

## مطالعه عددی تاثیر بکارگیری لوله U شکل در محفظه احتراق میکرو بر مشخصه‌های احتراق هیدروژن - هوا

محمد حسن سعیدی

استاد- دانشگاه صنعتی شریف - تهران

saman@sharif.edu

علیرضا علی پور

استادیار- دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز

a.alipoor@scu.ac.ir

### چکیده

در پژوهش حاضر، یک محفظه احتراق میکرو جدید برای کاربردهای ترموفوتولتاییک پیشنهاد می‌شود. محفظه احتراق شامل یک لوله U شکل درون یک جعبه می‌باشد. با استفاده از شبیه سازی عددی سه بعدی و با در نظر گرفتن سینتیک جزیی و ضرایب نفوذ جرمی متفاوت برای گونه ها و همچنین در نظر گرفتن معادله انرژی در دیوار، مشخصه‌های احتراق پیش مخلوط هیدروژن - هوا در میکرو محفظه حاضر بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد که ایجاد جریان ثانویه در کانال های منحنی شکل منجر به بهبود فرایند پیش گرم شدن سیال درون میکرو کانال و در نتیجه افزایش حدهای شعله‌وری در مقایسه با کانال‌های مستقیم می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت جریان ورودی تا ۱۶ m/s، جبهه شعله به پایین دست جریان منتقل می‌شود که به واسطه پیش گرمایش بیشتر جریان ورودی، مقدار بیشینه دما برای جریان بدست می‌آید. ضریب انتقال حرارت رسانشی  $W/m.K$  ۳ باعث ایجاد شرایط حرارتی مناسب تر برای پایداری شعله می‌شود. همچنین نشان داد می‌شود که سیال ثانویه با ضریب نفوذ حرارتی بالاتر مشخصه‌های احتراقی در میکرو محفظه را بهبود می‌بخشد.

کلمات کلیدی: احتراق در مقیاس میکرو، شبیه سازی عددی، سیستم‌های ترموفوتولتاییک، محفظه احتراقی میکرو منحنی شکل.

### مقدمه

با پیشرفت‌های اخیر در زمینه تکنولوژی‌های ساخت، تلاش های بسیاری در جهت طراحی و ساخت وسایل در مقیاس های کوچک متمرکز شده است. این وسایل نیازمند یک منبع تامین فشرده، قابل اطمینان و با عمر طولانی هستند [۱]. با توجه به دانسیته انرژی بالا در سوخت های هیدروکربنی و هیدروژن در مقایسه با منابع متداول امروزی نظیر باتری های یون - لیتیوم (بیش از ۲۰ تا ۵۰ برابر [۲])، استفاده از انرژی آزاد شده از احتراق این نوع سوخت ها در آینده ای نزدیک انتظار می رود [۳]. به منظور استحصال انرژی حاصل از فرایند احتراق سوخت‌های هیدروکربنی و هیدروژن، سیستم ها ترموفوتولتاییک (TPV) پیشنهاد می‌شود. زیرا این نوع از سیستم ها ساده، پر بازده، بدون اجزا متحرک و قابل تطبیق در اندازه های مختلف می باشد. یک سیستم TPV متداول از سه بخش اصلی، منبع سوخت، انتشار دهنده و سلول های فوتولتاییک تشکیل شده است [۴]. کارهای متعددی بر روی توسعه سیستم های TPV براساس محفظه احتراق میکرو به عنوان انتشار دهنده انجام شده است. دوریش و همکاران [۵]، یک سیستم کوچک TPV برای شعله ی بوتان را به عنوان یک انتشار دهنده گزارش کردند. یانگ و همکاران [۶]، یک نمونه اولیه از میکرو TPV را برای احتراق هیدروژن - هوا تولید کردند که قادر به تامین توان الکتریکی خروجی ۰/۹۲ وات در سیستمی به حجم ۰/۱۱۳ سانتیمتر مکعب را داشت.

از آنجایی که محفظه احتراق میکرو یک بخش اساسی در سیستم های TPV می باشد تولید بیشترین توان خروجی در طراحی آنها به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود که این موضوع با ایجاد دمای یکنواخت و بالا

در امتداد سطح خرجی محفظه احتراق قابل دستیابی می باشد. برای توسعه یک محفظه احتراق میکرو با مشخصات اشاره شده، نیاز است مشکلاتی که به واسطه کاهش ابعاد محفظه احتراق ایجاد می شود به درستی شناخته و بررسی شود. از آنجائیکه نسبت سطح به حجم در محفظه های احتراق میکرو بسیار بزرگ می باشد، نرخ آزادسازی گرما از دیواره های خارجی بسیار زیاد است و از این رو مدیریت حرارتی برای ایجاد احتراق پایدار نیاز است. روشهای مختلفی برای افزایش پایداری احتراق و مدیریت حرارتی در محفظه های احتراقی میکرو ارائه شده است. استفاده از پوشش کاتالیزور در سطح داخلی محفظه و استفاده از مفهوم آنتالپی اضافه دو رویکرد اصلی در مواجه با این مشکل می باشد. در رویکرد اول، پیزا و همکاران [۷]، به بررسی تاثیر سرعت ورودی جریان و شدت کاتالیزور ها بر دینامیک های شعله هیدروژن - هوا در یک میکرو کانال با عرض ۲ میلیمتر پرداختند. ایشان نشان دادند که دینامیک های شعله مختلف می تواند با استفاده مناسب کاتالیزور از بین برود. ژو و همکاران [۸]، عملکرد کاتالیزور های مختلف بر مشخصه های احتراقی بررسی کردند.

