

## بررسی تاثیر زاویه همگرایی-واگرایی بر مشخصه‌های احتراقی مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در میکرولوله‌های همگرا-واگرا

پویان عباسپور<sup>۱</sup>، علیرضا علی‌پور<sup>۲\*</sup> و یوسف تمثیلیان<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، p-abbaspour@stu.scu.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، a.alipoor@shirazu.ac.ir

۳- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، tamsilian@scu.ac.ir

\*نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۳۹۹/۰۲/۱۲، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴)

**چکیده:** در مطالعه حاضر، مشخصه‌های احتراقی مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در میکرولوله‌های همگرا-واگرا، با استفاده از شبیه‌سازی عددی فرایند احتراق، بررسی شده است. هدف این پژوهش بررسی تاثیر سرعت جریان ورودی و زاویه همگرایی-واگرایی بر مشخصه‌های احتراقی شامل بیشینه دمای شعله، موقعیت شعله، حدشعله‌وری بالا و ضخامت شعله در قطر در محدوده قطر خاموشی شعله است. معادلات حاکم به صورت سه بعدی و گذرا در نظر گرفته شده‌اند و از مکانیزم شیمیایی جزئی واکنش هیدروژن و هوا استفاده شد. نتایج نشان دادند که سرعت جریان ورودی بر موقعیت شعله درون میکرولوله تاثیر می‌گذارد و بیشینه دمای شعله متأثر از موقعیت قرارگیری شعله درون میکرولوله تغییر می‌کند. کمترین دمای شعله در یک نسبت هم‌ارزی مشخص زمانی ایجاد می‌شود که شعله در قسمت گلوگاه قرار گرفته باشد. مشخص شد که سرعت جریان ورودی و قسمت گلوگاه تاثیر مستقیمی بر ضخامت و کشیدگی شعله دارند. افزایش ضخامت و کشیدگی شعله در سرعت‌های زیاد، برای میکرولوله‌های با قطر گلوگاه کم، موجب بیرون زدن قسمتی از ناحیه احتراق از میکرولوله و در نهایت خارج شدن از حد شعله‌وری بالا می‌شود. از مقایسه نتایج با یک میکرولوله با مقطع ثابت و ابعاد مشابه مشخص شد که ایجاد ناحیه گلوگاه در میکرولوله‌ها موجب افزایش حد شعله‌وری بالا در آن‌ها می‌شود.

**کلیدواژگان:** میکرولوله همگرا-واگرا، گلوگاه، شعله، هیدروژن، حد شعله‌وری بالا، ضخامت شعله

### مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی امکان طراحی و ساخت تجهیزات کوچک برای کاربردهایی نظیر حمل و نقل، عکس برداری، ارتباطات، پزشکی، اکتشاف‌های فضایی و صنایع نظامی فراهم شد. این تجهیزات، متناسب با کاربری خود، به یک منبع تولید انرژی سبک با قابلیت ایجاد ولتاژ بالا و شارژ سریع نیاز دارند. این انرژی امروزه عمدتاً از طریق باتری‌های یون لیتیوم مورد استفاده در این تجهیزات تامین می‌شود. سوخت هیدروژن دارای چگالی انرژی حدود ۱۰۰ برابر بیشتر از باتری‌های یون لیتیوم امروزی است. استفاده از سوخت هیدروژن، به عنوان منبع انرژی برای تجهیزات نام‌برده، می‌تواند سبب افزایش بازده و برد عملیاتی آن‌ها شود. برای این کار نیاز به طراحی یک محفظه احتراق با ابعاد کوچک است. با کوچک شدن ابعاد محفظه احتراق، نسبت سطح جانبی به حجم افزایش می‌یابد. این ویژگی ممکن است سبب ایجاد خاموشی رادیکالی<sup>۱</sup>، خاموشی گرمایی<sup>۲</sup> و خاموشی ناشی از کنده شدن شعله<sup>۳</sup> شود. پژوهش‌های تجربی اخیر در زمینه جلوگیری از خاموشی رادیکالی منجر به تولید دیواره‌هایی با خاصیت

1. Radical Quenching  
2. Thermal Quenching  
3. Blow Out

ضد خاموشی شده است [۱]. در این میان، مطالعه احتراق در قطرهای در محدوده قطر خاموشی شعله، به‌منظور جلوگیری از کنده‌شدن شعله و خاموشی گرمایی در محفظه احتراق میکرو، موضوع بسیاری از پژوهش‌های اخیر به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بوده است.

پژوهش‌های آغازین در این زمینه بر هندسه‌های ساده تمرکز داشت. نورتن و لاکوس [۱] به مطالعه حدود شعله‌وری مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا در یک میکروکانال دوبعدی مسطح با در نظر گرفتن انتقال گرما در دیوار پرداختند. ایشان ارتباط سرعت جریان ورودی و ضریب رسانش گرما در دیوار با مکانیزم‌های خاموشی حرارتی و کنده‌شدن شعله را بررسی کردند. نورتن و لاکوس [۲] در ادامه پژوهش مشابهی را برای مخلوط پیش‌آمیخته پروپان-هوا انجام دادند. لی و همکاران [۳] احتراق مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در یک میکرولوله و یک میکروکانال متشکل از صفحه‌های موازی با قطر هیدرولیکی یکسان را به‌صورت عددی مطالعه کردند. در مطالعه ایشان، برای میکرولوله فرض جریان تقارن محوری و برای میکروکانال شرط مرزی تشابه در امتداد محور مرکزی در نظر گرفته شد. نتایج نشان دادند که دمای شعله در میکرولوله حدود ۵۰ کلوین بیشتر از میکروکانال با صفحه‌های موازی است. لی و همکاران [۴] در ادامه پژوهش مشابهی را برای سوخت متان با فرضیه‌ها و هندسه‌های مشابه با مرجع [۳] انجام دادند. میکرولوله‌های مورد بررسی توسط ایشان دارای قطر به‌ترتیب ۱ mm و ۲ mm بودند و فاصله صفحه‌های میکروکانال موازی ۱ mm در نظر گرفته شد. برخلاف نتایج مرجع [۳] مشخص شد که در تمام محدوده سرعت‌های ورودی، محفظه احتراق متشکل از صفحه‌های موازی دمای شعله بیشتری ایجاد می‌کند. به‌علاوه، با کوچک‌تر شدن قطر میکرولوله‌ها دمای شعله کاهش می‌یابد. همچنین، شعله احتراق هیدروژن، به‌علت سرعت سوزش بیشتر نسبت به متان، می‌تواند تا محدوده سرعت بیشتری در میکرولوله قرار گیرد.

مطالعه تاثیر ضخامت و ضریب رسانش گرمایی دیوار محفظه احتراق بر پایداری شعله پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا درون محفظه احتراق میکرو توسط زروندی و همکاران [۵] انجام شد. نتایج ایشان نشان داد که افزایش ضریب رسانش گرمایی دیوار و ضخامت دیوار باعث تسهیل در بازچرخش گرما از طریق دیوار و هموارتر شدن توزیع دما روی سطح خارجی محفظه احتراق می‌شود. نتیجه آن بهبود شرایط احتراق در محفظه احتراق است. همچنین، مشخص شد که علاوه بر ضریب رسانش گرمایی دیوار، عرض کانال و ضریب انتقال گرمایی جابه‌جایی از سطح خارجی دیوار به محیط اطراف در پایداری شعله موثرند. به‌نحوی که افزایش عرض محفظه احتراق و ضریب انتقال گرمایی جابه‌جایی خارجی باعث کاهش و تضعیف پایداری احتراق می‌شود. پیزا و همکاران [۶] دینامیک شعله ناشی از احتراق مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا را در میکروکانال‌های دوبعدی متشکل از صفحه‌های موازی با دیوار گرم‌شونده به‌صورت عددی با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی مستقیم<sup>۱</sup> بررسی کردند. ویژگی کار ایشان نسبت به مراجع [۴-۱] استفاده از شبیه‌سازی عددی با جزئیات بیشتر شامل در نظر گرفتن سینتیک جزئی و محاسبه ضرایب انتقال جرمی بود. انواع شکل‌های مختلف انتشار شعله شامل شعله‌های نوسانی<sup>۲</sup>، شعله‌های ضربانی<sup>۳</sup>، شعله‌های با روشنایی-خاموشی مکرر<sup>۴</sup> شعله‌های متقارن<sup>۵</sup> و شعله‌های نامتقارن<sup>۶</sup> در شبیه‌سازی عددی ایشان ظاهر شد. پیزا و همکاران [۷] پژوهش مشابهی را این بار برای کانال‌های دوبعدی با ابعاد مزو انجام دادند. شش حالت از دینامیک شعله شامل احتراق بدون شعله<sup>۷</sup>، شعله با روشنایی-خاموشی مکرر، شعله‌های پایدار متقارن باز<sup>۸</sup>، شعله‌های پایدار متقارن بسته<sup>۹</sup>، شعله‌های نوسانی و شعله‌های پایدار نامتقارن<sup>۱۰</sup> مشاهده شد. از مقایسه نتایج با نتایج مربوطه مرجع [۶] مشاهده شد که با افزایش عرض کانال،

- 
1. Direct Numerical Simulation (DNS)
  2. Oscillating Flames
  3. Pulsating Flames
  4. Periodic Ignition/Extinction Flames
  5. Symmetric Flames
  6. Asymmetric Flames
  7. Mild Combustion
  8. Open Stable Symmetric Flames
  9. Closed Stable Symmetric Flames
  10. Asymmetric Stable Flames

دینامیک شعله پیچیده تر می‌شود. همچنین، نتیجه شد که پایدار کردن شعله مخلوط رقیق و پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در نسبت هم‌ارزی ۰/۵ در مزوکانال سخت‌تر از میکروکانال است. برای اولین بار پیزا و همکاران [۸] شبیه‌سازی عددی شعله ناشی از احتراق مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در یک میکرولوله با دیوار گرم‌شونده را به صورت سه‌بعدی با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی مستقیم بررسی کردند. هندسه ایشان شامل دو میکرولوله با قطرهای ۱ mm و ۱/۵ mm در نظر گرفته شد. شکل‌های مختلفی از انتشار شعله شامل احتراق بدون شعله، شعله‌های با روشنایی-خاموشی مکرر، شعله‌های متقارن محوری بازوبسته پایا، شعله‌های نامتقارن پایا و شعله‌های چرخشی<sup>۱</sup> مشاهده شد. نتایج برای میکرولوله بزرگ‌تر، دینامیک شعله پیچیده‌تری را شامل شعله نامتقارن پایا و شعله چرخشی نشان دادند. شعله چرخشی تا قبل از این در هیچ یک از مطالعه‌های عددی مشاهده نشده بود.

