

## بهبود مشخصه‌های احتراقی مخلوط هیدروژن-هوا با استفاده از ساختار ترکیبی در محفظه‌های احتراقی در مقیاس میکرو

علیرضا علی‌پور<sup>۱\*</sup> و محمدحسن سعیدی<sup>۲</sup>

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

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، saman@sharif.edu

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۷/۷/۴، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۷/۸/۱۰، پذیرش: ۹۷/۸/۲۲)

**چکیده:** در کار حاضر، تاثیر استفاده از ساختار ترکیبی بر مشخصه‌های احتراقی مخلوط هیدروژن-هوا، با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی و در نظر گرفتن سینتیک شیمیایی جزئی و ضرایب نفوذ مولکولی، بررسی می‌شود. تاثیر پارامترهای سرعت جریان ورودی، رسانش حرارتی دیوار و انحنای دیوار بر روی مشخصه‌های احتراق هیدروژن-هوا برای دو ساختار ساده و ترکیبی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ساختار ترکیبی تاثیر بسزایی بر روی مشخصه‌های احتراقی و مکان شعله می‌گذارد. در ساختار ترکیبی، نقش انتقال حرارت، به واسطه سیال ثانویه، در مقایسه با ساختار ساده افزایش می‌یابد که منجر به بهبود مشخصه‌های حرارتی محفظه احتراق و کاهش نقش رسانش حرارتی دیوار در ساختار ترکیبی می‌شود. استفاده از آرایش ترکیبی در مقایسه با ساختار ساده باعث می‌شود که در سرعت ورودی یکسان، شعله به صورت مشخصی در فاصله نزدیک‌تر از ورودی محفظه احتراق تشکیل شود. تاثیر نسبت انحنای لوله به شعاع لوله با در نظر گرفتن دو مقدار ۱ و ۲ بررسی و مشاهده شد که در نسبت انحنای کمتر، به علت نقش پیش گرم کردن جریان ورودی توسط محصولات، مکان جبهه شعله به ورودی نزدیک‌تر و توزیع دما درون محفظه احتراق بهتر خواهد بود.

**کلیدواژگان:** احتراق در مقیاس میکرو، ساختار ترکیبی، محفظه احتراق U شکل، شبیه‌سازی عددی

### مقدمه

استفاده از تجهیزات در مقیاس‌های میکرو و مزو می‌تواند نقش کلیدی در آینده انسان‌ها داشته باشد. این ابزار، در مقیاس میکرو، نیازمند یک سیستم تولید توان در حجم کم، سبک و با چگالی انرژی بالاست. به کارگیری سیستم‌های ترموفوتوولتائیک (TPV)<sup>۱</sup> در مقیاس میکرو می‌تواند راهکاری امیدبخش به منظور تولید توان در مقیاس‌های کوچک باشد. یکی از اجزای اصلی این سیستم‌ها محفظه احتراق است که وظیفه تولید انرژی حرارتی را دارد. به منظور بهبود بازده سیستم‌های TPV نیاز است توزیع دمای یکنواخت و دمای بیشینه توسط محفظه احتراق ایجاد شود. به همین منظور، برای بهبود عملکرد محفظه‌های احتراقی در مقیاس میکرو، راهکارهای متفاوتی توسط محققان در سال‌های اخیر ارائه شده است. پوشش سطح داخلی محفظه احتراق با استفاده از کاتالیزور و همچنین استفاده از مفهوم آنتالپی اضافه به عنوان دو رویکرد اصلی برای بهبود پایداری احتراق در مقیاس‌های میکرو معرفی می‌شوند.

در همین راستا، پیزا و همکاران [۱] تاثیر سرعت جریان ورودی و شدت واکنش‌های کاتالستی را بر دینامیک‌های شعله رقیق هیدروژن-هوا در یک میکروکانال صفحه‌ای با ضخامت ۲ میلی‌متر با پوشش سطح داخلی پلاتینیوم بررسی کردند. ژو و

1. Thermophotovoltaic

همکاران [۲] تاثیر مواد مختلف بر عملکرد محفظه‌های احتراقی کاتالیستی را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که استفاده از کاتالیزور در سطح داخلی محفظه احتراق باعث افزایش پایداری احتراق می‌شود. لوسی و همکاران [۳] نشان دادند که انتقال حرارت از دیواره‌های کاتالیستی منجر به آرام‌سازی جریان و در نتیجه پایداری بهتر شعله در محفظه احتراق می‌شود. یان و همکاران [۴] مشخصه‌های احتراق کاتالیستی متان-هوا را در یک میکروکانال صفحه‌ای را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزودن هیدروژن به سوخت تاثیر ویژه‌ای بر کاهش دمای اشتعال متان و کوتاه شدن زمان اشتعال دارد. باریلا و همکاران [۵] احتراق رقیق هیدروژن-هوا را در یک کانال صفحه‌ای با پوشش داخلی پلاتینوم شبیه‌سازی کردند. جیاکینگ و همکاران [۶] تاثیر فشار ورودی بر دمای دیوار و بازده اکسرژی محفظه احتراق استوانه‌ای میکرو با وجود پله در هندسه را شبیه‌سازی کردند. یکی دیگر از رویکردهای بهبود شرایط احتراق و پایداری شعله در محفظه احتراق استفاده از مفهوم آنتالپی اضافه است. در این شرایط، به واسطه پیش گرمایش جریان ورودی با گرمای انتقالی از سوی دیوار، دمای مخلوط ورودی افزایش یافته و منجر به افزایش دمای شعله بی‌دررو خواهد شد. با استفاده از این مفهوم، هندسه‌های مختلفی توسط محققان ارائه شده است. چن و بوکمستر [۷] یک محفظه احتراق حلزونی را به صورت عددی با در نظر گرفتن اندرکنش انتقال حرارت و واکنش شیمیایی در فاز گازی و نفوذ حرارت در دیواره‌های جامد شبیه‌سازی کردند. ایشان تاثیر عدد رینولدز، نسبت هم‌ارزی، ضریب رسانش حرارتی دیوار و ضریب انتشار تشعشعی دیواره را بر حدهای شعله‌وری شعله بررسی کردند. همچنین، ایشان نشان دادند که افزایش عدد رینولدز و نسبت هم‌ارزی تا میزان مشخصی، باعث افزایش نرخ واکنش و حرکت آن به بالادست جریان می‌شود.

کیم و همکاران [۸] مشخصه‌های احتراق مخلوط پروپان-هوا را در محفظه‌های حلزونی مختلف به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. آن‌ها بیان کردند که شعله، به علت چرخش حرارت از گازهای سوخته به گازهای نسوخته، می‌تواند در محدوده گسترده‌ای از سرعت‌های ورودی و نسبت هم‌ارزی ورودی پایدار شود. یکی از نتایج قابل توجه آن‌ها این بود که حد شعله‌وری پایین در نتایج ایشان مشاهده نشد.

در سال‌های بعد، کیم و همکاران [۹]، با توسعه کارهای آزمایشگاهی بر روی محفظه احتراق حلزونی، تاثیر پارامترهایی نظیر قطر محفظه احتراق، ضخامت دیواره‌ها، اندازه کانال و جنس محفظه را بررسی کردند. وان و همکاران [۱۰] تاثیر استفاده از حفره در دیواره‌های محفظه احتراق برای مخلوط هیدروژن-هوا را بررسی کردند. ژو و همکاران [۱۱] تاثیر استفاده از شیارهای مستطیلی در محفظه احتراق استوانه‌ای میکرو را بر دمای دیواره خارجی محفظه احتراق بررسی کردند. نتایج ایشان نشان می‌داد که استفاده از شیارهای مستطیلی باعث ایجاد توزیع دمای بالاتر و یکنواخت‌تر بر دیواره خارجی می‌شود.

وان و همکاران [۱۲] تاثیر استفاده از جسم مانع در محفظه‌های احتراق میکرو را به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که استفاده از جسم مانع باعث افزایش قابل توجه حدهای شعله‌وری می‌شود. این بررسی در کارهای دیگران [۱۸-۱۳] نیز انجام شد و نتایج مشابهی ارائه شد.