براساس مفهوم آنتالپی اضافه، هندسه های مختلفی برای محفظه احتراق، توسط محققین ارائه شده است. یانگ و همکاران [۹]، تاثیر استفاده از پله را در میکرو محفظه احتراق برای احتراق هیدروژن - هوا بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که استفاده از پله می تواند به گسترش حد شعله‌وری احتراق منجر شود. چن و بوکمستر [۱۰]، یک مدل عددی دو بعدی برای شبیه سازی احتراق در محفظه های احتراق حلزونی ارائه دادند. ایشان تاثیر عدد رینولدز، نسبت هم ارزی، رسانش دیواره ها و ضریب گسیلمندی را بر روی حد شعله‌وری بررسی نمودند. کیم و همکاران [۱۱]، مشخصه های احتراق پروپان - هوا را محفظه های حلزونی مختلف بررسی کردند و به گستردگی حدهای شعله‌وری در این نوع از محفظه ها اشاره کردند. کو و رونی [۱۲]، محفظه‌های احتراقی چرخشی جریان مخالف را با در نظر گرفتن واکنش شیمیایی یک مرحله‌ای برای سوخت پروپان - هوا و در نظر گرفتن رسانش حرارتی در دیوار شبیه‌سازی نمود. استفاده از مفهوم آنتالپی اضافه در هندسه‌های مختلفی به کار گرفته شد. استفاده از جسم مانع [۱۳]، حضور حفره در محفظه احتراقی [۱۴]، استفاده از محیط متخلخل [۱۵]، نمونه‌هایی از بکارگیری این مفهوم می باشد.

با توجه به مطالعات انجام شده، در طراحی یک محفظه احتراق میکرو با بیشترین گرمای خروجی از جداره‌های آن، چند ویژگی در طراحی آن بایستی در نظر گرفته شود. حد های شعله‌وری گسترده، توزیع دمای یکنواخت در سطح خارجی محفظه احتراق، ساخت آسان و بکارگیری آن به صورت ماژولار میتواند از ویژگی های مطلوب در طراحی میکرو محفظه احتراق باشد. یکی از هندسه های مطلوب، بکارگیری لوله های منحنی شکل نظیر لوله های U شکل می باشد. ایجاد جریان ثانویه و در نتیجه ایجاد گردابه‌های حرارتی در لوله‌های منحنی شکل می‌تواند باعث افزایش محدوده شعله‌وری احتراق در مقایسه با لوله های مستقیم شود. بنابراین در کار حاضر، یک میکرو محفظه احتراق با در نظر گرفتن ویژگی های بیان شده به منظور استفاده در سیستم‌های TPV پیشنهاد می‌شود. هندسه

Dij ضریب نفوذ مولکولی دوتایی گونه i در گونه j نامیده می شود و برای محاسبه آن از رابطه چپمن-انسگگ که به صورت زیر بیان می شود، استفاده می شود [۱۷].

$$D_{ij} = 10.1325 \frac{0.001858 T^{1.5} (W_{ij})^{-0.5}}{p \sigma_{ij}^2 \Omega_D}$$

$$\sigma_{ij} = \frac{\sigma_i + \sigma_j}{2}$$

$$W_{ij} = \left( \frac{1}{W_i} + \frac{1}{W_j} \right)^{-1}$$

$$\Omega_D = \frac{1.06036}{T_N^{0.15610}} + \frac{0.193}{\exp(0.47635 T_N)} + \frac{1.03587}{\exp(1.52996 T_N)} + \frac{1.76474}{\exp(3.89411 T_N)}$$

$$T_N = \frac{T}{E_{ij}}$$

$$E_{ij} = \varepsilon_{ij} / k_B$$

$$\varepsilon_{ij} = (\sqrt{\varepsilon_i \varepsilon_j}) \quad (8)$$

در این روابط،  $W_i$  وزن مولکولی گونه نام،  $\sigma_i$  قطر برخورد گونه نام،  $k_B$  ثابت بولتزمن و  $\varepsilon_{\alpha}$  مشخصه انرژی لنارد - جونز می باشد [۱۸].

### مشخصات محفظه احتراق و مباحث عددی

طرحواره محفظه احتراق شبیه سازی شده به همراه شبکه بندی مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است. محفظه احتراق شامل یک میکرو کانال U شکل درون یک جعبه می باشد. میکرو کانال U شکل مزیت های فراوانی دارد که می توان به وجود جریان های ثانویه اشاره نمود که منجر به افزایش حدهای شعله وری می شود همچنین با توجه به هندسه میکرو کانال U شکل حرارت تولیدی در بخش بعد از ناحیه احتراق می توان به پیش گرم شدن جریان ورودی کمک می کند. دامنه محاسباتی را به سه بخش می توان تقسیم نمود که شامل جریان واکنشی از مخلوط سوخت - هوا در محفظه احتراق میکرو U شکل، انتقال حرارت درون دیواره جامد محفظه احتراق U شکل و جریان ثانویه که فضای درون جعبه را شامل می شود. به منظور بررسی پارامترها، نتایج بر روی سه خط استخراج شده است که در شکل ۱ به رنگ قرمز نشان داده شده است. در بخش مستقیم کانال، نتایج در مختصات کارتیزین و در بخش منحنی کانال، نتایج در مختصات استوانه ای استخراج شده است.

مخلوط هیدروژن-هوا با دمای ۳۰۰ کلوین و توزیع سرعت یکنواخت از یک سمت وارد کانال می شود. شرط عدم لغزش برای سرعت  $(u=0)$  و مقدار گرادیان صفر برای گونه ها  $(\frac{du}{dn} = 0)$  بر روی دیوار تنظیم می شود. 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 می شود. برای توصیف شیمی فاز گازی از مکانیزم ۹ گونه ای و ۲۷ واکنشی یترو همکاران [۱۹] استفاده شده است.