علی‌پور و همکاران [۹] دینامیک رژیم‌های شعله در احتراق رقیق هیدروژن-هوا را در یک میکروکانال دوبعدی مسطح با دیوارهای گرم‌شونده بررسی کردند. نتایج مشخص کردند که دینامیک رژیم‌های شعله وابسته به سرعت جریان ورودی بوده و با تغییر سرعت جریان ورودی، تعادل بین مقیاس‌های زمانی واکنش و مقیاس زمانی اقامت سیال درون میکروکانال تغییر می‌کند. برقراری یا عدم برقراری تعادل بین مقیاس‌های زمانی نام‌برده منجر به پدیدار شدن سه رژیم انتشار شعله شامل رژیم اشتعال-خاموشی مکرر، پایای متقارن و پایای نامتقارن می‌شود. علی‌پور و مظاهری [۱۰]، در ادامه، به بررسی دقیق‌تر رژیم اشتعال-خاموشی مکرر از طریق مطالعه تاثیر سرعت جریان ورودی بر مشخصه‌های دینامیکی پرداختند. مطالعه ایشان با استخراج پارامترهای دامنه و فرکانس روشن و خاموش شدن شعله انجام شد. نتیجه شد که افزایش سرعت جریان ورودی موجب افزایش دامنه پدیده روشنایی-خاموشی می‌شود، در حالی که فرکانس روشنایی-خاموشی رفتاری کاهش-افزایشی دارد. در ادامه مطالعه روی پدیده روشنایی-خاموشی مکرر در میکروکانال دوبعدی مسطح، علی‌پور و مظاهری [۱۱] به مطالعه دوشاخگی شعله<sup>۲</sup> در رژیم اشتعال-خاموشی مکرر پرداختند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که در رژیم اشتعال-خاموشی مکرر کسر جرمی گونه‌های اکسیژن و آب در ناحیه قرار گرفته بین دو جبهه شعله افزایش می‌یابد. دلیل آن فعال بودن واکنش‌های مربوطه است که منجر به تولید گونه‌های سنگین‌تر شامل  $H_2O$ ،  $H_2O_2$  و  $HO_2$  می‌شود. این گونه‌های سنگین، بیشتر گرمای آزاد شده از احتراق را جذب کرده و باعث کاهش دما و در نهایت ایجاد شکلی از انتشار شعله تحت عنوان دوشاخه شدن شعله می‌شوند. تنگ و همکاران [۱۲] خواص احتراقی سه نوع سوخت هیدروکربنی شامل متان، پروپان و هیدروژن را در میکروکانال‌های متشکل از صفحه‌های موازی به صورت تجربی بررسی کردند. در نسبت‌های هم‌ارزی مختلف مشخص شد که مخلوط هیدروژن-هوا حدود شعله‌وری گسترده‌تری دارد. به علاوه، در یک نسبت هم‌ارزی و سرعت جریان ورودی ثابت، دمای دیوار بیرونی برای سوخت هیدروژن بیشتر از سایر سوخت‌ها گزارش شد. با این حال، متوسط دمای دیوار بیرونی برای سوخت‌های متان و پروپان بیشتر از هیدروژن گزارش شد. همچنین، قطر خاموشی شعله برای هیدروژن، پروپان و متان به ترتیب ۱، ۲ و ۲/۵ mm گزارش شد.

یک روش کارآمد برای ایجاد پایداری بهتر برای شعله و افزایش حدود شعله‌وری استفاده از پله در مسیر جریان واکنشی است. در این راستا یانگ و همکاران [۱۳] به بررسی تجربی افزایش بازده یک سیستم میکروتروموفتوولتاییک<sup>۳</sup> با به کارگیری یک پله در محفظه احتراق پرداختند. نتایج نشان دادند که وجود پله در محفظه احتراق میکرو برای کنترل موقعیت شعله و گسترش شرایط کاری مبتنی بر سرعت جریان و نسبت هم‌ارزی موثر است. لی و همکاران [۱۴] به بررسی تجربی احتراق پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در میکرولوله‌های همراه با پله پرداختند. نتایج نشان دادند که بازده مطلوب سیستم مستقل از ابعاد محفظه و سرعت جریان ورودی در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ ایجاد می‌شود. فرامرپور و همکاران [۱۵] به بررسی عددی تاثیر وجود

1. Spinning Flame  
2. Flame Bifurcation  
3. Micro Thermophotovoltaic

پله بر حد کنده‌شدن شعله و دمای دیوار خارجی محفظه احتراق میکرو پرداختند. این بررسی نشان داد که وجود پله باعث گسترش حد شعله‌وری شده و با کاهش ارتفاع پله، متوسط دمای دیوار افزایش می‌یابد. صابری مقدم و همکاران [۱۶] تاثیر جسم مانع بر دمای خارجی محفظه احتراق میکرو را برای مخلوط پیش‌آمیخته و رقیق هیدروژن-هوا بررسی کردند. مطالعه عددی ایشان شامل بررسی شکل و تعداد جسم مانع در مسیر جریان واکنشی بود. نتیجه شد که بیشینه دمای سطح خارجی محفظه احتراق برای جسم مانع مثلثی اندکی بیشتر از جسم مانع مربعی است، در حالی که بازده تشعشعی محفظه احتراق برای جسم مانع مربعی بیشتر است. همچنین، نتیجه شد که با افزایش تعداد جسم مانع در مسیر جریان، دمای سطح خارجی محفظه احتراق به‌علت ایجاد یک میدان حرارتی نسبتاً یکنواخت افزایش می‌یابد. علی‌پور و سعیدی [۱۷] به مطالعه بهبود مشخصه‌های احتراقی مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در محفظه احتراق شامل میکرولوله U شکل با ساختار ساده (یک میکرولوله U شکل) و ساختار ترکیبی (دو میکرولوله U شکل) پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از ساختار ترکیبی در مقایسه با ساختار ساده باعث می‌شود که در سرعت ورودی یکسان، شعله در فاصله نزدیک‌تر از ورودی محفظه احتراق تشکیل شود. همچنین، با مطالعه تاثیر نسبت انحنای میکرولوله به شعاع آن مشخص شد که در نسبت انحنای کمتر پیش‌گرمایش مخلوط سوخت و هوای ورودی توسط محصولات احتراق بهتر صورت می‌گیرد و باعث می‌شود تا جبهه شعله به ورودی نزدیک‌تر و توزیع دما درون محفظه احتراق بهتر صورت گیرد.

از دیگر هندسه‌های طراحی شده به‌منظور ایجاد پایداری بهتر برای شعله می‌توان به میکرو و مزوکانال‌های واگرا اشاره کرد. در این راستا، اکرم و کومار [۱۸]، از طریق انجام آزمایش‌های متعدد در کانال‌های واگرا با ابعاد مزو، به پژوهش در این موضوع پرداختند. در حالت کلی، نتیجه شد که در یک محدوده مشخص از نسبت هم‌ارزی، حدود پایداری شعله برای مزوکانال‌های واگرا به‌واسطه زاویه واگرایی آن‌ها در سرعت‌های بالا بیشتر است. جهرمی و حسین‌پور [۱۹] به مطالعه عددی پایداری شعله احتراق پروپان-هوا در یک میکرومحفظه احتراق واگرا پرداختند. در پژوهش ایشان، تاثیر زاویه واگرایی کانال بر کنده‌شدن و خاموشی شعله مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که زاویه واگرایی تاثیر بسزایی در افزایش محدوده‌های پایداری شعله دارد. کاندلوال و کومار [۲۰] پایداری شعله حاصل از احتراق مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا را به‌صورت تجربی در یک میکروکانال واگرا بررسی کردند. در این مطالعه، تاثیر نسبت هم‌ارزی و سرعت جریان ورودی بر شکل انتشار شعله، پایداری شعله، موقعیت شعله و انتشار آلاینده‌ها گزارش شد. نتایج ایشان مشخص کرد که قسمت واگرا نقش مهمی در پایداری شعله در چنین محفظه‌های احتراقی با مقیاس کوچک دارد. یانگ و همکاران [۲۱] احتراق مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در یک میکرولوله همگرا-واگرا را به‌صورت عددی و تجربی بررسی کردند. مطالعه عددی ایشان محدود به در نظر گرفتن هندسه دوبعدی و استفاده از فرض جریان تقارن محوری است. از مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با نتایج مربوط به میکرولوله با قطر ورودی یکسان، مشخص شد که شعله حاصل از احتراق در میکرولوله همگرا-واگرا به‌ازای محدوده بیشتری از سرعت جریان ورودی پایدار است. بیسواس و همکاران [۲۲] مشخصه‌های احتراقی مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا را در میکرولوله‌های همگرا-واگرا به‌صورت عددی و تجربی بررسی کردند. مطالعه عددی با در نظر گرفتن معادلات حاکم به‌صورت دوبعدی و فرض تقارن محوری بدون در نظر گرفتن دیوار گرم‌شونده برای میکروکانال انجام شد. نتایج نشان دادند که کشیدگی شعله و اتلاف گرما از دیوار دو عامل اصلی خاموشی شعله‌اند و اثر اتلاف گرما از دیوار بیشتر از کشیدگی شعله است.

رویکرد پژوهش حاضر عدم استفاده از ضخامت برای دیوار محفظه احتراق مشابه رویکرد مراجع [۹-۶] است. در این مراجع، به‌منظور شبیه‌سازی انتقال گرما در دیوار (پیش‌گرم‌کنندگی و اتلاف گرما)، از یک پروفیل دمای معلوم و پایا به‌عنوان شرط مرزی در دیوار استفاده شده است. این پروفیل دما جایگزین حل معادله انرژی در دیوار می‌شود و میکروکانال مربوطه تحت عنوان میکروکانال با دیوارهای گرم‌شونده اطلاق می‌شود. دلیل استفاده از این رویکرد، وجود اختلاف زیاد میان مقیاس‌های زمانی پدیده‌های انتقال در سیال و دیوار جامد است. از مرور پژوهش‌های پیشین مشخص می‌شود که مطالعه مشخصه‌های احتراقی در هندسه شامل میکرولوله‌های همگرا-واگرا با دیوار گرم‌شونده انجام نشده است. مطالعه عددی

انجام شده در مرجع [۲۰] شامل در نظر گرفتن دیوار برای محفظه احتراق و محدود به حل معادلات حاکم به صورت دوبعدی و پایا با استفاده از فرض تقارن محوری است. فرضیه‌های در نظر گرفته شده در مرجع [۲۱] نیز مشابه مرجع [۲۰] بوده با این تفاوت که سوخت مورد استفاده متان است و معادلات حاکم به صورت گذرا در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، مطالعه تاثیر زاویه همگرایی-واگرایی بر مشخصه‌های احتراقی در مراجع نام برده انجام نشده است. در پژوهش حاضر، در نظر است که یک مخلوط پیش آمیخته متشکل از هیدروژن و هوا با نسبت هم‌ارزی و سرعت مشخص به یک میکرولوله همگرا-واگرا با دیوار گرم‌شونده با ابعاد و قطر مشخص وارد شود. هدف مطالعه تاثیر سرعت جریان ورودی و زاویه همگرایی-واگرایی بر مشخصه‌های احتراقی شامل دمای شعله، موقعیت شعله، حد شعله‌وری و ضخامت شعله از طریق حل عددی معادلات حاکم به صورت سه‌بعدی و گذراست. همچنین، در نظر گرفتن سینتیک شیمیایی جزئی می‌تواند گامی فراتر برای دستیابی به نتایج عددی با اعتبار بیشتر در چنین هندسه‌هایی باشد.

### معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی، معادله تکانه، معادله انرژی، معادله بقای گونه‌ها و معادله حالت گاز ایدئال‌اند. معادلات نامبرده به ترتیب در روابط زیر نشان داده شده‌اند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \sigma) \quad (2)$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \sum_{i=1}^N h_i \dot{\omega}_i - \rho \left( \sum_{i=1}^N C_{p,i} Y_i V_i \right) \cdot \nabla T \quad (3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial Y_i}{\partial t} + u \cdot \nabla Y_i \right) = -\nabla \cdot (\rho Y_i V_i) + \dot{\omega}_i \quad (4)$$

$$P = \rho \frac{R}{W} T \quad (5)$$

در معادلات بالا،  $P$  فشار سیال،  $u$  بردار سرعت سیال،  $\rho$  چگالی،  $\lambda$  ضریب رسانش گرمای متوسط سیال،  $\dot{\omega}_i$  نرخ تولید و مصرف گونه‌ها،  $Y_i$  کسر جرمی گونه  $i$ ام و  $V_i$  سرعت نفوذی گونه  $i$ ام است. همچنین،  $\bar{W}$  جرم مولکولی میانگین مخلوط گونه‌ها و  $\mu$  لزجت میانگین است. در معادله (۲) تانسور تنش  $\sigma$  از رابطه (۶) محاسبه می‌شود. در این رابطه،  $I$  ماتریس همانی است.

$$\sigma = \nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3} (\nabla u) I \quad (6)$$

در معادله (۳) جمله‌های سمت چپ بیانگر تغییرات دمای سیال‌اند. سه جمله سمت راست به ترتیب بیانگر انتقال گرمای رسانشی، مقدار گرمای آزاد شده در فرایند احتراق در اثر تبدیل گونه‌ها و انتقال گرما به علت نفوذ گونه‌ها هستند. سرعت نفوذ گونه  $i$  ام از رابطه (۷) به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$V_i = - \left( \frac{D_{im}}{X_i} \right) \nabla X_i \quad (7)$$

در رابطه بالا سرعت نفوذ گونه  $i$ ام از  $V_i$  از نظریه جنبشی گازها با در نظر گرفتن نفوذ متوسط‌گیری شده گونه‌ها در مخلوط محاسبه می‌شود.  $D_{im}$  ضریب نفوذ جرمی گونه  $i$ ام در مخلوط است. همچنین،  $X_i$  کسر مولی گونه  $i$ ام است. ضریب نفوذ جرمی گونه  $i$ ام در مخلوط  $D_{im}$  از رابطه (۸) محاسبه می‌شود. در این رابطه  $D_{ij}$  ضریب نفوذ دوتایی است و با فرض وجود مخلوطی متشکل از فقط دو گاز محاسبه می‌شود، در حالی که  $D_{im}$  نفوذ گونه  $i$  درون مخلوط را با در نظر گرفتن نفوذ سایر گونه‌ها بیان می‌کند. ضریب نفوذ دوتایی  $D_{ij}$  از رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۲۳].

$$D_{im} = \frac{1 - X_i}{\sum_{j \neq i}^N (X_j / D_{ij})} \quad \text{for } i = 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (8)$$

$$D_{ij} = \frac{0.0266T^{3/2}}{PW_{ij}^{1/2}\sigma_{ij}^2\Omega_D}$$

$$W_{ij} = 2 \left[ \left( \frac{1}{W_i} \right) + \left( \frac{1}{W_j} \right) \right]^{-1} ; \quad \sigma_{ij} = \frac{\sigma_i + \sigma_j}{2}$$

$$\Omega_D = \frac{A}{(T^*)^B} + \frac{C}{\exp(DT^*)} + \frac{E}{\exp(FT^*)} + \frac{G}{\exp(HT^*)}$$

$$A = 1.06036 ; \quad B = 0.15610 ; \quad C = 0.19300 ; \quad D = 0.47635 ;$$

$$E = 1.03587$$

$$F = 1.52996 ; \quad G = 1.76474 ; \quad H = 3.89411$$

$$T^* = k_B T / \varepsilon_{ij} = k_B T / (\varepsilon_i \varepsilon_j)^{1/2} \quad (9)$$

در رابطه‌های بالا،  $T$  دمای مطلق گاز،  $W_{ij}$  جرم مولکولی میانگین برای دو گونه  $i$  و  $j$ ،  $\sigma$  قطر برخورد،  $\Omega_D$  انتگرال برخورد و  $k_B$  ثابت بولتزمن است. نرخ تولید و مصرف گونه‌ها از معادلات سینتیک شیمیایی با در نظر گرفتن واکنش‌های مقدماتی محاسبه می‌شود. در این پژوهش، از سینتیک چندمرحله‌ای احتراق هیدروژن و هوا شامل ۹ گونه و ۲۱ واکنش مقدماتی [۲۴] استفاده شده است.

### هندسه مسئله

هندسه مسئله شامل یک میکرولوله همگرا-واگرا با مقطع دایره‌ای و زاویه همگرایی-واگرایی  $3.45^\circ$ ، قطر ورودی ۱ mm و طول ۳ cm به صورت سه‌بعدی است. در شکل ۱، طرحواره سه‌بعدی هندسه مسئله به همراه ابعاد هندسی آن در نمای برش خورده نشان داده شده است. هندسه مورد بررسی را می‌توان به سه قسمت شامل قسمت ورودی، قسمت همگرا-واگرا و قسمت خروجی تقسیم کرد.

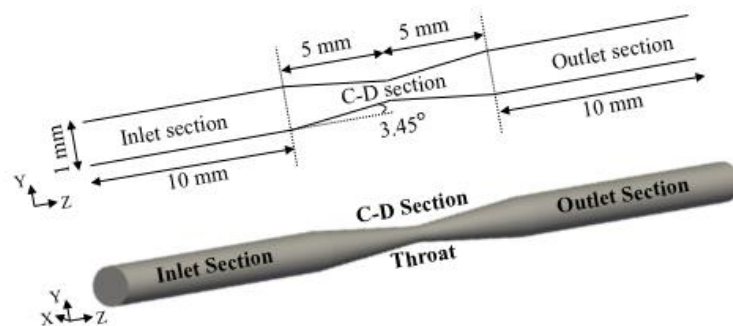


Figure 1- 3D Geometry and schematic of cutted view of the microtube with converging-diverging angle of  $3.45^\circ$   
 شکل ۱- هندسه سه‌بعدی و طرحواره برش خورده میکرولوله با زاویه همگرایی-واگرایی  $3.45^\circ$

### روش حل معادلات و صحت‌سنجی حلگر

برای حل معادلات از حلگر جریان واکنشی کد متن‌باز OpenFOAM نسخه ۶ با نام reactingFoam استفاده شده است. معادلات حاکم به روش حجم محدود گسسته‌سازی و توسط الگوریتم PISO<sup>۱</sup> به صورت گذرا حل شدند. با توجه به اینکه در قسمت ورودی سیال با سرعت یکنواخت وارد میکرولوله می‌شود، در مرز ورودی برای سرعت جریان از شرط مرزی دیریکله<sup>۲</sup> استفاده شده است. نسبت طول به قطر مقطع به گونه‌ای در نظر گرفته شده که جریان سیال در خروجی کاملاً توسعه یافته شود.

1. Pressure Implicit with Splitting of Operators  
 2. Dirichlet

بنابراین، در مرز خروجی برای سرعت از شرط مرزی نیومن<sup>۱</sup> استفاده شده است. روی دیوار برای سرعت شرط مرزی عدم لغزش و برای سرعت اولیه سیال درون میکرولوله مقدار صفر در نظر گرفته شده است. برای فشار در ورودی، شرط مرزی نیومن استفاده شده است. دلیل آن یکنواخت بودن پروفیل سرعت در ورودی است. از آنجایی که گازهای حاصل از احتراق از طریق مرز خروجی به محیط اطراف تخلیه می‌شوند، در مرز خروجی برای فشار شرط مرزی دیریکله برابر با فشار اتمسفر در سطح دریا در نظر گرفته شده است. همچنین، روی دیوار برای فشار از شرط مرزی نیومن استفاده شده است. در لحظه اولیه مقدار فشار برابر فشار اتمسفر در سطح دریا فرض می‌شود. دما در مرز ورودی برابر ۳۰۰ کلوین فرض شده است. در خروجی برای دما از شرط مرزی نیومن استفاده شده است. از آنجایی که میکرولوله مورد بررسی از نوع میکرولوله‌های گرم‌شونده است، روی دیوار از یک پروفیل دمایی معلوم استفاده شده است. این پروفیل دما در مراجع [۹-۶] استفاده شده و به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود. در این رابطه،  $L$  طول میکرولوله است. دما در لحظه اولیه برابر ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. برای کسرهای جرمی گونه‌های اصلی شامل هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن در مرز ورودی از شرط مرزی دیریکله برابر با یک مقدار مشخص متناسب با نسبت هم‌ارزی و برای سایر گونه‌های میانی احتراق از شرط مرزی دیریکله برابر با مقدار صفر استفاده شده است. در مرز خروجی و دیوار، به دلیل نامعلوم بودن مقادیر کسرهای جرمی تمام گونه‌ها، از شرط مرزی نیومن استفاده شده است. پروفیل دمایی تعریف شده روی دیوار در شکل ۲-الف و شرایط مرزی تعریف شده برای حل عددی در شکل ۲-ب نشان داده شده است.