چو و همکاران [۱۹]، پن و همکاران [۲۰] و لی و همکاران [۲۱] از محیط‌های متخلخل در محفظه احتراق میکرو به منظور بهبود پایداری احتراق و افزایش حدهای عملکردی استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که حد خاموشی پایین مستقل از هندسه محفظه احتراق است، در حالی که هندسه محفظه احتراق و پارامترهای محیط متخلخل، نظیر مکان، اندازه و ضریب تخلخل ماده، بر حدهای برگشت شعله<sup>۱</sup> تاثیر می‌گذارد. ماروتا و همکاران [۲۲] تاثیر نسبت هم‌ارزی و سرعت جریان ورودی را بر مشخصه‌های احتراقی هوا-متان در یک میکروکانال گرم‌شونده با قطر داخلی ۲ میلی‌متر بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که محدوده احتراق پایدار برای کانال U شکل نسبت به کانال‌های مستقیم حداقل دوبرابر بیشتر است. در کار دیگر، ریچکورو و کریستیس [۲۳]، به صورت آزمایشگاهی، پایداری احتراق پیش‌آمیخته متان-اکسیژن را در یک کانال منحنی بررسی کردند. آن‌ها

---

1. Flashback

بیان کردند که انحنای لوله تاثیر اندکی بر اختلاط ترکیب متان-اکسیژن دارد، در حالی که تاثیر قابل توجهی بر ضخامت شعله و پایداری آن دارد.

بیگ محمدی و همکاران [۲۴] تاثیر وجود جسم مانع کاتالیستی در مرکز محفظه را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج آن‌ها، استفاده از مانع کاتالیستی با پله به همراه ضریب انتقال حرارت رسانی بالا پایداری شعله به خصوص در سرعت‌های بالا را افزایش می‌دهد. زروندی و همکاران [۲۵]، در شبیه‌سازی عددی، تاثیر اضافه کردن هیدروژن به مخلوط متان-هوا را بررسی کردند. براساس نتایج، اضافه کردن هیدروژن، علاوه بر پایدار کردن هرچه بیشتر شعله، استفاده از این محفظه را برای ترموفتولتائیک ژنراتورها مناسب‌تر می‌کند. همچنین، بیگ محمدی و همکاران [۲۶] در شبیه‌سازی عددی تاثیر قراردادن سیم داخل میکرومحفظه را بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که وجود سیم داخل محفظه میکرو، علاوه بر افزایش بازده محفظه احتراق، پایداری بیشتر شعله در سرعت‌های بالا را از طریق تولید بیشتر رادیکال‌های OH، H و غیره به همراه دارد. با توجه به مرور انجام‌شده بر مقالات، مشاهده می‌شود که به منظور طراحی یک محفظه احتراق مطلوب، بایستی به ویژگی‌هایی نظیر حد شعله‌وری گسترده، توزیع دمای یکنواخت بر سطح خارجی محفظه احتراق، قابلیت ساخت آسان و امکان استفاده به شکل ترکیبی توجه کرد. استفاده از لوله‌های منحنی یکی از هندسه‌های مفید برای استفاده به عنوان محفظه احتراق میکروست. تشکیل جریان ثانویه و در نتیجه ایجاد گردابه‌های حرارتی باعث می‌شود که حدهای شعله‌وری در کانال‌های منحنی شکل نسبت به لوله‌های مستقیم بسیار گسترده‌تر باشد. به علاوه، به علت ساختار منحنی لوله‌های میکرو، پیش‌گرمایش مخلوط‌های سرد ورودی توسط گرمای محصولات بهتر اتفاق می‌افتد. در کار قبلی نویسندگان حاضر [۲۷]، تاثیر به کارگیری یک لوله U شکل بر مشخصه‌های احتراقی بررسی شد. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده شد که با استفاده از هندسه توسعه داده شده می‌توان به ایجاد بازده‌های بالاتر دست یافت. در ادامه کار قبلی، در کار حاضر، با استفاده از فرایند شبیه‌سازی عددی، مشخصه‌های احتراقی مخلوط هیدروژن-هوا در یک ساختار ترکیبی از میکرولوله‌های U شکل بررسی می‌شود و نتایج این کار با کار قبلی [۲۷] مقایسه می‌شود. برای این شبیه‌سازی از سینتیک جزئی به همراه ضرایب نفوذ مولکولی مختلف برای گونه‌ها استفاده شده است. تاثیر پارامترهای سرعت جریان ورودی، ضریب رسانش دیوار، نسبت انحنای لوله به قطر لوله و همچنین به کارگیری سرعت‌های ورودی متفاوت، برای هر یک از لوله‌ها، بررسی می‌شود.

## معادلات حاکم

در کار حاضر، برای شبیه‌سازی احتراق در مقیاس کوچک، معادلات نویر استوکس به همراه معادله بقای انرژی و معادلات بقای گونه‌ها در ناحیه واکنشی و معادله بقای انرژی در دیواره جامد حل می‌شوند. این معادلات در رابطه‌های (۱) تا (۶) ارائه شده است.

پیوستگی:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

بقای تکانه:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial(p)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( -\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (2)$$

در این روابط،  $\rho$ ،  $u$  و  $\mu$  به ترتیب چگالی، بردار سرعت و گرانشی دینامیکی‌اند.

معادله انرژی در سیال:

$$\frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_f \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho \sum_{k=1}^N h_k Y_k V_{k,i} \right) + \dot{\omega}_T \quad (3)$$

در این رابطه،  $\lambda$  رسانش حرارتی مخلوط و  $h_i$  آنتالپی است.

$$\frac{\partial(\rho u_i Y_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_i \quad (4)$$

در این رابطه،  $\dot{\omega}_i$  و  $Y_i$  به ترتیب کسر جرمی و نرخ تشکیل و یا از بین رفتن گونه شیمیایی  $i$  در اثر واکنش هاست.  $D_{i,m}$  مقدار میانگین نفوذ گونه  $i$  ام در مخلوط است که برای محاسبه آن از قانون فیک استفاده می شود. همچنین، برای محاسبه ضرایب نفوذ دوتایی از رابطه تجربی چپمن-انسگ استفاده می شود.

برای محاسبه چگالی از معادله حالت گاز کامل به شکل رابطه (5) استفاده می شود.

$$p = \rho \frac{R_u}{\bar{W}} T \quad (5)$$

$\bar{W}$  وزن مولکولی میانگین مخلوط و  $R_u$  ثابت جهانی گاز ایدئال است.

معادله انرژی در جامد به شکل زیر بیان می شود.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (6)$$

که در آن،  $\lambda_s$  نفوذ حرارتی در جامد است.

### مشخصات محفظه احتراق و مباحث عددی

طرحواره محفظه احتراق شبیه سازی شده به همراه شبکه بندی مورد استفاده در شکل 1 نشان داده شده است. محفظه احتراق شامل یک یا دو میکروکانال U شکل با قطر داخلی  $D$  و شعاع انحنا  $R$  و ضخامت  $t_w$  است که درون یک جعبه قرار داده شده است. میکروکانال U شکل مزیت های فراوانی دارد که می توان به وجود جریان های ثانویه و در نتیجه ایجاد گردابه های حرارتی اشاره کرد. همچنین، با توجه به هندسه U شکل میکروکانال، حرارت تولیدی در بخش بعد از ناحیه احتراق می تواند به پیش گرم شدن جریان ورودی کمک کند.

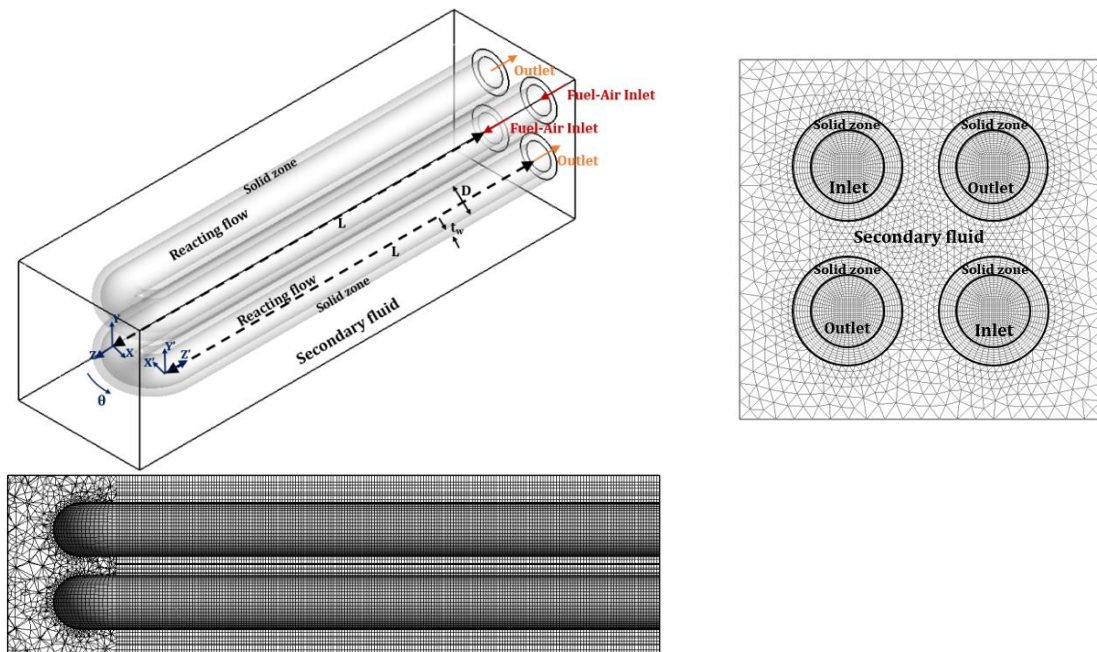


Figure 1- Geometry of the suggested micro combustor constructed with the computational grid