### نتایج و بحث

#### بررسی تاثیر سرعت جریان ورودی بر مشخصه های احتراقی

تاثیر سرعت جریان ورودی بر توزیع دما درون میکرو محفظه در شکل ۲ نشان داده شده است. برای این بررسی لوله U شکل با قطر ۱ میلی متر و ضخامت دیوار ۰/۲۵ میلی متر و ضریب رسانش دیوار ۵ W/m.K در نظر گرفته شده است. شرایط اتلاف حرارت خروجی از محفظه شامل انتقال

پیشنهادی شامل یک میکرو لوله U شکل درون یک جعبه می باشد که از ویژگی های آن می توان به ایجاد گردابه های گرمایی در لوله U شکل و پیش گرم شدن بهتر جریان واکنش دهنده به علت هندسه لوله U شکل و ایجاد جریان جابجایی آزاد درون جعبه به منظور بهبود پیش گرمایش محفظه اشاره کرد. در کار حاضر، مشخصه های احتراق برای مخلوط پیش آمیخته رقیق هیدروژن- هوا در هندسه بیان شده به صورت عددی با در نظر گرفتن سینتیک شیمیایی و مکانیزم انتقال مولکولی با در نظر گرفتن معادله انرژی در دیوار بررسی می شود. تاثیر پارامترهای سرعت جریان ورودی، انحنای محفظه احتراق U شکل، شعاع میکرو لوله و ضریب انتقال گرمای رساتشی در دیوار و شرایط اتلاف حرارت خارجی بر مشخصه های احتراق بررسی می شود.

### معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و گونه ها می باشد که به همراه معادله حالت گاز ایده آل برای سیال حل می شود (معادلات ۱ - ۵). همچنین معادله انرژی برای جامد (معادله ۶) در نظر گرفته می شود. معادله پیوستگی:

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

معادله مومنتوم:

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

در این روابط  $\mu$ ،  $\lambda$  به ترتیب دانسیته، بردار سرعت و ویسکوزیته دینامیکی می باشند. معادله انرژی در سیال:

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

در این رابطه  $\lambda$  ضریب هدایت حرارتی مخلوط و  $h$  انتالپی می باشند. معادله بقای گونه:

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

$\dot{w}_i$  و  $Y_i$  به ترتیب نرخ تولید و اضمحلال و کسر جرمی گونه  $i$  ام می باشد. دانسیته نیز با استفاده از معادله حالت به شرح زیر بدست می آید:

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

در این رابطه  $W$  وزن مولکولی میانگین مخلوط و  $R$  ثابت گاز می باشد. معادله انرژی در جامد:

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

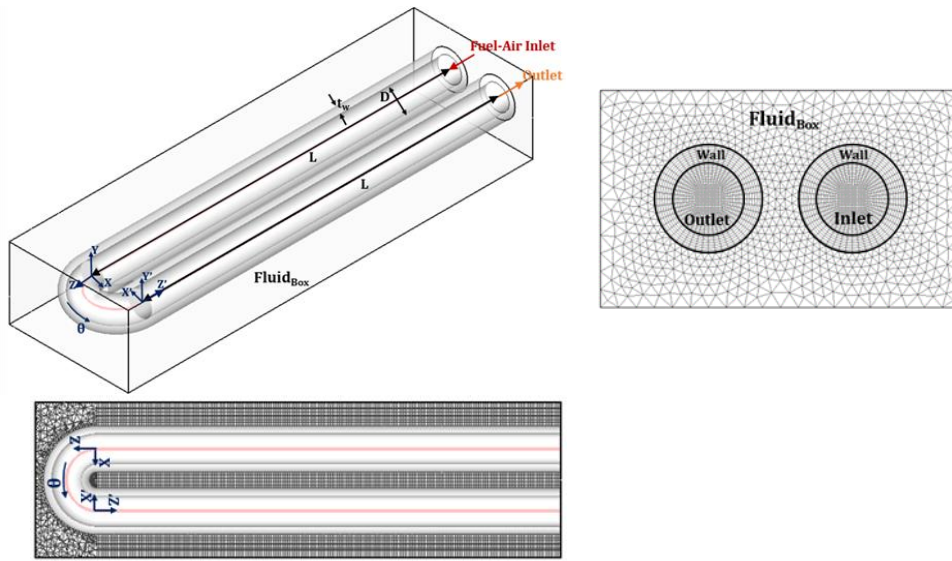
$\lambda_s$  نفوذ حرارتی در جامد می باشد.

$D_{mi}$  ضریب نفوذ مولکولی گونه ها می باشد. برای محاسبه ضریب نفوذ جرمی گونه  $i$  در مخلوط از رابطه زیر استفاده می شود [۱۶].

$$D_{km} = \frac{1 - x_k}{\sum_{j \neq k} \left( \frac{x_j}{D_{ij}} \right)} \quad (7)$$

با استفاده از یک ناحیه دما بالای اولیه واکنش ها آغاز و ناحیه احتراقی شکل

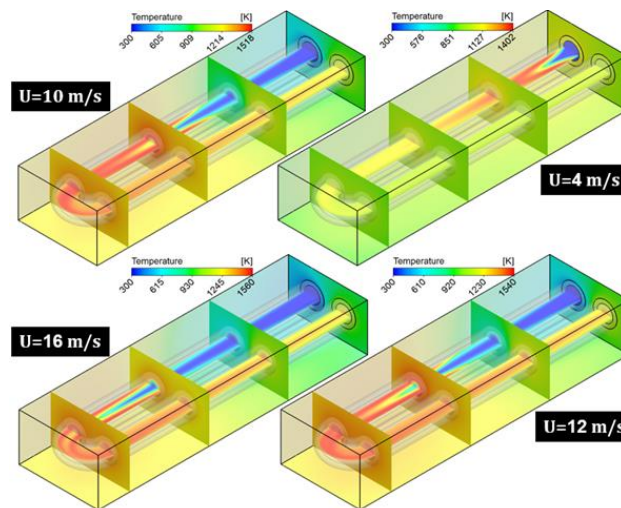
حرارت جابجایی با ضریب  $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  و ضریب تشعشعی  $0.1$  می باشد. مخلوط رقیق هیدروژن - هوا (نسبت هم ارزی =  $0.5$ ) وارد کانال می شود