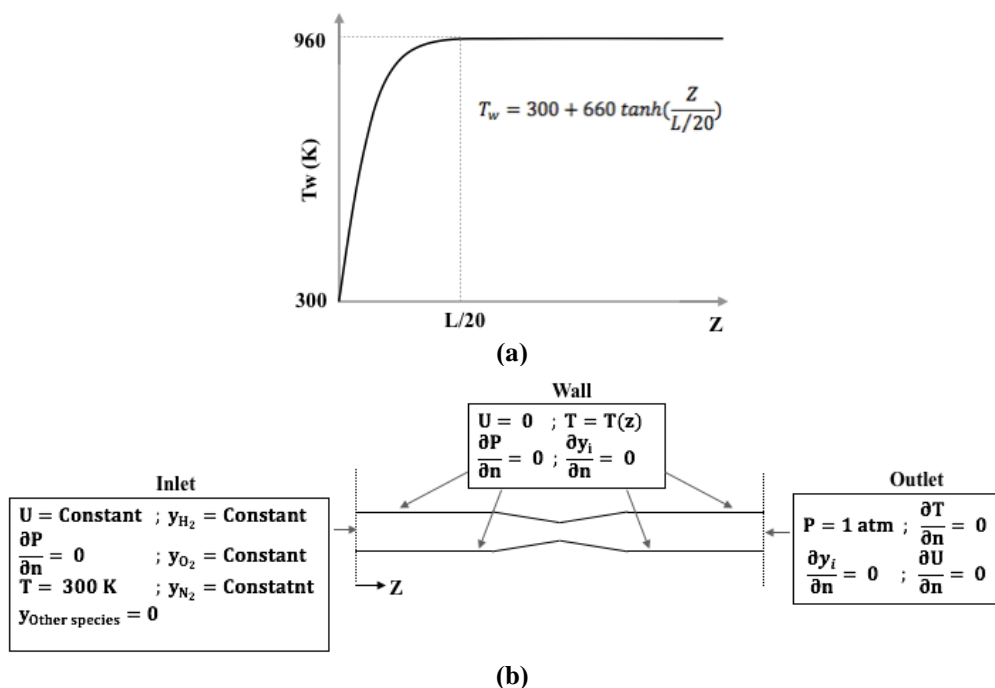


Figure 2- Temperature profile defined as temperature boundary condition of the wall (a) and boundary conditions related to inlet velocity of 4 m/s and equivalence ratio of 1 (b)

شکل ۲- پروفیل دمایی تعریف شده به عنوان شرط مرزی دمای دیوار (الف)، شرایط مرزی تعریف شده برای حل عددی (ب)

قبل از حل معادلات حاکم برای مسئله اصلی، نیاز است حلگر مورد نظر صحت‌سنجی شود. بدین منظور، از هندسه مربوطه آزمایش مرجع [۲۵] استفاده شده است. در این آزمایش، احتراق مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا با سینتیک چندمرحله‌ای متشکل از ۲۴ گونه و ۱۰۴ واکنش [۲۶] با نسبت هم‌ارزی ۱ در یک مشعل مطابق شکل ۳ انجام شده است. مطابق این شکل، مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا در دمای ۳۰۱/۸ کلوین با یک پروفیل سرعت کاملاً توسعه یافته وارد محفظه احتراق

1. Neumann

می‌شود. دیوارهای محفظه احتراق توسط لوله‌های آب در دمای ۳۳۳ کلوین ثابت نگه داشته می‌شوند. شرایط اولیه و مرزی برای فشار مشابه موارد بیان شده برای هندسه اصلی است. نتایج مربوط به حل این مسئله به صورت عددی توسط حلگر مورد نظر انطباق قابل قبولی با نتایج حاصل از آزمایش برقرار کردند. در شکل ۴، نمودار مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از حل عددی توسط حلگر مورد نظر به همراه کانتورهای دما نشان داده شده است. در این نمودار، نتایج حاصل از حل عددی روی خطی به فاصله ۳ mm از ورودی و از صفحه تقارن تا دیوار سمت راست وسیله آزمایش (خط AB) نشان داده است. با توجه به شکل ۳ و شکل متقارن شعله، برای صحت‌سنجی و شبیه‌سازی عددی هندسه مربوطه، از شرط مرزی تشابه در امتداد محور عمودی استفاده شده است. اندازه سلول‌های شبکه ۱۰۰۰۰۰ به گونه‌ای تعیین شد که اندازه المان آن‌ها در راستای محور افقی برابر ۲۵ میکرومتر و در راستای محور عمودی ۵۰ میکرومتر شوند. مطابق شکل ۴، افزایش تعداد سلول‌های شبکه به مقدار بیش از ۵۰۰۰۰ تاثیر قابل ملاحظه‌ای در دقت جواب به دست آمده نداشته است. کانتورهای تغییرات دما در کنار نمودارهای تغییرات دما برای شبکه با تعداد سلول‌های ۱۰۰۰۰۰ نشان داده شده است. این کانتورها با قرینه کردن نتایج حاصل از حل نصف هندسه مورد نظر ایجاد شده‌اند.

$$T_w = 300 + 660 \tanh\left(\frac{z}{L/20}\right) \quad (10)$$

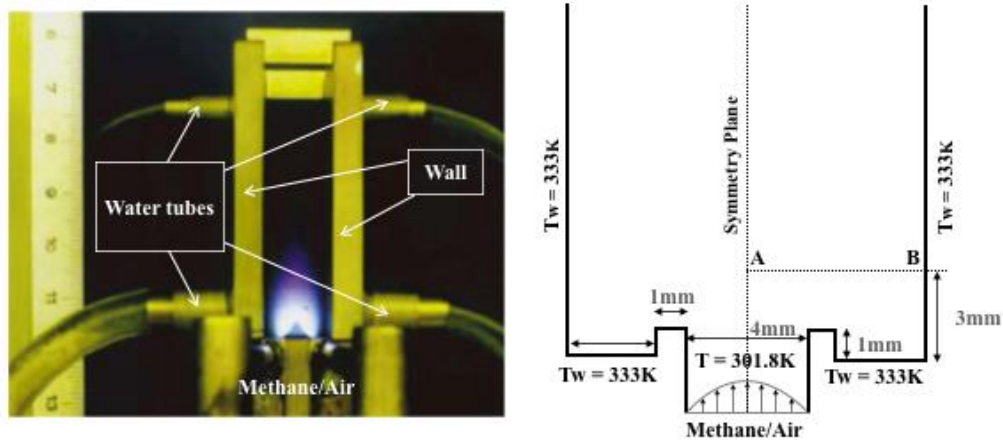


Figure 3- Experiment setup and its geometry for solver validation [25]

شکل ۳- وسیله آزمایش و هندسه آن برای صحت‌سنجی حلگر [۲۵]

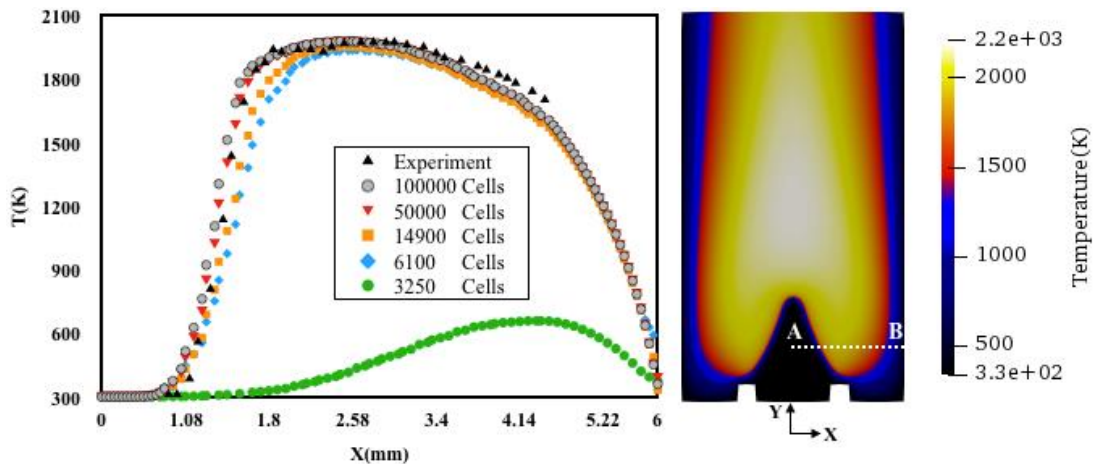


Figure 4- Comparison chart of experimental results with numerical results and contours of temperature variations

شکل ۴- نمودار مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از حل عددی و کانتورهای تغییرات دما



## بررسی دقت شبکه محاسباتی

برای بررسی دقت شبکه محاسباتی، پنج شبکه با تعداد سلول‌ها و ابعاد متفاوت توسط نرم‌افزار Gambit تولید شد. در شرایط مرزی و اولیه یکسان، شبکه‌های تولیدشده با سرعت جریان ورودی  $1/5 \text{ m/s}$  و نسبت هم‌ارزی ۱ برای بررسی دقت شبکه محاسباتی مورد حل واقع شدند. در شکل ۵، نمودار تغییرات دما در راستای محور مرکزی میکرولوله نشان داده شده است. در این شکل، به‌منظور نمایش بهتر تغییرات دما برحسب تعداد سلول‌ها، تغییرات دما در راستای طول  $1 \text{ cm}$  از ابتدای میکروکانال (قسمت ورودی جریان) رسم شده است. تغییرات دما برای قسمت‌های همگرا-واگرا و خروجی، برای تمام شبکه‌ها، برهم منطبق است. مطابق این نمودار، شبکه با تعداد سلول‌های  $451200$  دقت قابل قبولی دارد.

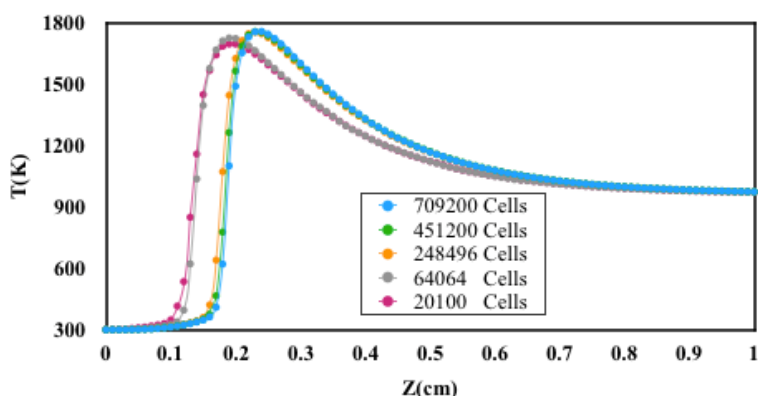


Figure 5- Diagram of temperature variation in the central axis of the microtube with cells number

شکل ۵- نمودار تغییرات دما در راستای محور مرکزی میکرولوله با تعداد سلول‌های شبکه

## ارائه نتیجه‌ها و تفسیر داده‌ها

برای انجام محاسبات از پردازش موازی استفاده شده است. بدین‌منظور، از مرکز پردازش‌های سریع دانشگاه شهید چمران اهواز تعداد ۲۴ هسته محاسباتی از نوع Opteron 6282 هر یک با توان پردازشی  $2/6$  گیگاهرتز و در مجموع ۴ گیگابایت حافظه Ram برای انجام محاسبات مورد استفاده قرار گرفت. کانتورهای دما برای سرعت‌های ۴، ۶، ۸، ۱۰ و  $14 \text{ m/s}$  در نسبت هم‌ارزی ۱ برای میکرولوله با زاویه همگرای-واگرایی  $3/45^\circ$  در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش سرعت جریان ورودی، موقعیت ناحیه احتراق در میکرولوله به سمت پایین‌دست جریان منتقل می‌شود. کاهش مدت‌زمان اقامت سیال در مقایسه با مدت‌زمان انجام واکنش احتراق و نفوذ عرضی گرما از دیوار به ناحیه مرکزی جریان را می‌توان به‌عنوان علت این رفتار معرفی کرد. در واقع، کاهش مدت‌زمان اقامت سیال باعث می‌شود تا مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا مسیر طولانی‌تری تا رسیدن به دمای اشتعال طی کند. به‌علاوه، گرمای جذب‌شده از دیوار توسط سیال سمت دیوار به مسیر طولانی‌تری برای نفوذ به محور مرکزی و گرم کردن سیال در این ناحیه نیاز دارد. در شکل ۷، نمودار تغییرات دما در راستای محور مرکزی برای سرعت‌های ۴، ۶، ۸، ۱۰ و  $14 \text{ m/s}$  در نسبت هم‌ارزی ۱ برای میکرولوله با زاویه همگرای-واگرایی  $3/45^\circ$  نشان داده شده است. مطابق شکل ۷، با افزایش سرعت جریان ورودی از  $4 \text{ m/s}$  به  $6 \text{ m/s}$ ، بیشینه دمای ناحیه احتراق در راستای محور میکرولوله از مقدار  $1756$  کلوین به مقدار  $1827$  کلوین افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش طول پیش‌گرمایش است. سیال با دمای  $300$  کلوین وارد میکرولوله می‌شود. به‌علت بالابودن دمای دیوار از سیال، دمای سیال پس از طی مسافتی تحت تاثیر دمای دیوار، افزایش پیدا می‌کند تا به دمای احتراق برسد. فاصله‌ای که سیال از ابتدای افزایش دما تا رسیدن به دمای اشتعال طی می‌کند، به‌عنوان طول پیش‌گرمایش تعریف می‌شود. این فاصله توسط تعدادی پیکان در شکل ۷ به‌صورت