شکل 1- هندسه میکرو محفظه U شکل به همراه شبکه محاسباتی

با توجه به شکل ۱، محفظه احتراق مورد بررسی به سه ناحیه تقسیم‌بندی می‌شود که شامل جریان واکنشی مخلوط سوخت-هوا درون میکروکانال U شکل، دیوار میکروکانال U شکل و سیال ثانویه است که در فضای بین لوله U شکل و جعبه قرار دارد. مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا به درون میکروکانال U شکل تزریق می‌شود. در اثر جرقه اولیه ناحیه واکنش درون میکروکانال شکل می‌گیرد. حرارت تولیدی در اثر احتراق به دیوار منتقل و از طریق انتقال حرارت طولی باعث پیش‌گرم‌کردن مخلوط سرد ورودی می‌شود. از سوی دیگر، در اثر انتقال حرارت عرضی در دیوار، حرارت تولیدی به سیال ثانویه منتقل می‌شود. حضور سیال ثانویه دو اثر بر روی پایداری احتراق دارد. اول اینکه با توجه به هندسه میکرو لوله U شکل باعث می‌شود که حرارت تولیدی در ناحیه بعد از احتراق به مخلوط سرد ورودی منتقل شود که منجر به پیش‌گرم‌شدن مخلوط ورودی می‌شود. دوم اینکه باعث ایجاد تعادل حرارتی از طریق تعادل در مقیاس‌های زمانی و در نتیجه پایداری بهتر احتراق می‌شود. مقیاس زمانی انتقال حرارت در جریان واکنشی براساس مقیاس زمانی واکنشی است ( $\approx O(10^{-6})$ ) و مقیاس انتقال حرارت درون دیوار خیلی بزرگتر از جریان واکنشی و از مرتبه ( $\approx O(10^{-1})$ ) است. حضور سیال ثانویه باعث ایجاد تعادل در مقیاس زمانی انتقال حرارت بین جریان واکنشی و دیوار می‌شود و می‌توان از جریان ثانویه به‌عنوان منبع حرارتی خارجی برای میکرو محفظه احتراق استفاده کرد. در کار حاضر، از هوا به‌عنوان سیال ثانویه استفاده شده است.

به‌منظور بررسی پارامترها، نتایج بر روی سه خط استخراج شده است که در شکل ۱ به‌صورت خط‌چین نشان داده شده است. در بخش مستقیم کانال، نتایج در مختصات کارتزین و در بخش منحنی کانال، نتایج در مختصات استوانه‌ای استخراج شده است.

مخلوط هیدروژن-هوا با دمای ۳۰۰ کلوین و توزیع سرعت یکنواخت از یک سمت وارد کانال می‌شود. شرط مرزی عدم لغزش برای سرعت ( $u=0$ ) و مقدار گرادیان صفر برای گونه‌ها ( $\frac{du}{dn} = 0$ ) بر روی دیوار تنظیم می‌شود. برای خروجی کانال نیز شرایط نیومن (گرادیان صفر) شامل  $\frac{dy_i}{dn} = 0$ ،  $\frac{dT}{dn} = 0$  و  $\frac{du}{dn} = 0$  در نظر گرفته می‌شود. برای توصیف شیمی فاز گازی از مکانیزم ۹ گونه‌ای و ۲۷ واکنشی یتر و همکاران [۲۸] استفاده می‌شود. همچنین، برای محاسبه ضرایب نفوذ مولکولی از اطلاعات کتابخانه انتقال مولکولی نرم‌افزار کمکین [۲۹] استفاده شده است. در شبیه‌سازی حاضر، با در نظر گرفتن سرعت جریان ورودی و محاسبه عدد رینولدز، جریان به‌صورت آرام در نظر گرفته شد. از مدل تشعشعی DO<sup>۱</sup> برای مدل‌سازی پدیده تشعشع در محفظه احتراق استفاده شد. برای حل معادلات حاکم در این کار از نرم‌افزار Fluent استفاده شده است. حلگر مورد استفاده و شبیه‌سازی عددی توسط روش‌ها و هندسه‌های مختلف اعتبارسنجی شد. نتایج مربوط به اعتبارسنجی در کارهای قبلی نویسنده [۳۰-۳۲] و مشخصاً در کار قبلی در همین زمینه [۲۷] ارائه شده است. همچنین، استقلال حل از شبکه برای شبیه‌سازی حاضر انجام شد و با تعداد نقاط ۷۲۹۰۰۰ این استقلال به‌دست آمد.

## نتایج و بحث

### بررسی تاثیر سرعت جریان ورودی بر مشخصه‌های احتراق

شکل ۲ کانتور دما برای دو ساختار ساده و ترکیبی را برای سرعت جریان ورودی ۱۰ m/s نشان می‌دهد. برای میکرولوله U شکل، قطر ۱ mm، ضخامت دیوار ۰/۲۵ mm و رسانش حرارتی دیوار 5 W/m.K در نظر گرفته شده است. برای شرایط اتلاف حرارت خارجی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و ضریب گسیل‌مندی به ترتیب برابر با ۵ W/m<sup>2</sup>.K و ۰/۱ در نظر گرفته شده است. مخلوط رقیق هیدروژن-هوا (نسبت هم‌ارزی=۰/۵) وارد کانال می‌شود. با استفاده از یک ناحیه دمابالای اولیه واکنش‌ها آغاز و ناحیه احتراقی شکل می‌گیرد. حرارت تولیدی توسط احتراق باعث پیش‌گرم‌شدن جریان ورودی و گرم‌شدن سیال ثانویه

می‌شود. از این رو، ناحیه دمابالا در اطراف لوله U شکل دیده می‌شود. این ناحیه دما نیز در پیش گرم شدن جریان ورودی نقش بسزایی دارد و باعث پایداری بهتر احتراق می‌شود. از سوی دیگر، به علت ساختار هندسی U شکل، گرمای تولیدی در بخش محصولات از طریق سیال ثانویه به بخش مخلوط سرد ورودی منتقل می‌شود که این نیز باعث پایداری بهتر احتراق می‌شود. با مقایسه هندسه موجود با کانال مستقیم مشاهده شد که در کانال‌های مستقیم تنها تا سرعت ۴ متر بر ثانیه امکان پایداری شعله در شرایط حرارتی مشابه وجود دارد، در حالی که برای هندسه حاضر تا سرعت ۱۶ متر بر ثانیه پایدار مشاهده شد. با مقایسه دو ساختار ساده و ترکیبی در شکل ۲ مشاهده می‌شود که حدود یک چهارم سطح خارجی محفظه احتراق میکرو در دمای پایین قرار دارد که این به معنی کاهش بازده محفظه احتراق است، در حالی که استفاده از ساختار ترکیبی باعث می‌شود که شعله به طور مشخص به سمت ورودی محفظه احتراق حرکت کند. در ساختار ترکیبی، بخش ورودی یک میکرولوله به بخش خروجی میکرولوله دیگر نزدیک است. در این آرایش، گرمای آزاد شده در بخش محصولات یک میکرولوله باعث پیش گرم شدن واکنش دهنده‌ها در میکرولوله دیگر می‌شود. همین پدیده منجر به پیش گرم شدن بهتر جریان ورودی به میکرولوله و در نتیجه حرکت جبهه شعله به سمت ورودی محفظه احتراق به واسطه افزایش سرعت سوزش شعله می‌شود. نکته قابل توجه دیگر این است که در ساختار ترکیبی، مقدار دمای بیشینه نسبت به ساختار ساده کمی کمتر است، در حالی که توزیع دما در ساختار ترکیبی نسبت به ساختار ساده یکنواخت تر است. در شکل ۳، این موضوع به خوبی مشاهده می‌شود. در این شکل، توزیع دما بر روی خط محوری برای سرعت‌های ورودی متفاوت برای هر دو ساختار ترکیبی و ساده نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۳، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت جریان ورودی برای هر دو ساختار ترکیبی و ساده، مکان جبهه شعله به سمت بالادست جریان حرکت می‌کند. بیشترین مقدار بیشینه دما برای سرعت ۱۴ m/s و برای ساختار ترکیبی اتفاق می‌افتد. برای کمی کردن مکان شعله از متغیر گرمای واکنش استفاده شده است و مکان بیشینه متغیر گرمای واکنش به عنوان مکان شعله در نظر گرفته می‌شود. پارامتر گرمای واکنش بر روی خط محوری برای سرعت‌های مختلف در دو ساختار ترکیبی و ساده، در شکل ۴، نشان داده شده است. همان طور که در شکل نشان داده شده است، استفاده از ساختار ترکیبی تاثیر بسزایی بر روی مکان شعله دارد. به عنوان مثال، برای سرعت ورودی ۱۰ m/s، مکان شعله برای دو ساختار ترکیبی و ساده به ترتیب در فواصل ۵/۴ mm و ۹/۴ mm از بخش ورودی کانال قرار دارد. این اختلاف در مکان شعله قابل توجه است که می‌تواند به علت نقش پیش گرم کننده سیال ثانویه و گرمای آزاد شده از کانال مجاور باشد. این رفتار برای سرعت‌های دیگر نیز مشاهده شد.