شکل ۱- هندسه میکرو محفظه U شکل به همراه شبکه محاسباتی

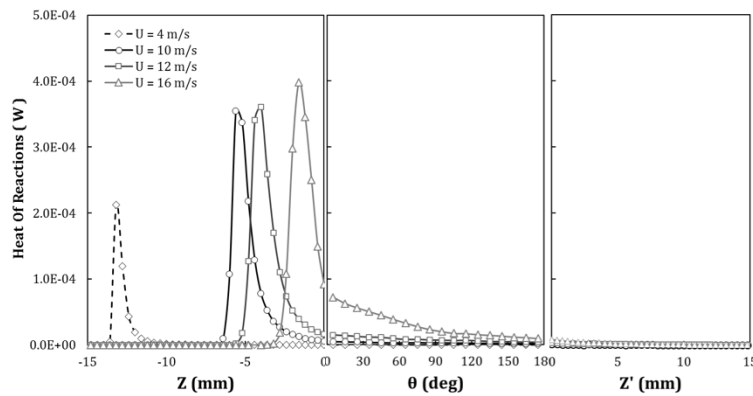
جریان ورودی مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل مکان شعله برای سرعت های جریان ورودی  $0.4, 1.0, 1.2$  و  $1.6 \text{ m/s}$  به ترتیب در فاصله های  $0.1/8, 0.9/4, 1.1$  و  $1.3/4$  میلیمتر از ابتدای محفظه تشکیل شده است. علت این رفتار ناشی از تقابل سرعت جریان و سرعت سوزش شعله می باشد. بطوری که در سرعت های پایین به علت تعادل بین سرعت جریان ورودی و سرعت سوزش شعله، شعله در نزدیکی ورودی محفظه احتراق تشکیل می شود، اما با افزایش سرعت جریان ورودی به علت کاهش مقیاس زمانی جابجایی شعله به سمت پایین دست جریان حرکت می کند و به منظور ایجاد پایداری شعله نیاز است که مقدار سرعت سوزش شعله افزایش یابد. با توجه به اینکه سرعت سوزش شعله تابعی از دمای جریان ورودی و نسبت هم ارزی است، نیاز است که یکی از این دو پارامتر افزایش یابد. از آنجایی که مقدار نسبت هم ارزی ثابت در نظر گرفته می شود. اما با انتقال جبهه شعله به پایین دست جریان و با توجه به اینکه دمای محیط طرف لوله بالاتر از دمای مخلوط ورودی می باشد، پیش گرم شدن جریان ورودی اتفاق می افتد

می گیرد. حرارت تولید توسط احتراق باعث پیش گرم شدن جریان ورودی و گرم شده سیال ثانویه می شود از این رو ناحیه دما بالا در اطراف لوله U شکل دیده می شود. این ناحیه دما نیز به پیش گرم شدن جریان ورودی نقش بسزایی دارد و باعث پایداری بهتر احتراق می شود. از سوی دیگر به علت ساختار هندسی U شکل، گرمای تولیدی در بخش محصولات از طریق سیال ثانویه به بخش مخلوط سرد ورودی منتقل می شود که این نیز باعث پایداری بهتر احتراق می شود. با مقایسه هندسه موجود با کانال مستقیم مشاهده گردید که در کانال های مستقیم تنها تا سرعت  $4 \text{ m/s}$  امکان پایداری شعله در شرایط حرارتی مشابه وجود دارد درحالی که برای هندسه حاضر تا سرعت  $16 \text{ m/s}$  احتراق پایدار مشاهده گردید. با توجه به کانتورهای دما مشاهده می شود که با افزایش سرعت جریان ورودی جبهه شعله به پایین دست جریان منتقل می شود. برای کمی نمودن مکان شعله از متغیر گرمای واکنش استفاده شده است و مکان بیشینه شعله به عنوان مکان شعله در نظر گرفته می شود. در شکل ۳ رفتار متغیر گرمای واکنش برای سرعت های

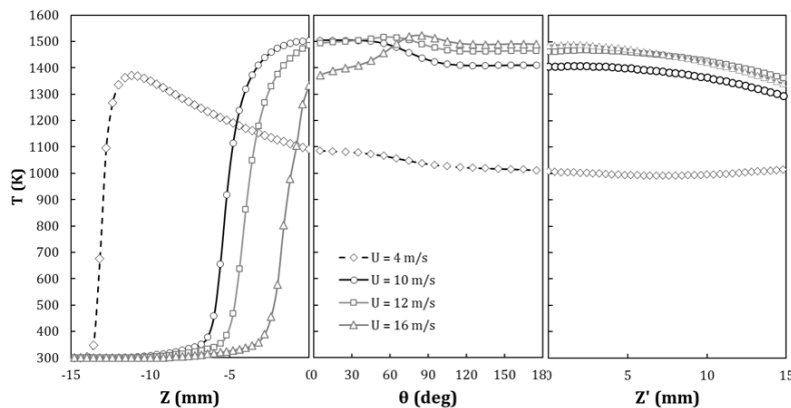


شکل ۲- تاثیر سرعت جریان ورودی بر توزیع دما درون میکرو محفظه

هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶  
تهران، دانشگاه صنعتی شریف



شکل ۳- متغیر گرمای واکنش برای سرعت های جریان ورودی مختلف



شکل ۴- تغییرات دما برای سرعت های جریان ورودی مختلف

جریان ثانویه، دمای جریان ثانویه همچنان بالا باقی می ماند و باعث گرم شدن جریان واکنشی می شود. اگرچه این دما نمی تواند دمای خوداشتعالی جریان واکنشی را تامین کند و با گذشت زمان به واسطه اتلاف حرارت، دمای جریان ثانویه نیز کاهش می یابد.