تقریبی برای تمام سرعت‌ها مشخص شده است. ابتدای پیکان‌ها در نقطه‌ای قرار دارد که شروع افزایش دمای سیال تحت تاثیر دمای دیوار است. نقطه انتهای پیکان‌ها برای هر نمودار در نقطه‌ای انتخاب شده که رشد سریع دما تا رسیدن به دمای احتراق از آنجا شروع می‌شود. مطابق شکل، افزایش طول پیش‌گرمایش در اثر افزایش سرعت جریان ورودی موجب کاهش گرادیان دما در این ناحیه شده و به تبع آن کاهش نفوذ گرما از ناحیه احتراق به ناحیه پیش‌گرمایش موجب کاهش اتلاف گرما از ناحیه احتراق و افزایش دمای شعله در قسمت ورودی می‌شود.

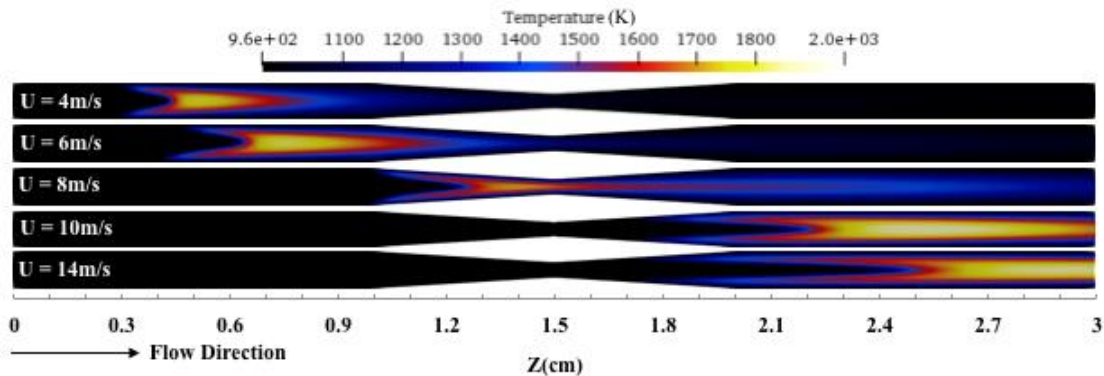


Figure 6- Contours of temperature variation and flame position with inlet velocity for the microtube with converging-diverging angle of  $3.45^\circ$

شکل ۶- کانتورهای تغییر دما و موقعیت شعله با سرعت جریان ورودی در میکرولوله با زاویه همگرایی-واگرایی  $3.45^\circ$

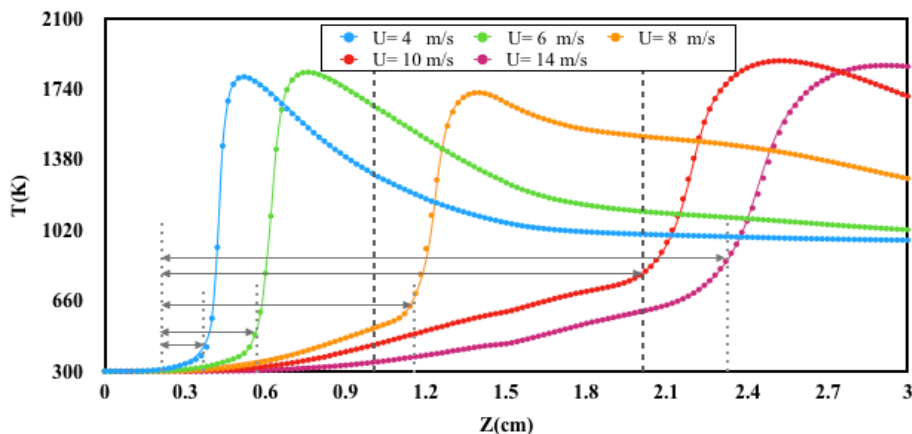


Figure 7- Temperature variations along central axis for different inlet velocities for the microtube with converging-diverging angle of  $3.45^\circ$

شکل ۷- تغییرات دما در راستای محور مرکزی برای سرعت‌های ورودی مختلف برای میکرولوله با زاویه همگرایی-واگرایی  $3.45^\circ$

با افزایش سرعت جریان ورودی به مقدار  $8 \text{ m/s}$  ناحیه احتراق در قسمت همگرا-واگرا قرار می‌گیرد و دمای آن با وجود سرعت بیشتر نسبت به سایر قسمت‌ها به مقدار  $1723$  کلوین کاهش می‌یابد. در این مورد اگرچه طول ناحیه پیش‌گرمایش افزایش یافته و به تبع آن نفوذ گرما از ناحیه احتراق کاهش یافته، ولی سرعت زیاد جریان در گلوگاه موجب جابه‌جایی گرما از ناحیه احتراق به پایین دست جریان با آهنگ بیشتری می‌شود. در شکل ۸، کانتورهای سرعت جریان در میکرولوله با زاویه همگرایی-واگرایی  $3.45^\circ$  برای سرعت‌های ورودی  $6$ ،  $8$  و  $10 \text{ m/s}$  برای مخلوط استوکیومتری نشان داده شده است. مطابق این شکل، در تمام کانتورها سرعت جریان در قسمت همگرا-واگرا به علت وجود ناحیه گلوگاه افزایش می‌یابد و سپس با ورود جریان به قسمت خروجی کاهش می‌یابد. علت افزایش زیاد سرعت جریان در ناحیه گلوگاه، برای سرعت ورودی  $8 \text{ m/s}$

قرارگرفتن ناحیه احتراق در قسمت همگرا-واگرا مطابق شکل ۶ است که موجب افزایش شدید سرعت در ناحیه گلوگاه در شکل ۸ می‌شود. از آنجایی که ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی اجباری درون میکرولوله با افزایش سرعت جریان افزایش می‌یابد، بنابراین، گرمای آزادشده در ناحیه احتراق در قسمت گلوگاه، به دلیل همین افزایش شدید سرعت، با آهنگ بیشتری به پایین دست جریان منتقل می‌شود. این مورد سبب می‌شود تا شعله با وجود سرعت بیشتر در ناحیه همگرا-واگرا دمای کمتری نسبت به سایر قسمت‌ها داشته باشد. مطابق شکل ۶ در سرعت ورودی  $10 \text{ m/s}$ ، شعله وارد بخش خروجی میکرولوله می‌شود. در بخش خروجی، دمای شعله در راستای محور مرکزی بیشتر از سایر قسمت‌هاست. بیشینه مقدار آن برابر  $1885$  کلوین است. دلیل آن دورشدن از گلوگاه و افزایش طول پیش‌گرمایش مخلوط سوخت و هواست. با دورشدن از گلوگاه به سمت خروجی میکرولوله، اثرات گلوگاه کاهش می‌یابد. این مورد سبب می‌شود تا آهنگ جابه‌جایی گرما از ناحیه احتراق به پایین دست جریان کاهش یابد.

افزایش بیشتر سرعت جریان ورودی از  $10 \text{ m/s}$  به  $14 \text{ m/s}$  موجب شتاب گرفتن بیشتر سیال در گلوگاه می‌شود. نتیجه آن بیرون زدن قسمتی از شعله (ناحیه احتراق) از میکرولوله و کاهش بیشینه دمای آن به مقدار  $1861$  کلوین است. در نهایت، افزایش بیشتر سرعت جریان ورودی به میکروکانال منجر به خارج شدن از حد شعله‌وری بالا یا کندن شعله می‌شود.

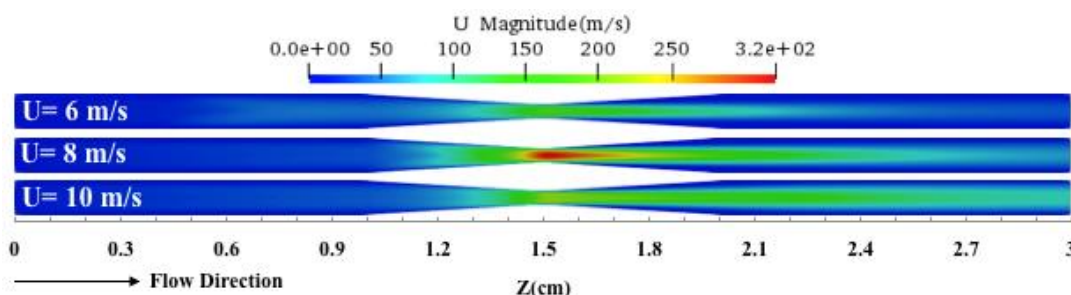


Figure 8- Velocity contours for inlet velocity of 6, 8, 10 m/s and equivalence ratio of 1 in the microtube with converging - diverging angle of  $3.45^\circ$

شکل ۸- کانتورهای سرعت برای سرعت‌های ورودی ۶، ۸ و  $10 \text{ m/s}$  و نسبت هم‌ارزی ۱ در میکرولوله با زاویه همگرایی-واگرایی  $3/45^\circ$

یکی دیگر از پارامترهای های مورد بررسی ضخامت شعله است که می‌تواند معیار مناسبی برای سنجش میزان کشیدگی شعله باشد. براساس مراجع مختلف، تعریف‌های متفاوتی در ارتباط با روش محاسبه ضخامت شعله ارائه شده است. یکی از این تعریف‌ها استفاده از روش ارائه‌شده در مرجع [۲۲] است که در کار حاضر نیز از آن استفاده شده است و براساس روابط زیر محاسبه می‌شود. در این روابط  $T_{min}$  و  $T_{max}$  به ترتیب بیشترین و کمترین دمای محفظه احتراق اند. مقدار  $\max\left(\left|\frac{\partial T}{\partial Z}\right|\right)$  برابر با بیشترین گرادیان دمای ایجادشده در ناحیه احتراق است.

$$\delta_F = \frac{T_{max} - T_{min}}{\max\left(\left|\frac{\partial T}{\partial Z}\right|\right)} \quad (11)$$

$$\max\left(\left|\frac{\partial T}{\partial Z}\right|\right) = \frac{T_{max} - T_{min}}{\Delta Z} \quad (12)$$

شعله‌های مورد بررسی در این پژوهش ساختار سه‌بعدی دارند و ضخامت شعله، در ناحیه‌های مختلف، متفاوت است. بنابراین، به‌عنوان یک معیار یکسان برای سنجش تمام حالت‌ها، ضخامت شعله در امتداد محور مرکزی میکرولوله محاسبه می‌شود. در شکل ۹، تاثیر افزایش سرعت جریان ورودی بر ضخامت شعله در نسبت هم‌ارزی ۱ برای میکرولوله با زاویه همگرایی-واگرایی  $3/45^\circ$  نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش سرعت جریان ورودی، ضخامت شعله افزایش می‌یابد. دلیل آن افزایش طول ناحیه احتراق به علت کاهش مدت‌زمان اقامت سیال نسبت به مدت‌زمان واکنش شیمیایی است.