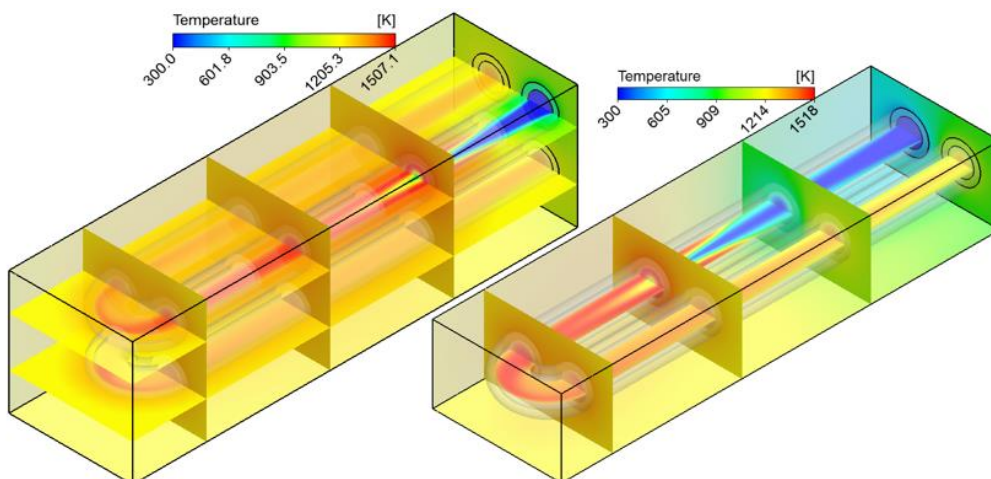


Figure 2- Temperature contours for modular structure;  $D = 1 \text{ mm}$ ,  $R/D = 1$ ;  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $k = 5 \text{ W/m}$ ,  $h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  and  $\epsilon = 0.1$

شکل ۲- کانتور دما برای ساختار ترکیبی و مقایسه آن با ساختار ساده

( $D = 1 \text{ mm}$ ,  $R/D = 1$ ,  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $k = 5 \text{ W/m}$ ,  $h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $\epsilon = 0.1$ )

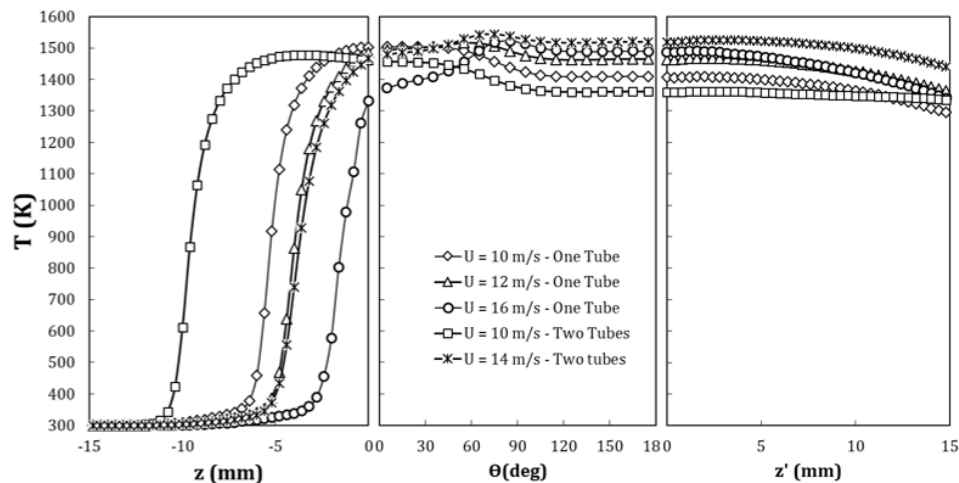


Figure 3- Temperature distribution on axial line for different inlet velocity;  
 $D = 1 \text{ mm}$ ,  $R/D = 1$ ,  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $k = 5 \text{ W/m}$ ,  $h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  and  $\varepsilon = 0.1$

شکل ۳- توزیع دما بر روی خط محوری برای سرعت‌های ورودی مختلف  
 $D = 1 \text{ mm}$ ,  $R/D = 1$ ,  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $k = 5 \text{ W/m}$ ,  $h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $\varepsilon = 0.1$

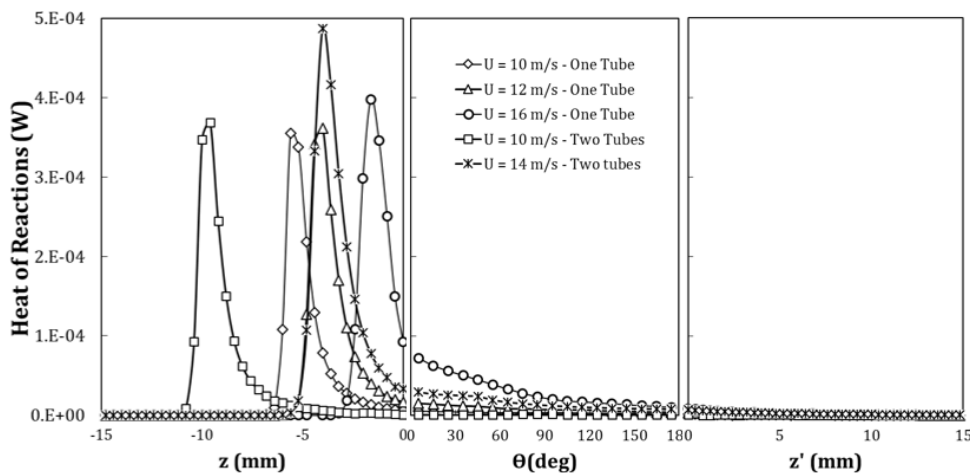


Figure 4- Distribution of heat of reactions parameter on axial line for different inlet velocities  
 $D = 1 \text{ mm}$ ,  $R/D = 1$ ,  $k = 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,  $h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  and  $\varepsilon = 0.1$ ;

شکل ۴- توزیع پارامتر گرمای واکنش بر روی خط محوری برای سرعت‌های ورودی مختلف  
 $D = 1 \text{ mm}$ ,  $R/D = 1$ ,  $k = 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,  $h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $\varepsilon = 0.1$

### تأثیر رسانش حرارتی دیوار بر مشخصه‌های احتراقی

شکل ۵ کانتور دما برای رسانش حرارتی دیوار  $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  و  $5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  در ساختار ترکیبی را برای میکرولوله با قطر  $1 \text{ mm}$  و ضخامت دیوار  $0.25 \text{ mm}$  و  $R/D = 1$  نشان می‌دهد. ضریب رسانش حرارتی  $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  و  $5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  را می‌توان به موادی نظیر پیرکس و کوارتز نسبت داد. براساس شکل ۵، مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب رسانش حرارتی از  $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  تا  $5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  تغییر مشخصی در توزیع دما اتفاق نمی‌افتد، اگرچه مقدار بیشینه دما برای رسانش حرارتی  $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  کمی بیشتر از مقدار بیشینه دما برای رسانش حرارتی  $5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  است. به‌منظور بررسی بهتر تأثیر رسانش حرارتی بر رفتار شعله، توزیع دما بر روی خط محوری در رسانش‌های حرارتی مختلف برای دو ساختار ترکیبی و ساده در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، با افزایش رسانش حرارتی تا یک مقدار مشخص، مقدار بیشینه دمای جریان تغییر نمی‌کند، ولی

مکان شعله تغییر می کند. به منظور بررسی بهتر موقعیت شعله، در شکل ۷، توزیع پارامتر نرخ واکنش برای ضرایب رسانش حرارتی مختلف در ساختار ساده و ترکیبی نشان داده شده است.