به منظور بررسی بهتر رفتار شعله، نمودار دما بر روی خط مرکزی لوله در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده می شود که تغییر رسانش دیوار تا مقدار معینی تاثیری بر روی مقدار بیشینه دمای جریان ندارد و تنها باعث تغییر در مکان تشکیل جبهه شعله می شود. البته همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود، در ضریب رسانش دیوار  $W/m.K$  ۱۰ دمای جریان کاهش یافته در انتهای مسیر و تحت تاثیر دمای جریان ثانویه، دمای جریان درون لوله  $U$  شکل نیز افزایش می یابد.

نکته قابل توجه این است که در ضریب رسانش  $W/m.K$  ۳ شعله در فاصله نزدیک تری از ورودی تشکیل شده است و بطوریکه با استفاده از نمودار نرخ گرمای واکنش مشاهده می شود که شعله برای ضرایب رسانش  $W/m.K$  ۱،  $W/m.K$  ۳ و  $W/m.K$  ۵ به ترتیب در فاصله های  $8/7$ ،  $6/8$  و  $4/9$  میلی متر از ورودی لوله تشکیل می شود. علت این رفتار به نقش اساسی ضریب انتقال حرارت رسانشی مرتبط می باشد 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 گردد.

#### بررسی تاثیر شرایط اتلاف حرارت از محفظه احتراق

در شکل ۷ شرایط مختلف اتلاف حرارت از محفظه با استفاده از کانتور های دما نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می شود که افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب گسیلمندی تاثیر بسزایی بر

آن که منجر به افزایش دمای جریان ورودی به جبهه شعله و در نتیجه افزایش سرعت سوزش شعله می شود. در نتیجه پایداری شعله در مسافت دورتری از ابتدای کانال اتفاق می افتد. همچنین مشاهده می شود که پیش گرم شدن جبهه شعله باعث افزایش دمای بیشینه جبهه شعله می شود به طوری که مقدار بیشینه دما برای سرعت های ۴، ۱۰، ۱۲ و  $16 m/s$  به ترتیب برابر با  $1402$ ،  $1518$ ،  $1540$  و  $1560$  کلوین می باشد. که در سرعت های بالاتر جریان مسافت بیشتری تحت تاثیر پیش گرم شدن از طریق دیواره قرار خواهد داشت. این موضوع در شکل ۴ به خوبی نشان داده شده است

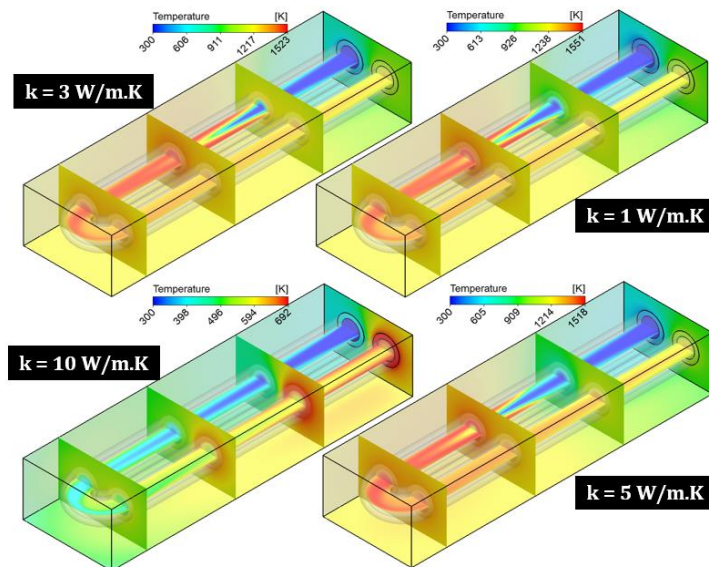
با توجه به شکل ۴ مشاهده می شود که در سرعت های پایین به علت تشکیل شعله در نزدیکی ورودی، ناحیه دما پایین کمتری در کانال مشاهده می شود و از این رو توزیع یکنواخت تری از دما درون محفظه مشاهده می شود اما از سوی دیگر با توجه به بیشتر بودن سطح در دسترس برای اتلاف حرارت، در نتیجه یک قله در نمودار دما برای سرعت ۴ مشاهده می شود و بعد از آن دما کاهش می یابد.