درواقع، پس از آغازش واکنش‌های اولیه احتراق، واکنش‌های مقدماتی به مسیر طولانی‌تری برای کامل‌شدن و تشکیل گونه‌های پایدار در محصولات احتراق نیاز دارند. با توجه به شکل ۹، تغییر ضخامت شعله در اثر افزایش سرعت جریان ورودی از  $8 \text{ m/s}$  به  $10 \text{ m/s}$  شدیدتر می‌شود. علت آن شتاب گرفتن سیال در ناحیه گلوگاه است. در ناحیه احتراق، واکنش‌های مقدماتی منجر به تولید و مصرف گونه‌های میانی از جمله رادیکال آزاد  $\text{OH}$  می‌شوند. بنابراین، رسم کانتورهای رادیکال آزاد  $\text{OH}$  می‌تواند درباره میزان کشیدگی شعله در سایر ناحیه‌های جریان اطلاعات بیشتری دهد. در شکل ۱۰، کانتورهای کسر جرمی رادیکال آزاد  $\text{OH}$  برای سرعت‌های ۴، ۶، ۸، ۱۰ و  $14 \text{ m/s}$  در نسبت هم‌ارزی ۱ برای میکرولوله با زاویه  $3.45^\circ$  رسم شده است. افزایش کشیدگی ناحیه احتراق با افزایش سرعت جریان ورودی کاملاً مشهود است. همچنین، در سرعت  $14 \text{ m/s}$  بالابودن کسر جرمی رادیکال آزاد  $\text{OH}$  در خروجی منجر به این می‌شود که واکنش‌های مقدماتی، که برای کامل‌شدن به مصرف گونه  $\text{OH}$  نیاز دارند، به خارج از میکرولوله منتقل شوند. این مورد ممکن است باعث ایجاد احتراق ناقص سوخت شود. با توجه به شکل ۱۰، مقدار تولید رادیکال آزاد  $\text{OH}$  با افزایش سرعت ورودی، افزایش می‌یابد. دلیل آن افزایش دبی جرمی هیدروژن و اکسیژن ورودی به میکرولوله در سرعت‌های ورودی زیاد است.

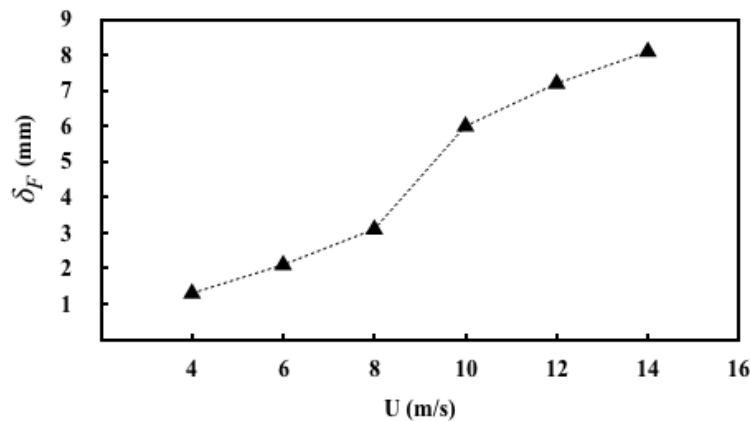


Figure 9- Diagram of the flame thickness variation with inlet velocity for the microtube with converging-diverging angle of  $3.45^\circ$   
 شکل ۹- نمودار تغییر ضخامت شعله با سرعت جریان ورودی برای میکرولوله با زاویه همگرایی-واگرایی  $3.45^\circ$

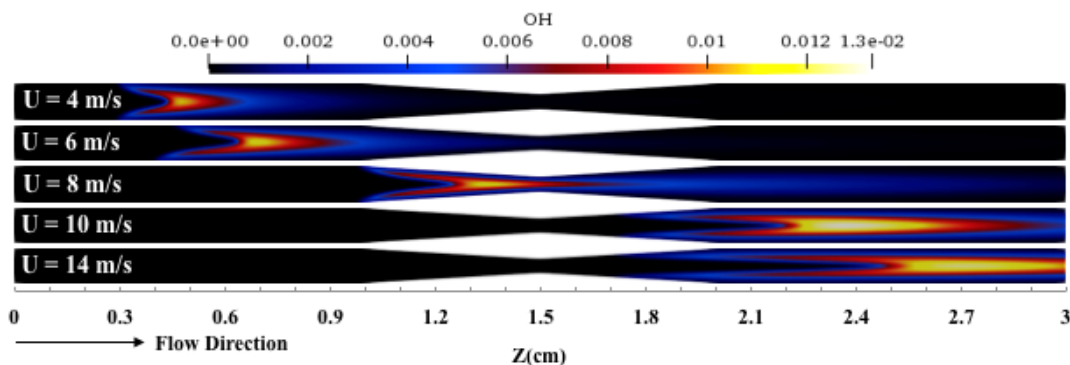


Figure 10- Contours of  $\text{OH}$  mass fraction variations with inlet velocity for the microtube with converging - diverging angle of  $3.45^\circ$   
 شکل ۱۰- کانتورهای تغییرات کسر جرمی رادیکال آزاد  $\text{OH}$  با سرعت جریان ورودی برای میکرولوله با زاویه  $3.45^\circ$

یکی از مشخصه‌های هندسی میکرولوله‌های همگرا-واگرا زاویه همگرایی-واگرایی آن‌هاست. به منظور مطالعه تاثیر زاویه همگرایی-واگرایی و مقایسه با میکرولوله‌های بدون ناحیه گلوگاه، سه نمونه هندسه دیگر شامل دو میکرولوله با زاویه همگرایی-واگرایی  $1/45^\circ$  و  $2/45^\circ$  و همچنین یک میکرولوله بدون گلوگاه با ابعاد و اندازه سلول‌های یکسان تولید شده است. حل

معادلات حاکم برای همه هندسه‌های مورد نظر در نسبت هم‌ارزی ۱ و سرعت‌های ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ m/s انجام شد. مشخص شد که در سرعت جریان ورودی ۸ m/s شعله در قسمت میانی میکرولوله قرار می‌گیرد و با افزایش سرعت جریان ورودی به مقدار ۱۰ m/s شعله به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کند و در نهایت از میکرولوله خارج می‌شود. این در حالی است که ایجاد شعله پایدار در میکرولوله‌های همگرا-واگرا با زاویه همگرایی-واگرایی  $3/45^\circ$  و  $2/45^\circ$  در سرعت جریان ورودی ۱۴ m/s و نسبت هم‌ارزی ۱ امکان‌پذیر است. برای میکرولوله با زاویه همگرایی-واگرایی  $1/45^\circ$  در سرعت جریان ورودی ۱۴ m/s و نسبت هم‌ارزی ۱ شعله تشکیل نمی‌شود. بنابراین، مزیت ایجاد گلوگاه در میکرولوله‌ها در امکان استفاده از آن‌ها در سرعت جریان‌های ورودی بالاست و با افزایش زاویه همگرایی-واگرایی حد شعله‌وری بالا افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱، نمودار تغییرات دمای سیال در راستای محور مرکزی برای میکرولوله‌های با زاویه همگرایی-واگرایی  $1/45^\circ$ ،  $2/45^\circ$  و  $3/45^\circ$  در سرعت جریان‌های ورودی ۱۰ m/s و ۱۲ m/s و نسبت هم‌ارزی ۱ رسم شده است. مطابق این شکل، ناحیه احتراق در میکرولوله با زاویه  $3/45^\circ$  برای تمام سرعت‌ها در موقعیت نزدیک‌تری به مرز خروجی است. دلیل آن افزایش زاویه همگرایی-واگرایی است که به نظر می‌رسد در سرعت‌های ۱۰ m/s و ۱۲ m/s تاثیر شدیدتری روی موقعیت قرارگیری شعله دارد. در سرعت ۱۰ m/s دما و موقعیت ناحیه احتراق برای میکرولوله‌های با زاویه  $1/45^\circ$  و  $2/45^\circ$  تقریباً برابر است. در میکرولوله با زاویه  $1/45^\circ$  حد شعله‌وری بالا کمتر از میکرولوله با زاویه  $2/45^\circ$  است و این سبب می‌شود تا ناحیه احتراق به پایین دست جریان منتقل شود. از طرفی، در میکرولوله‌های با زاویه  $2/45^\circ$  کمتر بودن قطر گلوگاه سبب می‌شود تا ناحیه احتراق به پایین دست جریان منتقل شود به نحوی که اثر پایین تر بودن حد شعله‌وری بالا در میکرولوله با زاویه  $1/45^\circ$  را خنثی کند. در نتیجه، برای سرعت ورودی ۱۰ m/s تغییر زاویه همگرایی-واگرایی از  $1/45^\circ$  به  $2/45^\circ$  تاثیر چندانی بر موقعیت و دمای ناحیه احتراق در راستای محور مرکزی ندارد. با افزایش سرعت جریان ورودی به ۱۲ m/s اختلاف میان موقعیت ناحیه احتراق در میکرولوله‌های با زاویه  $1/45^\circ$  و  $2/45^\circ$  بیشتر می‌شود، به طوری که حد شعله‌وری پایین تر میکرولوله با زاویه  $1/45^\circ$  موجب قرار گرفتن ناحیه احتراق در موقعیت نزدیک‌تر به مرز خروجی می‌شود. با استدلالی مشابه می‌توان علت نزدیک تر بودن ناحیه احتراق به مرز خروجی را برای میکرولوله با زاویه  $3/45^\circ$  نسبت به میکرولوله‌های با زاویه  $1/45^\circ$  و  $2/45^\circ$  توجیه کرد.