در ساختار ساده، برای رسانش حرارتی  $3 \text{ W/m.K}$  نسبت به ضریب رسانش حرارتی  $1 \text{ W/m.K}$  و  $5 \text{ W/m.K}$ ، شعله در فاصله نزدیک تری از ورودی کانال قرار می گیرد. نکته قابل توجه این است که در ضریب رسانش  $3 \text{ W/m.K}$  شعله در فاصله نزدیک تری از ورودی تشکیل شده است، به طوری که با استفاده از نمودار نرخ گرمای واکنش (شکل ۷) مشاهده می شود که شعله برای ضرایب رسانش  $1 \text{ W/m.K}$ ،  $3 \text{ W/m.K}$  و  $5 \text{ W/m.K}$  به ترتیب در فاصله های  $8/1$ ،  $4/9$  میلی متر از ورودی لوله تشکیل می شود. علت این رفتار به نقش اساسی ضریب انتقال حرارت رسانشی مرتبط است. زیرا، از طرفی باعث انتقال گرما به بالادست جریان و پیش گرم شدن جریان می شود و از طرفی حرارت تولیدی را به جریان ثانویه منتقل می کند که می تواند باعث پیش گرم شدن جریان و یا اتلاف حرارت از محفظه شود.

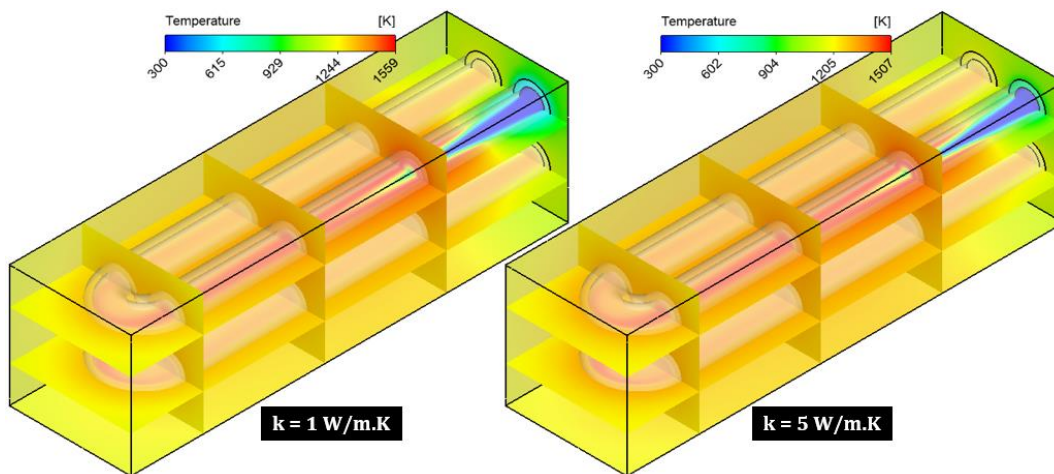


Figure 5- Temperature contours for wall thermal conductivities of 1 and 5 W/m.K in modular structure;  $D=1 \text{ mm}$ ,  $R/D=1$ ;  $U=10 \text{ m/s}$ ,  $h=5 \text{ W/m}^2.K$  and  $\epsilon=0.1$

شکل ۵- کانتور دما برای ضرایب رسانش حرارتی ۱ و  $5 \text{ W/m.K}$  در ساختار ترکیبی  
 $D=1 \text{ mm}$ ,  $R/D=1$ ;  $U=10 \text{ m/s}$ ,  $h=5 \text{ W/m}^2.K$ ,  $\epsilon=0.1$

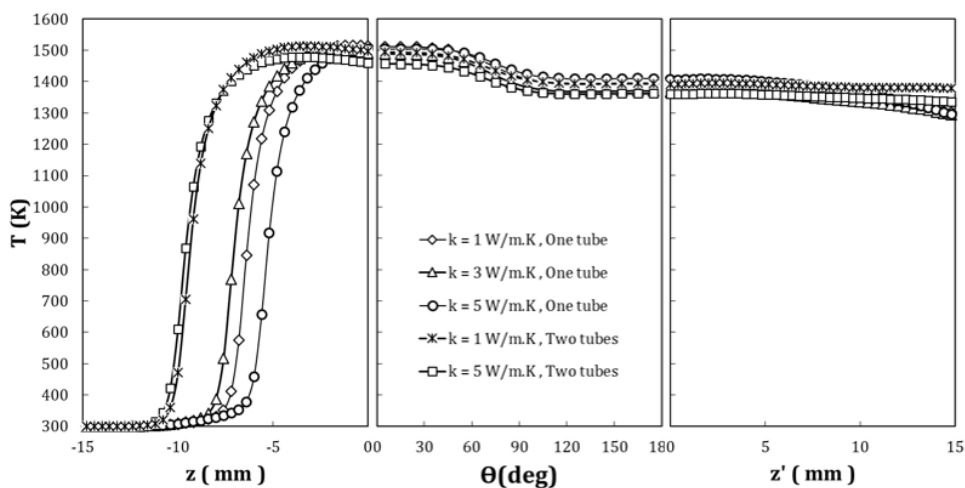


Figure 6- Temperature distribution on axial line for different wall thermal conductivities;  $D=1 \text{ mm}$ ,  $R/D=1$ ,  $U=10 \text{ m/s}$ ,  $h=5 \text{ W/m}^2.K$  and  $\epsilon=0.1$

شکل ۶- توزیع دما بر روی خط محوری برای ضرایب رسانش حرارتی مختلف  
 $D=1 \text{ mm}$ ,  $R/D=1$ ,  $U=10 \text{ m/s}$ ,  $h=5 \text{ W/m}^2.K$ ,  $\epsilon=0.1$



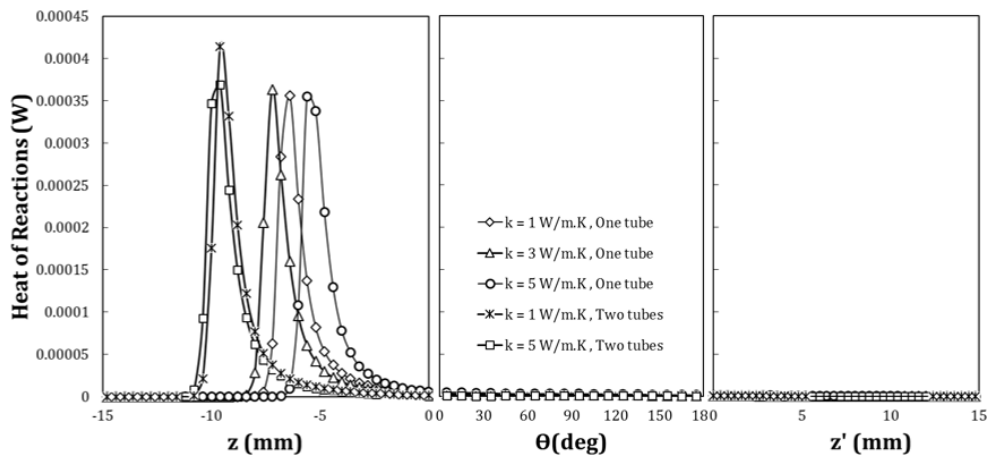


Figure 7: Distribution of heat of reactions parameter on axial line for different wall thermal conductivities;  $D = 1 \text{ mm}$ ,  $R/D = 1$ ,  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  and  $\varepsilon = 0.1$

شکل ۷- توزیع پارامتر گرمای واکنش بر روی خط محوری برای ضرایب رسانش حرارتی مختلف  $D = 1 \text{ mm}$ ,  $R/D = 1$ ;  $U = 10 \text{ m/s}$ ,  $h = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $\varepsilon = 0.1$