#### بررسی تاثیر رسانش دیوار میکرو کانال $U$ شکل بر مشخصه های احتراقی

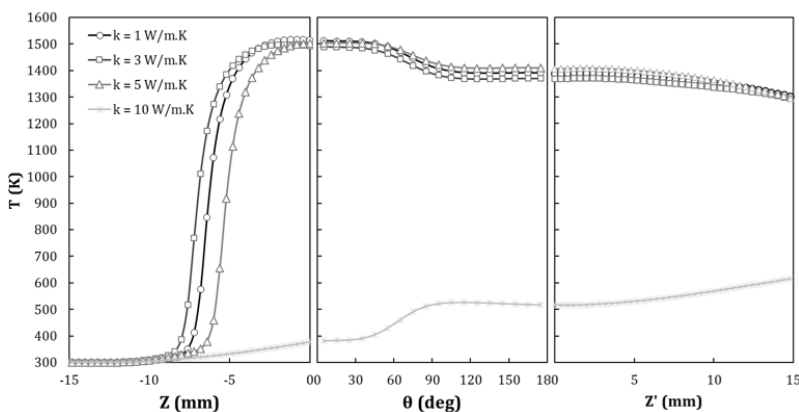
در شکل ۵ کانتورهای دما برای ضرایب رسانش حرارتی متفاوت برای لوله با قطر ۱ میلی متر و ضخامت دیوار  $0.25$  میلی متر نشان داده شده است. با توجه به کانتورهای دما مشاهده می شود که افزایش ضریب رسانش حرارتی منجر به خاموشی شعله می شود بطوری که در ضریب رسانش  $W/m.K$  ۱۰ برای دیوار لوله، خاموشی شعله اتفاق می افتد. اما نکته قابل توجه این است که علیرغم اینکه دمای جریان درون لوله کاهش یافته است، اما به علت اختلاف در مقیاس های زمانی انتقال حرارت در جریان واکنشی، دیوار و

منحنی منتقل می شود. این انتقال جبهه شعله به پایین دست در شکل ۸ به خوبی نشان داده شده است. بطوری که مکان جبهه شعله برای ضرایب انتقال حرارت جابجایی ۵، ۱۰ و ۲۰ W/m<sup>2</sup>.K به ترتیب ۹/۴، ۱۱، ۱۲/۶ میلیمتر می باشد. با انتقال جبهه شعله تاثیر پیش گرم شدن مخلوط ورودی با استفاده از دمای محصولات نیز کاهش می یابد.

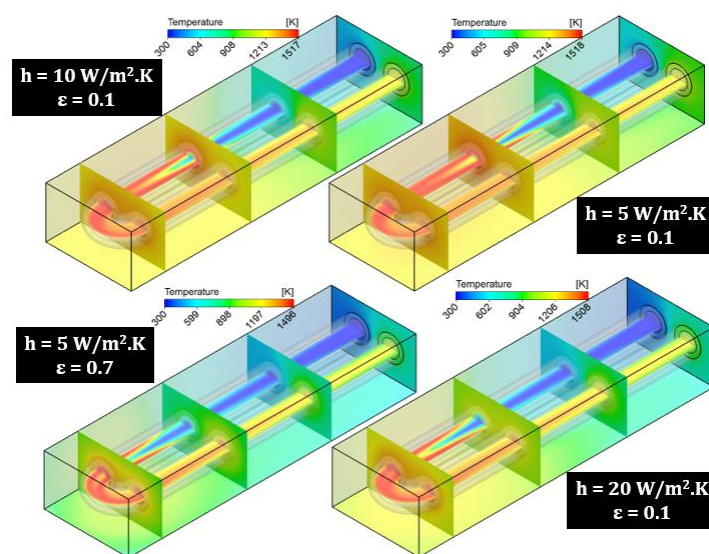
روی توزیع حرارت در محفظه خواهد داشت بطوریکه برای ضریب گسیلمندی ۰/۷ دما در محفظه احتراق کاهش یافته و مکان جبهه شعله به سمت



شکل ۵- کانتورهای دما برای ضرایب رسانش حرارتی متفاوت

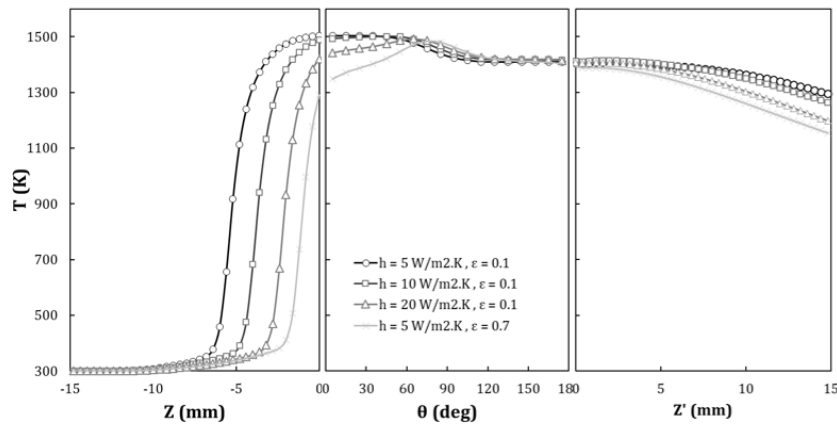


شکل ۶- تغییرات دما بر روی خط مرکزی لوله برای ضرایب رسانش حرارتی متفاوت



شکل ۷- کانتورهای دما برای شرایط مختلف اتلاف حرارت از محفظه

هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران، ۲۴ و ۲۵ بهمن ماه ۱۳۹۶  
تهران، دانشگاه صنعتی شریف



شکل ۸- تغییرات دما در امتداد محور محفظه احترا برای شرایط مختلف اتلاف حرارت از محفظه