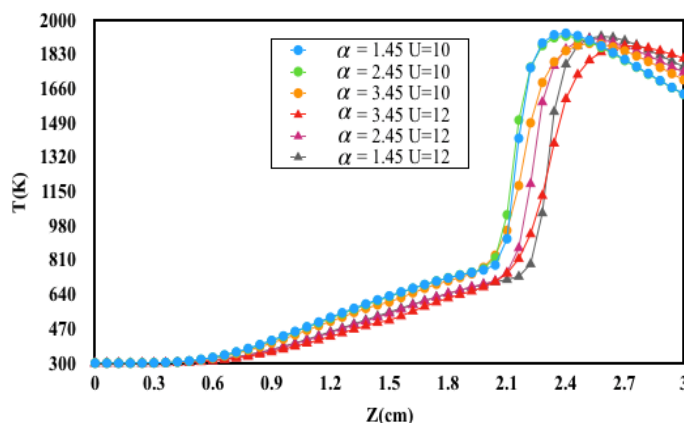


Figure 11- Diagram of the Temperature variations in the central axis with the converging - diverging angle

شکل ۱۱- نمودار تغییرات دما در راستای محور مرکزی با زاویه همگرایی-واگرایی

در شکل ۱۲، نمودار تغییرات بیشینه دمای شعله با زاویه همگرایی-واگرایی برای سرعت‌های ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ m/s و نسبت هم‌ارزی ۱ رسم شده است. مطابق این شکل، در یک سرعت و نسبت هم‌ارزی ثابت، بیشینه دمای ناحیه احتراق برای میکرولوله‌های همگرا-واگرا با زاویه  $2/45^\circ$  و  $1/45^\circ$  بیشتر میکرولوله است. به عبارت دیگر، بیشینه دمای احتراق در سرعت ۸ m/s برای میکرولوله‌های با زاویه  $0^\circ$ ،  $1/45^\circ$  و  $2/45^\circ$  به ترتیب برابر ۱۹۰۰، ۱۹۵۶ و ۱۹۴۵ کلین است. همچنین، در یک

سرعت و نسبت هم‌ارزی ثابت برای میکرولوله‌های همگرا-واگرا، کاهش زاویه همگرایی-واگرایی از  $3/45^\circ$  به  $1/45^\circ$  باعث افزایش بیشینه دمای شعله می‌شود. دلیل آن افزایش سرعت جریان در اثر کاهش قطر گلوگاه و به‌دنبال آن افزایش آهنگ انتقال گرمای جابه‌جایی از ناحیه احتراق به ناحیه بعد از احتراق است. کانتورهای تغییرات سرعت جریان با زاویه همگرایی-واگرایی در شکل ۱۳ برای مخلوط استوکیومتری در سرعت ورودی  $12 \text{ m/s}$  نشان داده شده است. مطابق شکل، با افزایش زاویه همگرایی-واگرایی در سرعت ورودی و نسبت هم‌ارزی ثابت، جریان در گلوگاه شتاب می‌گیرد. شتاب‌گرفتن جریان موجب افزایش سرعت و آهنگ انتقال گرمای جابه‌جایی از ناحیه احتراق به ناحیه بعد از احتراق می‌شود.

مطابق شکل ۱۲، در سرعت جریان ورودی  $8 \text{ m/s}$  کمترین دما مربوط به میکرولوله با زاویه  $3/45^\circ$  است. دلیل آن قرارگرفتن شعله در ناحیه گلوگاه است. در میکرولوله‌های با زاویه همگرایی-واگرایی  $1/45^\circ$  و  $2/45^\circ$  به‌دلیل انتقال شعله به پایین‌دست جریان، بیشینه دمای شعله در سرعت جریان ورودی  $8 \text{ m/s}$  به‌ترتیب حدود  $230$  و  $218$  درجه بیشتر از میکرولوله با زاویه  $3/45^\circ$  است. در سرعت جریان ورودی  $14 \text{ m/s}$  بیشینه دمای شعله برای میکرولوله‌های همگرا-واگرا با کاهش زاویه از  $3/45^\circ$  به  $2/45^\circ$  به‌ترتیب از مقدار  $1866$  به  $1927$  کلین افزایش می‌یابد. دلیل آن افزایش قطر قسمت گلوگاه و کاهش آهنگ جابه‌جایی گرما از ناحیه احتراق است. نمودار تغییرات ضخامت شعله با زاویه همگرایی-واگرایی در راستای محور مرکزی برای نسبت هم‌ارزی ۱ در سرعت جریان ورودی  $8$ ،  $10$ ،  $12$  و  $14 \text{ m/s}$  در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص می‌شود که ضخامت شعله در میکرولوله‌های همگرا-واگرا در حالت کلی بیشتر از میکرولوله بدون گلوگاه است. دلیل آن وجود قسمت گلوگاه و شتاب‌گرفتن سیال در این قسمت است. برای میکرولوله‌های همگرا-واگرا در یک سرعت جریان ورودی ثابت، ضخامت شعله با افزایش زاویه همگرایی-واگرایی، افزایش می‌یابد. بیشترین ضخامت شعله مربوط به میکرولوله  $3/45^\circ$  در سرعت جریان ورودی  $14 \text{ m/s}$  و کمترین ضخامت شعله مربوط به میکرولوله بدون گلوگاه در سرعت  $8 \text{ m/s}$  است.

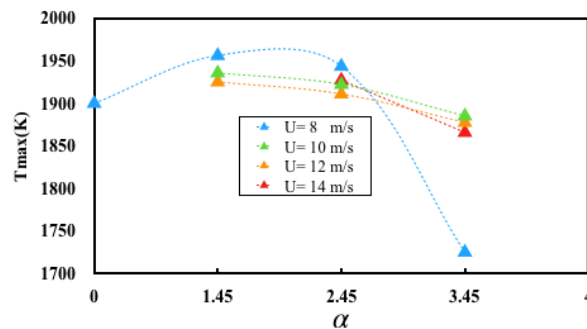


Figure 12- Diagram of the maximum flame temperature variations with the converging-diverging angle

شکل ۱۲- نمودار تغییرات بیشینه دمای شعله با زاویه همگرایی-واگرایی

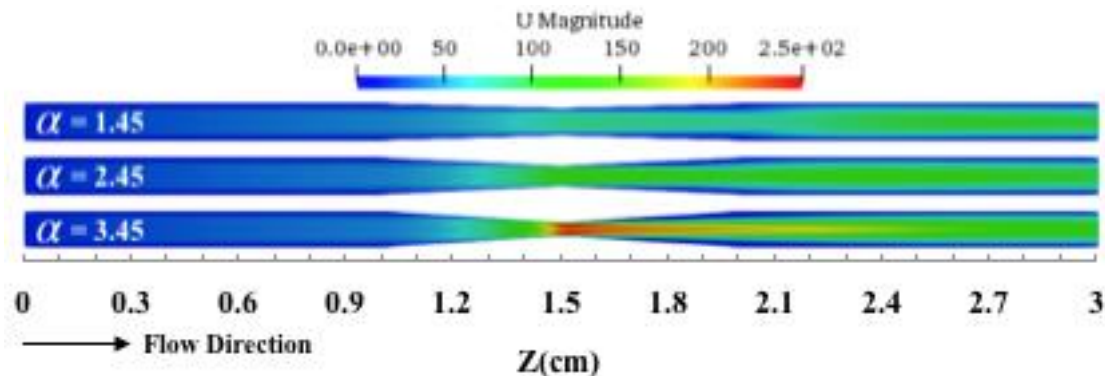


Figure 13- Contours of flow velocity variations with the converging-diverging angle for stoichiometric mixture at inlet velocity of  $12 \text{ m/s}$

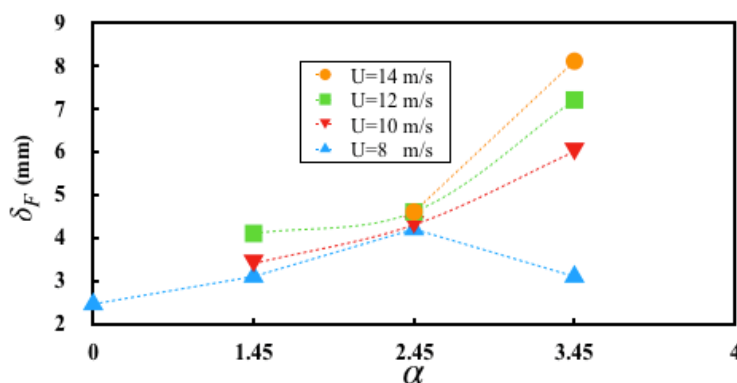


Figure 14- Diagram of the flame thickness variations with the converging-diverging angle  
 شکل ۱۴- نمودار تغییرات ضخامت شعله با زاویه همگرایی-واگرایی

در سرعت جریان ورودی ۸ m/s و نسبت هم‌ارزی ۰/۶ برای میکرولوله با زاویه ۳/۴۵° شعله پایدار نیست و موقعیت آن با گذشت زمان تغییر می‌کند. در شکل ۱۵، کانتورهای تغییرات کسر جرمی رادیکال آزاد OH با زمان نشان داده شده است. مطابق این شکل، شعله در قسمت همگرا-واگرا ناپایدار و با گذشت زمان میان این قسمت و قسمت خروجی در حال رفت‌وبرگشت است. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، با افزایش سرعت جریان ورودی شعله به سمت پایین‌دست جریان حرکت می‌کند. هنگامی که شرایط سرعت جریان ورودی و نسبت هم‌ارزی به‌گونه‌ای باشد که موجب قرارگرفتن شعله در ناحیه گلوگاه یا نزدیک به آن شود، شتاب‌گرفتن سیال در گلوگاه موجب کاهش مقیاس زمانی جابه‌جایی سیال می‌شود. این عامل سبب می‌شود که شعله کشیده‌تر شود و رادیکال‌های آزاد به‌همراه گونه‌های میانی مسیر بیشتری در امتداد محور مرکزی برای انجام واکنش‌های مقدماتی طی کنند. کشیدگی شعله، همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشهود است، باعث شده که تولید رادیکال‌های آزاد OH در ناحیه احتراق کاهش یابد و شعله به سمت خاموشی هدایت شود. از طرفی وجود شار گرمای زیاد از طرف دیوار در ناحیه گلوگاه و قسمت همگرا موجب تقویت ناحیه احتراق شده و به‌عنوان یک عامل محرک سبب افزایش دما در این ناحیه و برگشت شعله به حالت قبل از کشیدگی می‌شود.