در ساختار ترکیبی، رفتاری مشابه برای توزیع دما در رسانش‌های حرارتی  $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  و  $5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  مشاهده می‌شود. علت این رفتار را می‌توان در نقش غالب جریان ثانویه دانست، به طوری که با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که مکان شعله برای ضرایب رسانش  $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  و  $5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  تقریباً یکسان است. در پیکربندی حاضر، بخشی از گرمای آزاد شده از فرایند احتراق در محصولات از طریق پدیده نفوذ و جابه‌جایی به مواد واکنش‌دهنده منتقل می‌شوند و بخش دیگری از آن از طریق دیوار به واسطه انتقال حرارت رسانشی عرضی و طولی منتقل می‌شود. از طریق انتقال حرارت عرضی گرمای آزاد شده به جریان ثانویه منتقل می‌شود که باعث افزایش دمای جریان ثانویه می‌شود و از طریق انتقال حرارت طولی باعث انتقال گرما به بالادست جریان و افزایش دمای مواد واکنش‌دهنده می‌شود. مکانیزم‌های حرارتی بیان شده منجر به ایجاد مقیاس‌های زمانی حرارتی مختلف درون محفظه احتراق می‌شوند که شامل مقیاس زمانی شیمیایی که مربوط به ناحیه واکنشی، مقیاس زمانی انتقال حرارت رسانشی برای ناحیه جامد و مقیاس زمانی جابه‌جایی برای جریان ثانویه است. از آنجایی که در ساختار ترکیبی ابعاد محفظه احتراق نسبت به ساختار ساده بزرگ‌تر است، مقیاس زمانی مربوط به جریان ثانویه نیز برای ساختار ترکیبی نسبت به ساختار ساده بزرگ‌تر خواهد بود. از این رو، تاثیر رسانش حرارتی دیوار بر روی مکان شعله در ساختار ترکیبی نسبت به ساختار ساده کمتر خواهد بود.

### تاثیر انحنای میکرولوله بر مشخصه‌های احتراقی

تاثیر انحنای لوله در ساختار ترکیبی در شکل ۸ برای میکرولوله با قطر  $1 \text{ mm}$  و ضخامت دیوار  $0.25 \text{ mm}$  و دو نسبت انحنای لوله برابر با  $R/D=1$  و  $R/D=2$  نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸، مشاهده می‌شود که با افزایش انحنای لوله، حجم سیال ثانویه و همچنین سطح مورد نیاز برای انتقال حرارت افزایش می‌یابد که به این معنی است که مقدار بیشینه دمای جریان در محفظه احتراق میکرو کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش انحنای لوله، فاصله بین دو بخش مستقیم لوله‌ها افزایش می‌یابد که باعث کاهش نقش پیش‌گرم کردن جریان واکنش‌دهنده‌ها با جریان محصولات می‌شود. به منظور کمی‌سازی این رفتار، توزیع دما و پارامتر گرمای واکنش بر روی خط محوری برای دو ساختار ساده و ترکیبی در شکل‌های ۹ و ۱۰ ترسیم شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که شعله در فاصله دورتری نسبت به ورودی تشکیل می‌شود که به علت افزایش اتلاف حرارت از میکرولوله و همچنین کاهش نقش پیش‌گرم‌کنندگی درون لوله است. بنابراین، می‌توان بیان کرد که مقدار دمای بیشینه برای هر دو ساختار ساده و ترکیبی با افزایش انحنای میکرولوله کاهش می‌یابد.

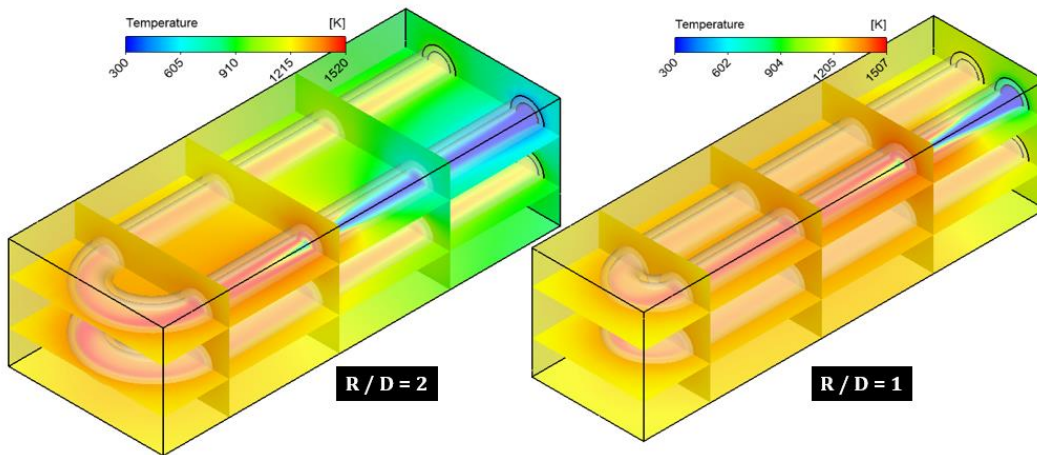


Figure 8- Temperature contours for tube curvature of 1 and 2 in modular structure;  
 $D=1$  mm,  $U=10$  m/s,  $k=5$  W/m.K,  $h=5$  W/m<sup>2</sup>.K and  $\epsilon=0.1$   
 شکل ۸- کانتور دما برای انحنای لوله ۱ و ۲ در ساختار ترکیبی

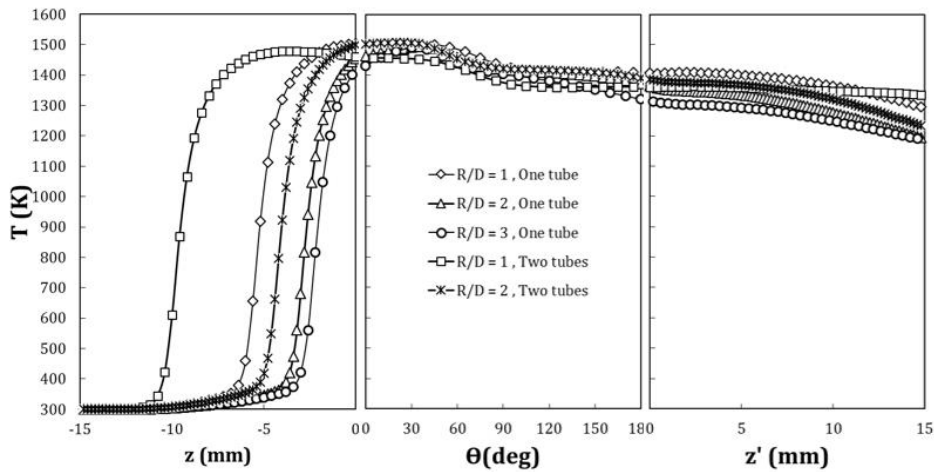


Figure 9- Temperature distribution on axial line for different tube curvature  
 $D=1$  mm,  $U=10$  m/s,  $k=5$  W/m.K,  $h=5$  W/m<sup>2</sup>.K and  $\epsilon=0.1$   
 شکل ۹- توزیع دما روی خط محوری برای انحنای لوله مختلف

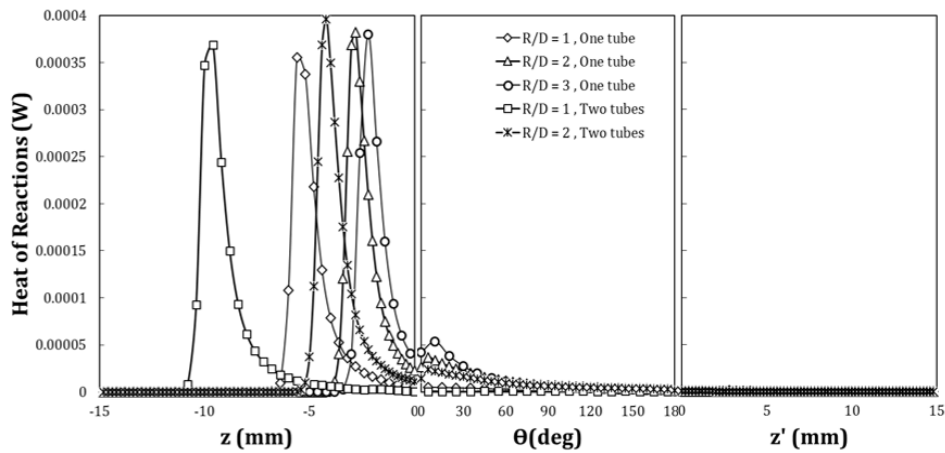


Figure 10- Distribution of heat of reactions parameter on axial line for different tube curvature;  
 $D=1$  mm,  $U=10$  m/s,  $k=5$  W/m.K,  $h=5$  W/m<sup>2</sup>.K and  $\epsilon=0.1$   
 شکل ۱۰- توزیع پارامتر گرمای واکنش روی خط محوری برای انحنای لوله مختلف

نکته قابل توجه دیگر این است که مکان جبهه شعله با افزایش انحنای لوله برای ساختار ترکیبی نسبت به ساختار ساده کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، برای  $R/D=1$ ، مکان شعله در ساختار ساده در فاصله  $9/4$  mm و برای ساختار ترکیبی، در فاصله  $5/4$  mm قرار دارد. در حالی که برای  $R/D=2$  مکان شعله برای ساختار ساده در مکان  $12/2$  mm از ورودی داشته و برای ساختار ترکیبی، شعله در مکان  $10/8$  mm شکل می‌گیرد.

