوی تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی بر حسب ضریب انتقال حرارت رسانشی در کانال واگرا با کانال مستقیم متفاوت است. تا زمانی که شعله در ناحیه‌ی با مقطع ثابت قرار دارد مشخصات شعله برای هر سه زاویه یکسان است.

مراجع

- [1] R. I. Masel and M. A. Shannon, "Microcombustor having submillimeter critical dimensions," US6193501 B12001.
- [2] N. S. Kaisare and D. G. Vlachos, "A review on microcombustion: Fundamentals, devices and applications," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 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.*, vol. 29, no. 1, pp. 901–907, Jan. 2002.
- [4] 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.*, vol. 30, no. 2, pp. 2437–2444, Jan. 2005.
- [5] 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.*, vol. 58, no. 21, pp. 4871–4882, Nov. 2003.
- [6] D. G. Norton and D. G. Vlachos, "A CFD study of propane/air microflame stability," *Combust. Flame*, vol. 138, no. 1–2, pp. 97–107, Jul. 2004.
- [7] N. S. Kaisare and D. G. Vlachos, "Optimal reactor dimensions for homogeneous combustion in small channels," *Catal. Today*, vol. 120, no. 1, pp. 96–106, Jan. 2007.
- [8] B. Xu and Y. Ju, "Experimental study of spinning combustion in a mesoscale divergent channel," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 31, no. 2, pp. 3285–3292, Jan. 2007.
- [9] M. Akram and S. Kumar, "Experimental studies on dynamics of methane–air premixed flame in meso-scale diverging channels," *Combust. Flame*, vol. 158, no. 5, pp. 915–924, May 2011.
- [10] S. Kumar, "Numerical Studies on Flame Stabilization Behavior of Premixed Methane–Air Mixtures in Diverging Mesoscale Channels," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 183, no. 8, pp. 779–801, Apr. 2011.
- [11] F. L. D. CHARLES K. WESTBROOK, "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames.pdf," *Combust. Sci. anti Technol.*, vol. 27, pp. 31–43, 1981.