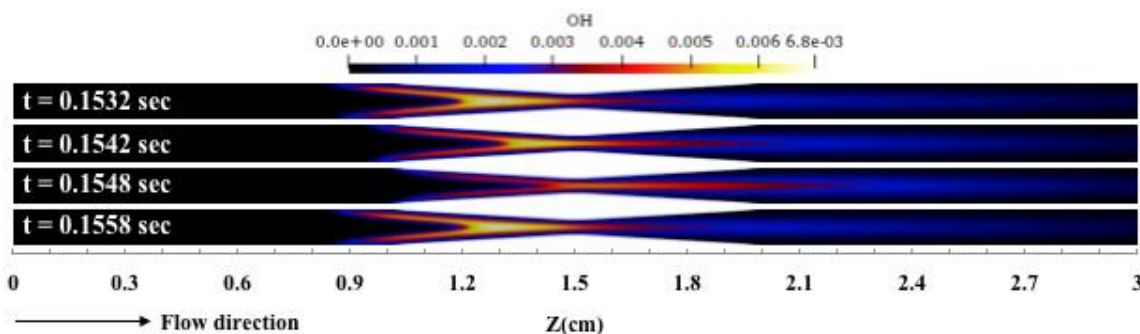


Figure 15- Contours of OH mass fraction variations and unstable behavior of the flame with time at equivalence ratio of 0.6 and inlet velocity of 8 m/s for the microtube with converging-diverging angle of 3.45°

شکل ۱۵- کانتورهای تغییرات کسر جرمی رادیکال آزاد OH و رفتار ناپایدار شعله با گذشت زمان در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ و سرعت جریان ورودی ۸ m/s برای میکرولوله با زاویه همگرایی-واگرایی ۳/۴۵°

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مطالعه عددی مشخصه‌های احتراقی مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در میکروکانال‌های همگرا-واگرا انجام شده است. مطالعه عددی انجام‌شده با در نظر گرفتن معادلات حاکم به‌صورت سه‌بعدی و گذرا انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده

نشان دادند که افزایش سرعت جریان ورودی به میکرولوله موجب انتقال ناحیه احتراق به پایین دست جریان می‌شود. همچنین، دمای ناحیه احتراق بسته به موقعیت قرارگیری شعله در قسمت‌های مختلف میکرولوله متفاوت است. در مواردی که شعله در قسمت ورودی میکرولوله قرار دارد، مکانیزم انتقال گرمای رسانی از ناحیه احتراق به ناحیه پیش‌گرمایش نقش ویژه‌ای در تعیین بیشینه دمای شعله ایفا می‌کند. این درحالی است که در قسمت همگرا-واگرا نقش مکانیزم جابه‌جایی گرما در دمای شعله پررنگ‌تر است. در شرایطی که شعله در قسمت همگرا-واگرا قرار می‌گیرد، به دلیل افزایش سرعت جریان در گلوگاه و کاهش نسبت سطح جانبی به حجم، دمای کمتری دارد. در ادامه مشخص شد که ناحیه گلوگاه تاثیر شدیدی بر افزایش ضخامت شعله دارد. در ارتباط با تاثیر زاویه همگرایی-واگرایی مشخص شد که حد شعله‌وری بالا در میکرولوله‌های همگرا-واگرا از میکرولوله بدون گلوگاه با ابعاد مشابه بیشتر است. همچنین، با افزایش زاویه همگرایی-واگرایی حد شعله‌وری بالا در میکرولوله‌های همگرا-واگرا افزایش می‌یابد. در یک سرعت ورودی و نسبت هم‌ارزی مشخص، بیشینه دمای ناحیه احتراق با افزایش زاویه همگرایی-واگرایی به علت شتاب‌گرفتن زیاد سیال در گلوگاه و افزایش آهنگ جابه‌جایی گرما کاهش می‌یابد. این در حالی است که ضخامت شعله با افزایش زاویه همگرایی-واگرایی افزایش می‌یابد و در مقایسه با میکرولوله بدون گلوگاه با ابعاد مشابه بیشتر است. نتایج مشخص کردند که در سرعت جریان ورودی  $8 \text{ m/s}$  و نسبت هم‌ارزی  $0.6$  برای میکرولوله با زاویه  $3/45^\circ$  شعله پایدار نیست و در قسمت همگرا-واگرا در حال رفت‌وبرگشت است. این رفتار شعله به علت رقابت میان شتاب‌گرفتن زیاد سیال در گلوگاه و شار زیاد گرمای جذب‌شده در ناحیه اطراف گلوگاه ایجاد می‌شود.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از مرکز پردازش‌های سریع دانشگاه شهید چمران اهواز بابت همکاری‌های به‌عمل‌آمده در اجرای پردازش موازی اعلام می‌دارند.

## منابع

1. D. G. Norton and D. G. Vlachos, "Combustion characteristics and flame stability at the microscale: a CFD study of premixed methane/air mixtures," *Chemical Engineering Science*, 58, 2003, pp. 4871-4882.
2. D.G. Norton and D.G. Vlachos, "a CFD study of propane/air micro flame stability," *Combustion and Flame*, 38, 2004, pp. 97-107.
3. J. Li, S. K. Chou, Z. W. Li and W. M. Yang, "A comparative study of H<sub>2</sub>-air premixed flame in micro combustors with different physical and boundary conditions," *Combustion Theory and Modeling*, 12, 2008, pp. 325-347.
4. J. Li, S. K. Chou, W. M. Yang and Z. W. Li, "A numerical study on premixed micro-combustion of CH<sub>4</sub>-air mixture: Effects of combustor size, geometry and boundary conditions on flame temperature," *Chemical Engineering Journal*, 150, 2009, pp. 213-222.
5. J. Zarvandi, S. Tabejammatt and M. R. Baig Mohammadi, "Numerical simulation of the effective parameters on the stability of stoichiometric CH<sub>4</sub>/air premixed combustion in a micro – combustion chamber," *Fuel and Combustion*, 3, No. 2, 2010, pp. 31- 45. (In Persian)
6. G. Pizza, C. E. Frouzakis, J. Mantzaras, A. G. Tomboulides and K. Boulouchos, "Dynamics of premixed hydrogen/air flames in microchannels," *Combustion and Flame*, 152, 2008, pp. 433-450.
7. G. Pizza, C. E. Frouzakis, J. Mantzaras, A. G. Tomboulides and K. Boulouchos, "Dynamics of premixed hydrogen/air flames in mesoscale channels," *Combustion and Flame*, 155, 2008, pp. 2-20.
8. G. Pizza, C. E. Frouzakis, J. Mantzaras, A. G. Tomboulides and K. Boulouchos, "Three-dimensional simulations of premixed hydrogen/air flames in microtubes," *J. Fluid Mech*, 658, 2010, pp. 463-491.
9. A. Alipoor, K. Mazaheri and A. Shamoopour, "Dynamics of lean hydrogen/air flame regimes in micro scale combustion," *Modares Mechanical Engineering*, 14, No. 3, 2014, pp. 94 – 102. (In Persian)
10. A. Alipoor and K. Mazaheri, "Numerical study of the inlet velocity effect on characteristics of repetitive extinction – ignition dynamics for lean premixed hydrogen – air combustion in a heated micro channel," *Fuel and Combustion*, 8, No. 2, 2015, pp. 33 – 54. (In Persian)
11. A. Alipoor and K. Mazaheri, "Bifurcation of propagating Flame in repetitive extinction – ignition phenomenon in premixed Hydrogen – air combustion in a heated micro channel," *J. Mechanical Engineering University of Tabriz*, 46, No. 2, 2016, pp. 73 – 85. (In Persian)



12. A. Tang, Y. Xu, C. Shan, J. Pan and Y. Liu, "A comparative study on combustion characteristics of methane, propane and hydrogen fuels in a micro-combustor," *International J. Hydrogen Energy*, 40, 2015, pp. 16587-16596.
13. W. M. Yang, S. K. Chou, C. Shu, Z. W. Li and H. Xue, "Combustion in a micro-cylindrical combustor with and without a backward facing step," *Applied Thermal Engineering*, 22, 2002, pp. 1777-1787.
14. J. Li, S. K. Chou, G. Huang, W. M. Yang and Z. W. Li, "Study on premixed combustion in cylindrical micro combustors: Transient flame behavior and wall heat flux," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 2009, pp. 764-773.
15. H. Faramarzpour, K. Mazaheri and A. Alipoor, "The Numerical Investigation of Physical and Geometrical Conditions of Combustor and Mixture on Flame Stability in Micro Burner and Their Effects on Radiation Efficiency," *Fuel and Combustion*, 9, 2016, pp. 59-74. (In Persian)
16. MH. Saberi Moghadam, K. Mazaheri and A. Alipoor, "Numerical study of bluff body effect on lean premixed hydrogen/air combustion in a micro - scale combustor," *Modares Mechanical Engineering*, 14, No. 13, 2015, pp. 86-94. (In Persian)
17. A. Alipoor and MH. Saidi, "Improvement of combustion characteristics for hydrogen - air mixture using modular structure in a novel micro combustor," *Fuel and Combustion*, 12, No. 4, 2019, pp. 1-13. (In Persian)
18. M. Akram and S. Kumar, "Experimental studies on dynamics of methane-air premixed flame in meso-scale diverging channels," *Combustion and Flame*, 158, 2011, pp. 915-924.
19. H. R. Askarifard Jahromi and S. Hossainpour, "Numerical study of propane-air combustion stability in a diverging micro channel," *Fuel and Combustion*, 7, 2014, pp. 17-30. (In Persian)
20. B. Khandelwal and S. Kumar, "Experimental investigations on flame stabilization behavior in a diverging micro channel with premixed methane - air mixtures," *Applied Thermal Engineering*, 30, 2010, pp. 2718-2723.
21. W. Yang, C. Deng, J. Zhou, J. Liu, Y. Wang and K. Cen, "Experimental and numerical investigations of hydrogen-air premixed combustion in a converging-diverging micro tube," *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 2014, pp. 3469-3476.
22. S. Biswas, P. Zhang, H. Wang and L. Qiao, "Propagation and extinction behavior of methane/air premixed flames through straight and converging-diverging microchannels," *Applied Thermal Engineering*, 148, 2019, pp. 1395-1406.
23. S. R. Turns and S. J. Mantel, *An Introduction to Combustion*, Second Edition, New York, McGraw Hill, 2000.
24. N. M. Marinov, C. K. Westbrook and W. J. Pitz, "Detailed and global chemical kinetics model for hydrogen," 8th International Symposium on Transport Properties, San Francisco, USA, October 1995.
25. [Online], <<https://www.tue.nl/combustion/home.php>>, [April 2012].
26. [Online], <[http://combustion.berkeley.edu/gri\\_mech/data/nasa\\_plnm.html](http://combustion.berkeley.edu/gri_mech/data/nasa_plnm.html)>, [13 May 2019].
27. T. Poinsot and D. Veynante, *Theoretical and Numerical Combustion*, Second Edition, Philadelphia, Edwards, 2005.

## English Abstract

### Investigation of converging-diverging angle effect on combustion characteristics of premixed hydrogen-air in converging-diverging microtubes

Pouyan Abbaspour<sup>1</sup>, Alireza Alipoor<sup>2\*</sup> and Yousef Tamsilian<sup>3</sup>

1- Student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz

3- Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz

(Received: 2020.02.29, Received in revised form: 2020.05.01, Accepted: 2020.05.03)

In the present study, combustion characteristics of premixed hydrogen-air mixture in converging - diverging microtubes were investigated using numerical simulation of combustion process. The purpose is investigation of the effect of inlet velocity and converging-diverging angle on the combustion characteristics consist of maximum flame temperature, flame position, upper flammability limit and flame thickness. Governing equations were considered as three dimensional and transient with detailed chemistry mechanisms. Results showed that inlet velocity affect flame position in the microtube and maximum flame temperature related on the flame position will change. Minimum flame temperature in a specific equivalence ratio were occurred when the flame placed in the converging-diverging section. Inlet velocity and throat section have a direct effect on the flame thickness. Increasing the flame thickness at high inlet velocities for microtubes with low throat diameter causes to blow out a part of the flame. Compared to a microtube with the same dimensions, it was found that making a throat zone in the microtubes causes to increase the upper flammability limit.

**Keywords:** Converging - Diverging Microtube, Throat, Flame, Hydrogen, Upper Flammability Limit, Flame Thickness