**بررسی انحنای لوله**

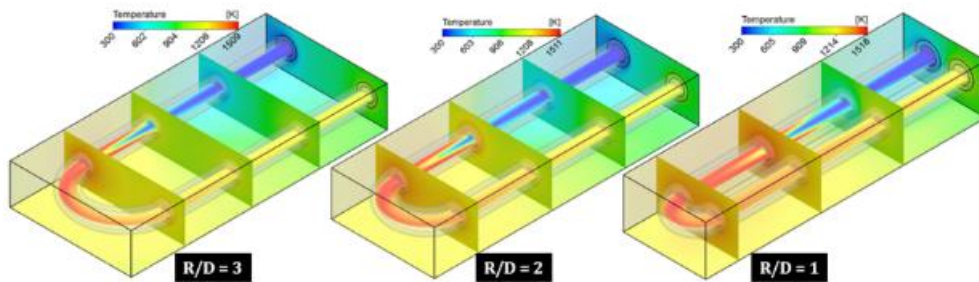
در شکل ۹ تاثیر انحنای لوله بر توزیع دما درون محفظه احتراق نشان داده شده است. در این بررسی سه نسبت انحنای شعاع لوله در نظر گرفته شده است که با ثابت در نظر گرفتن قطر لوله، شعاع انحنای تغییر کرده است. با توجه به کانتورهای دما مشاهده می شود که با افزایش انحنای لوله، حجم مورد نیاز برای سیال ثانویه نیز افزایش می یابد از این رو مساحت بیشتری برای اتلاف حرارت نسبت به میزان حرارت تولیدی در دسترس می باشد که منجر به کاهش بیشتر دما و ایجاد مناطق با دمای پایین می شود. از سوی دیگر با فاصله گرفتن دو شاخه لوله U شکل نقش پیش گرم نمودن مخلوط ورودی توسط محصولات نیز کاهش می یابد.

برای بیان کمی این موضوع در شکل ۱۰ توزیع دما بر روی محور مرکزی محفظه نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می شود که افزایش انحنای لوله، شعاع در مکان پایین تری تشکیل می شود که این ناشی از کاهش اثر پیش گرم شدن جریان می باشد. همچنین مشاهده می شود که

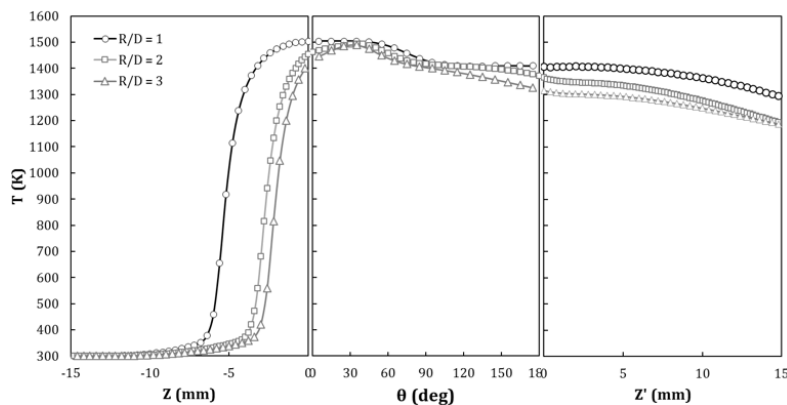
دمای انحنای کوچکتر تا پایان لوله همچنان بالا باقی می ماند. در حالیکه در نسبت انحنای ۲ و ۳ مقدار دما کاهش می یابد.

**بررسی نوع سیال ثانویه**

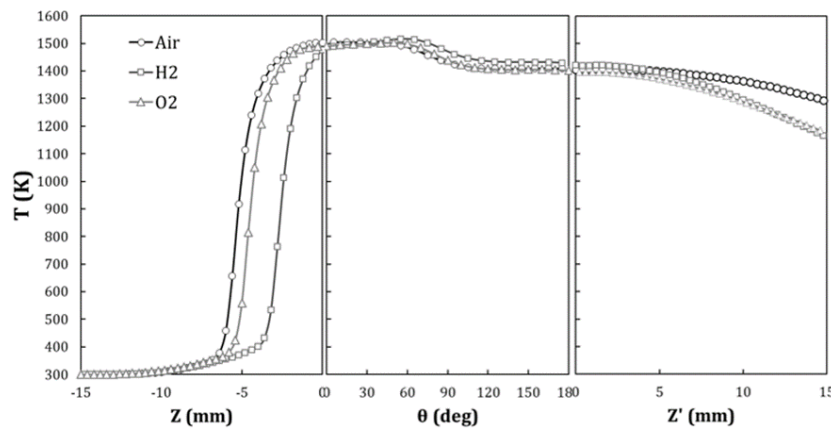
تاثیر نوع سیال ثانویه بر مشخصه های احتراق لوله U شکل بررسی شده است. در شکل ۱۱ توزیع دما بر روی خط محوری برای سه ماده هوا، اکسیژن و هیدروژن به عنوان سیال ثانویه نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است مکان شعله برای سیال هوا و اکسیژن نسبت به هیدروژن به ورودی کانال نزدیک تر می باشد. دلیل این اتفاق می تواند ناشی از بالاتر بودن ضریب نفوذ حرارتی هوا و اکسیژن ( $22.6 \times 10^{-6}$  در دمای ۳۰۰ کلوین) نسبت به هیدروژن ( $16 \times 10^{-6}$ ) باشد در این حالت نفوذ حرارتی بیشتر برای سیال هوا و اکسیژن باعث می شود. نقش پیش گرم شدن سیال افزایش یابد که منجر به افزایش دمای ورودی به جبهه شعله و افزایش سرعت سوزش شعله می گردد که این منجر به حرکت جبهه شعله به بالادست جریان می شود.



شکل ۹- کانتورهای دما برای نسبت انحنای لوله مختلف



شکل ۱۰- توزیع دما بر روی محور محفظه برای نسبت انحنای لوله مختلف



شکل ۱۱- توزیع دما بر روی خط محوری برای سه ماده هوا، اکسیژن و هیدروژن به عنوان سیال ثانویه

**نتیجه گیری و جمع بندی**

در پژوهش حاضر، یک محفظه احتراق میکرو برای وسایل ترموفوتولتاییک پیشنهاد گردید. میکرو محفظه پیشنهادی شامل یک لوله U شکل درون یک جعبه می باشد. با استفاده از شبیه سازی عددی سه بعدی، مشخصه های احتراق پیش مخلوط هیدروژن - هوا در میکرو محفظه حاضر بررسی گردید. نتایج نشان می دهد که ایجاد جریان ثانویه در کانال های منحنی شکل منجر به بهبود فرایند پیش گرم شدن سیال درون میکرو کانال و در نتیجه افزایش حدهای شعله وری در مقایسه با کانال های مستقیم می شود. در هندسه حاضر از سیال ثانویه در محفظه احتراق استفاده شده که منجر به بهبود تعادل حرارتی در محفظه احتراق میکرو می شود.