### تأثیر سرعت‌های ورودی متغیر بر مشخصه‌های احتراقی

مشخصه دیگری که در ساختارهای ترکیبی می‌توان به‌کار برد استفاده از سرعت‌های ورودی متغیر برای هر یک از میکرولوله‌هاست. این ویژگی می‌تواند در تعیین مکان بهینه شعله به‌منظور به‌دست‌آوردن بیشترین بازده در محفظه احتراقی میکرو تأثیرگذار باشد. در شکل ۱۱، تأثیر سرعت‌های ورودی متغیر با استفاده از کانتورهای دما و در شکل ۱۲ تغییرات دما بر روی خط محوری نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ملاحظه می‌شود با استفاده از این ویژگی می‌توان به توزیع دماهای یکنواخت‌تری درون محفظه رسید.

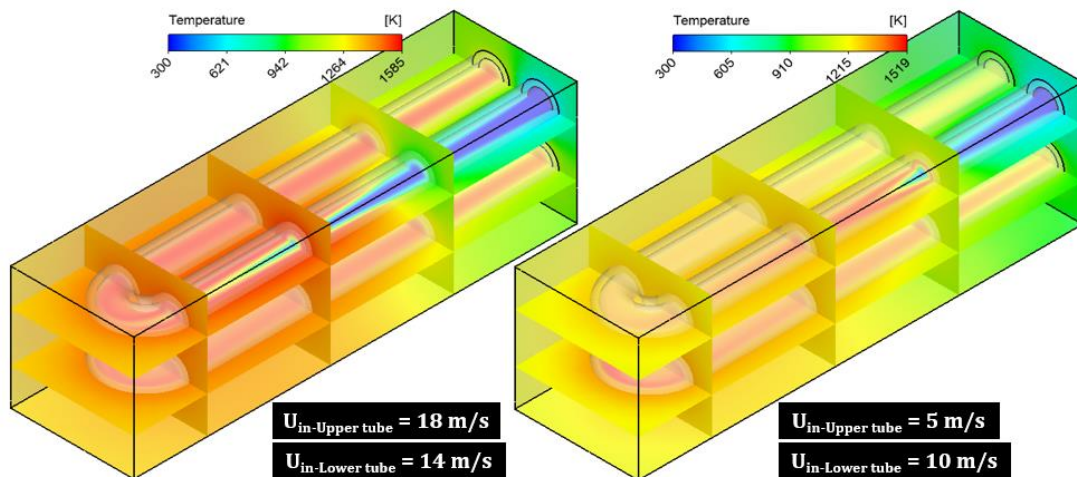


Figure 11- Temperature contours for variable inlet velocities;  $D=1$  mm,  $R/D=1$ ,  $k=5$  W/m.K,  $h=5$  W/m<sup>2</sup>.K and  $\varepsilon=0.1$

شکل ۱۱- کانتور دما برای سرعت‌های ورودی متغیر

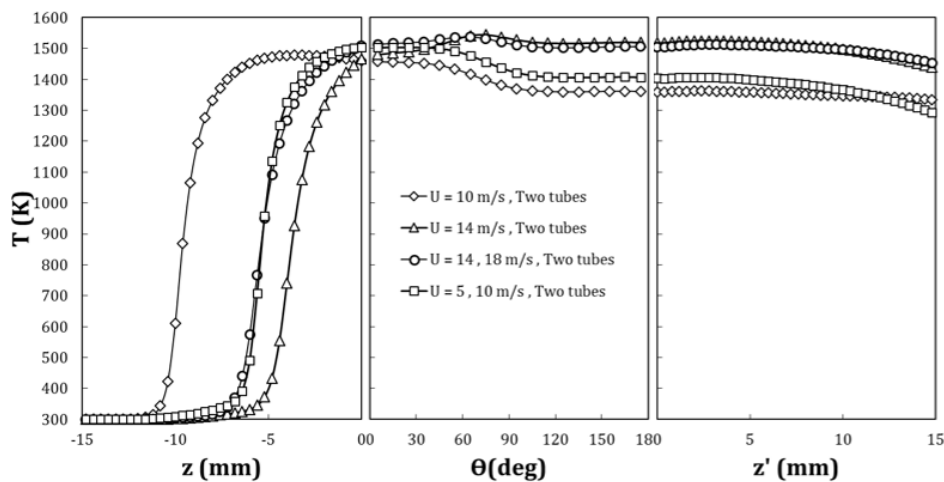


Figure 12- Temperature distribution on lower tube on axial line for variable inlet velocities;  $D=1$  mm,  $R/D=1$ ,  $k=5$  W/m.K,  $h=5$  W/m<sup>2</sup>.K and  $\varepsilon=0.1$

شکل ۱۲- توزیع دما بر روی خط محوری برای لوله پایینی در سرعت‌های ورودی متغیر

## نتیجه گیری

در کار حاضر، استفاده از ساختار ترکیبی در محفظه‌های احتراقی میکرو با به‌کارگیری شبیه‌سازی سه‌بعدی انجام شد. مشخصه‌های احتراقی مخلوط رقیق هوا-هیدروژن در میکرومحفظه تحت‌تأثیر پارامترهای مختلف نظیر سرعت جریان ورودی، رسانش حرارتی دیوار، انحنای لوله و سرعت‌های جریان ورودی متغیر بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از ساختار ترکیبی تأثیرات ویژه‌ای در بهبود مشخصه‌های احتراقی دارد. استفاده از آرایش ترکیبی در مقایسه با ساختار ساده باعث می‌شود که در سرعت ورودی یکسان، شعله به‌صورت مشخصی در فاصله نزدیک‌تر از ورودی محفظه احتراق تشکیل شود. نتایج مشابه نیز با تغییر رسانش دیوار برای دو حالت ساده و ترکیبی مشاهده شد. با توجه به نقش قوی‌تر سیال ثانویه در ساختار ترکیبی نسبت به انتقال حرارت رسانش در دیوار مشاهده می‌شود که تغییر رسانش دیوار تأثیر چندانی بر مکان جبهه شعله ندارد. تأثیر نسبت انحنای لوله به شعاع لوله با در نظر گرفتن دو مقدار ۱ و ۲ بررسی و مشاهده شد که در نسبت انحنای کمتر، به‌علت نقش پیش‌گرم‌کردن جریان ورودی توسط محصولات، مکان جبهه شعله به ورودی نزدیک‌تر و توزیع دما درون محفظه احتراق بهتر خواهد بود. نکته قابل توجه دیگر در هندسه ترکیبی استفاده از سرعت‌های جریان ورودی مختلف است که می‌تواند به‌منظور کنترل مکان جبهه شعله استفاده شود.