با توجه به شبیه سازی های انجام شده می توان نتایج زیر را جمع بندی نمود:

- با افزایش سرعت جریان ورودی تا ۱۶ m/s با عث می شود که جبهه شعله به پایین دست جریان منتقل شود و به واسطه پیش گرمایش بیشتر جریان ورودی، مقدار بیشینه دما برای جریان بدست آید.
- برای سرعت جریان ورودی ۴ m/s، بیشترین بازده برای میکرو محفظه پیشنهاد شده بدست آمد.
- با استفاده از نتایج بدست آمده مشاهده می شود که رسانش حرارتی نقش اساسی در مشخصه های احتراقی دارد. همچنین نشان داده شود که مقدار ۳ W/m.K برای رسانش دیوار مقدار بهینه برای دیوار بدست آمد که منجر به ایجاد تعادل حرارتی بهتر بین پارامترهای حرارتی در محفظه احتراق می شود.
- افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی از ۵ تا ۲۰ W/m2.K و ضریب گسیلمندی از ۰/۱ تا ۰/۷ باعث اتلاف حرارت بیشتر از دیواره های خارجی می شود که در نتیجه دمای جبهه شعله کاهش می یابد.
- تاثیر بکارگیری انواع سیال ثانویه بر روی مشخصه های احتراقی بررسی گردید. براساس نتایج نشان داده شد که سیالات با نفوذ حرارتی بالاتر باعث بهبود مشخصه های احتراقی می شوند.

**مراجع**

Fursenko R, Tsuboi Y, et al. "Bifurcations and negative propagation speeds of methane/air premixed flames with repetitive extinction and ignition in a heated microchannel". *Combust Flame* 159:1631–43 (2012).

[4] Akhtar S, Kurnia JC, Shamim T. "A three-dimensional computational model of H2–air premixed combustion in non-circular micro-channels for a thermophotovoltaic (TPV) application". *Appl Energy* 152:47–57 (2015).

[5] Durisch W, Bitnar B, Mayor JC, von Roth F, Sigg H, Tschudi HR, et al. "Small self-powered grid-connected thermophotovoltaic prototype system". *Appl Energy* 74:149–57 (2003).

[6] Yang WM, Chou SK, Shu C, Xue H, Li ZW. "Development of a prototype micro-thermophotovoltaic power generator". *J Phys D Appl Phys* 37:1017–20 (2004).

[7] Pizza G, Mantzaras J, Frouzakis CE. "Flame dynamics in catalytic and non-catalytic mesoscale microreactors". *Catal Today* 155:123–30 (2010).

[8] Zhou J, Wang Y, Yang W, Liu J, Wang Z, Cen K. "Combustion of hydrogen–air in catalytic micro-combustors made of different material". *Int J Hydrogen Energy* 34:3535–45 (2009).

[9] Yang W., Chou S., Shu C, Li Z., Xue H. "Combustion in micro-cylindrical combustors with and without a backward facing step". *Appl Therm Eng* 22:1777–87 (2002).

[10] Chen M, Buckmaster J. "Modelling of combustion and heat transfer in "Swiss roll" micro-scale combustors". *Combust Theory Model* 8:701–20 (2004).

[11] Kim NI, Kato S, Kataoka T, Yokomori T, Maruyama S, Fujimori T, et al. "Flame stabilization and emission of small Swiss-roll combustors as heaters". *Combust Flame* 141:229–40 (2005).

[12] Kuo CH, Ronney PD. "Numerical modeling of non-adiabatic heat-recirculating combustors". *Proc Combust Inst* 31:3277–84 (2007).

[13] Hossein M, Moghaddam S, Mazaheri K, Alipoor A. "Numerical study of bluff body effect in lean premix hydrogen/air combustion in a micro- scale combustor". *Modares Mech Eng* 14:86–94 (2015).

[14] Wan J, Fan A, Yao H, Liu W. "Flame-anchoring mechanisms of a micro cavity-combustor for premixed H2/air flame". *Chem Eng J* 275:17–26 (2015).

[15] Pan JF, Wu D, Liu YX, Zhang HF, Tang AK, Xue H. "Hydrogen / oxygen premixed combustion characteristics in micro porous media combustor". *Appl Energy* 160:802–7 (2015).

[16] Novaresio V, García-Camprubí M, Izquierdo S, Asinari P, Fueyo N. "An open-source library for the

[1] Ju Y, Maruta K. "Microscale combustion: Technology development and fundamental research". *Prog Energy Combust Sci* 37:669–715 (2011).

[2] Kaisare NS, Vlachos DG. "A review on microcombustion: Fundamentals, devices and applications". *Prog Energy Combust Sci* 38:321–59 (2012).

[3] Nakamura H, Fan A, Minaev S, Sereshchenko E,

- [18] Transport: A Software package for the evaluation of gas-phase, multi component transport properties.
- [19] Yetter RA, Dryer FL, Rabitz H. "A Comprehensive Reaction Mechanism For Carbon Monoxide/Hydrogen/Oxygen Kinetics". *Combust Sci Technol* 79:97–128 (1991).
- numerical modeling of mass-transfer in solid oxide fuel cells". *Comput Phys Commun* 183:125–46 (2012).
- [17] Turns SR. *An Introduction to Combustion (Concepts and Applications)*. Second Edi. McGraw-Hill; .