## منابع

1. G. Pizza, J. Mantzaras and C. E. Frouzakis, "Flame dynamics in catalytic and non-catalytic mesoscale microreactors," *Catalysis Today*, 155, NO. 1–2, 2010, pp. 123–130.
2. J. Zhou, Y. Wang, W. Yang, J. Liu, Z. Wang and K. Cen, "Combustion of hydrogen–air in catalytic micro-combustors made of different material," *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, NO. 8, 2009, pp. 3535–3545.
3. F. Lucci, C. E. Frouzakis and J. Mantzaras, "Three-dimensional direct numerical simulation of turbulent channel flow catalytic combustion of hydrogen over platinum," *Proceedings of the Combustion Institute*, 34, NO. 2, 2013, pp. 2295–2302.
4. Y. Yan *et al.*, "Numerical simulation of the effect of hydrogen addition fraction on catalytic micro-combustion characteristics of methane-air," *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, NO. 4, 2014, pp. 1864–1873.
5. A. Brambilla, C. E. Frouzakis, J. Mantzaras, A. Tomboulides, S. Kerkemeier and K. Boulouchos, "Detailed transient numerical simulation of H<sub>2</sub>/air hetero-/homogeneous combustion in platinum-coated channels with conjugate heat transfer," *Combustion and Flame*, 161, NO. 10, 2014, pp. 2692–2707.
6. E. Jiaqiang, W. Zuo, X. Liu, Q. Peng, Y. Deng and H. Zhu, "Effects of inlet pressure on wall temperature and exergy efficiency of the micro-cylindrical combustor with a step," *Applied Energy*, 175, 2016, pp. 337–345.
7. M. Chen and J. Buckmaster, "Modelling of combustion and heat transfer in 'Swiss roll' micro-scale combustors," *Combustion Theory and Modelling*, 8, NO. 4, 2004, pp. 701–720.
8. N. I. Kim *et al.*, "Flame stabilization and emission of small Swiss-roll combustors as heaters," *Combustion and Flame*, 141, NO. 3, 2005, pp. 229–240.
9. N. I. Kim *et al.*, "Development and scale effects of small Swiss-roll combustors," *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, NO. 2, 2007, pp. 3243–3250.
10. J. Wan, A. Fan, H. Yao and W. Liu, "Effect of pressure on the blow-off limits of premixed CH<sub>4</sub>/air flames in a mesoscale cavity-combustor," *Energy*, 91, 2015, pp. 102–109.
11. W. Zuo, E. Jiaqiang, H. Liu, Q. Peng, X. Zhao and Z. Zhang, "Numerical investigations on an improved micro-cylindrical combustor with rectangular rib for enhancing heat transfer," *Applied Energy*, 184, 2016, pp. 77–87.
12. J. Wan, A. Fan, K. Maruta, H. Yao and W. Liu, "Experimental and numerical investigation on combustion characteristics of premixed hydrogen/air flame in a micro-combustor with a bluff body," *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, NO. 24, 2012, pp. 19190–19197.
13. Y. Yan *et al.*, "Numerical study on catalytic combustion and extinction characteristics of pre-mixed methane–air in micro flatbed channel under different parameters of operation and wall," *Fuel*, 180, 2016, pp. 659–667.
14. A. Fan, J. Wan, K. Maruta, H. Yao and W. Liu, "Interactions between heat transfer, flow field and flame stabilization in a micro-combustor with a bluff body," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66, 2013, pp. 72–79.
15. L. Zhang, J. Zhu, Y. Yan, H. Guo and Z. Yang, "Numerical investigation on the combustion characteristics of methane / air in a micro-combustor with a hollow hemispherical bluff body," *Energy Conversion and Management*, 94, 2015, pp. 293–299.
16. A. Fan, J. Wan, Y. Liu, B. Pi, H. Yao and W. Liu, "Effect of bluff body shape on the blow-off limit of hydrogen/air flame in a planar micro-combustor," *Applied Thermal Engineering*, 62, NO. 1, 2014, pp. 13–19.
17. G. Bagheri, S. E. Hosseini and M. A. Wahid, "Effects of bluff body shape on the flame stability in premixed micro-

- combustion of hydrogen-air mixture," *Applied Thermal Engineering*, 67, NO. 1-2, 2014, pp. 266-272.
18. M. Hossein, S. Moghaddam, K. Mazaheri and A. Alipoor, "Numerical study of bluff body effect in lean premix hydrogen/air combustion in a micro- scale combustor," *Modares Mechanical Engineering*, 14, NO. 13, 2015, pp. 86-94.
  19. S. K. Chou, W. M. Yang, J. Li and Z. W. Li, "Porous media combustion for micro thermophotovoltaic system applications," *Applied Energy*, 87, NO. 9, 2010, pp. 2862-2867.
  20. J. F. Pan, D. Wu, Y. X. Liu, H. F. Zhang, A. K. Tang and H. Xue, "Hydrogen / oxygen premixed combustion characteristics in micro porous media combustor," *Applied Energy*, 160, 2015, pp. 802-807.
  21. J. Li, Y. Wang, J. Shi and X. Liu, "Dynamic behaviors of premixed hydrogen - air flames in a planar micro-combustor filled with porous medium," *Fuel*, 145, 2015, pp. 70-78.
  22. K. Maruta, J. K. Parc, K. C. Oh, T. Fujimori, S. S. Minaev and R. V. Fursenko, "Characteristics of Microscale Combustion in a Narrow Heated Channel," *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 40, NO. 5, 2004, pp. 516-523.
  23. F. Richecoeur and D. C. Kyritsis, "Experimental study of flame stabilization in low Reynolds and Dean number flows in curved mesoscale ducts," *Proceedings of the Combustion Institute*, 30, NO. 2, 2005, pp. 2419-2427.
  24. M. Baigmohammadi, S. Tabejamaat and J. Zarvandi, "Numerical study of the behavior of methane-hydrogen/air pre-mixed flame in a micro reactor equipped with catalytic segmented bluff body," *Energy*, 85, 2015, pp. 117-144.
  25. J. Zarvandi, S. Tabejamaat and M. Baigmohammadi, "Numerical study of the effects of heat transfer methods on CH<sub>4</sub>/(CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>)-AIR pre-mixed flames in a micro-stepped tube," *Energy*, 44, NO. 1, 2012, pp. 396-409.
  26. M. Baigmohammadi, S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat and J. Zarvandi, "Numerical study of the effects of wire insertion on CH<sub>4</sub>(methane)/AIR pre-mixed flame in a micro combustor," *Energy*, 54, 2013, pp. 271-284.
  27. A. Alipoor and M. H. Saidi, "Numerical study of hydrogen-air combustion characteristics in a novel micro-thermophotovoltaic power generator," *Applied Energy*, 199, 2017, pp. 382-399.
  28. R. A. Yetter, F. L. Dryer and H. Rabitz, "A Comprehensive Reaction Mechanism For Carbon Monoxide/Hydrogen/Oxygen Kinetics," *Combustion Science and Technology*, 79, 1991, pp. 97-128.
  29. "Transport: A Software package for the evaluation of gas-phase, multi component transport properties," CHEMKIN Collection Release 3.6 (TRA-036-1), 2000.
  30. A. Alipoor and K. Mazaheri, "Combustion characteristics and flame bifurcation in repetitive extinction-ignition dynamics for premixed hydrogen-air combustion in a heated micro channel," *Energy*, 109, 2016, pp. 650-663.
  31. A. Alipoor, K. Mazaheri and A. Shamooni, "Asymmetric hydrogen flame in a heated micro-channel : Role of Darrieus e Landau and thermal-diffusive instabilities," *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, NO. 44, 2016, pp. 20407-20417.
  32. A. Alipoor, K. Mazaheri, A. Shamooni Pour, Y. Mahmoudi and A. Shamooni, "Asymmetric hydrogen flame in a heated micro-channel : Role of Darrieus e Landau and thermal-diffusive instabilities," *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, NO. 44, 2016, pp. 1-11.

## English Abstract

# Improvement of combustion characteristics for hydrogen-air mixture using modular structure in a novel micro combustor

Alireza Alipoor<sup>1\*</sup> and Mohammad Hassan Saidi<sup>2</sup>

1. School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran, a.alipoor@shirazu.ac.ir

2. Center of Excellence in Energy Conversion (CEEC), School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, saman@sharif.edu

\*Corresponding author

(Received: 2018.9.26, Received in revised form: 2018.11.01., Accepted: 2018.11.13)

In the present work, the effect of using modular structure on combustion characteristics of the premixed lean hydrogen-air mixture is investigated by utilizing the three-dimensional CFD model, detailed chemistry and transport taking into account heat transfer through the wall combustor. Combustion characteristics are studied for different parameters, namely inlet velocity, wall thermal conductivity and tube curvature for modular structure and are compared with results of simple structure. The results show that using modular structure can significantly move flame front toward inlet section. In modular structure, the role of heat transfer due to secondary fluid increases in comparison with heat transfer in combustor walls. It improves thermal stability in the micro combustor and therefore, the role of wall thermal conductivity and heat transfer in wall combustor will be decreased for modular structure. Using modular structure for lower tube curvature is more effective which it has been shown for tube curvatures of one and two.

**Keywords:** Combustion in micro scale, Modular structure, U-shaped micro combustor, Numerical simulation