

## مطالعه عددی به کارگیری استفاده از ساختار ماژولار در میکرومحفظه U شکل بر مشخصه‌های احتراقی مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا به منظور استفاده در یک سیستم میکروتروموفتوولتاییک

حامد محمدی<sup>۱</sup>، علیرضا علی‌پور<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، hamed.mohammadi@hafez.shirazu.ac.ir

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

\* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۲)

**چکیده:** یکی از روش‌های مؤثر در افزایش حد شعله‌وری در میکرومحفظه‌های احتراقی استفاده از ساختار ماژولار و به کارگیری آن برای ایجاد توان‌های مختلف است. در پژوهش حاضر از هندسه‌های مختلفی مانند تک لوله مستقیم، تک لوله U شکل و ساختار ماژولار دو لوله‌ای U شکل استفاده می‌شود. در این پژوهش، اثر تغییر سرعت جریان ورودی، نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش حرارتی بر مشخصه‌های احتراقی مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از تک لوله U شکل و ساختار ماژولار لوله‌های دوتایی U شکل، حد شعله‌وری به‌ازای سرعت‌های ورودی، به ترتیب افزایشی ۲۷٪ و ۵۴٪ را نسبت به تک لوله مستقیم تجربه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از ساختار ماژولار باعث کاهش کشیدگی شعله و فاصله جبهه شعله نسبت به ورودی می‌شود که این پدیده باعث بهبود پایداری شعله می‌شود. مقایسه هندسه‌های مختلف نشان می‌دهد، بازده حرارتی کل تک لوله U شکل، بیشتر از سایر حالت‌ها است و کمترین بازده حرارتی کل نیز مربوط به تک لوله مستقیم است. همچنین نتایج نشان می‌دهد، برای محفظه‌های احتراق شامل تک لوله مستقیم، تک لوله U شکل و دو لوله U شکل بیشترین بازده حرارتی کل در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ رخ داده است و با افزایش آن، بازده حرارتی کل کاهش می‌یابد. بررسی اثر ضریب رسانش حرارتی نشان می‌دهد، افزایش این ضریب باعث افزایش بازده حرارتی کل در تمامی هندسه‌ها می‌شود به نحوی که بیشترین بازده مربوط به استفاده از استیل با ضریب رسانش حرارتی  $12/36 \text{ W/m.K}$  است.

**کلیدواژه‌گان:** هیدروژن، حد شعله‌وری، بازده تشعشعی، میکروتروموفتوولتاییک

### مقدمه

یکی از کاربردهای فرایند احتراق که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته، استفاده از احتراق در ابعاد میکرو است که می‌تواند در وسایلی مانند ماهواره‌ها، ربات‌ها و تلفن‌های هوشمند به صورت گسترده و روزانه مورد استفاده قرار گیرند. از مهم‌ترین ویژگی‌های محفظه‌های احتراق در مقیاس میکرو جهت تولید الکتریسیته در استفاده از سوخت‌های گوناگون است. لی و همکاران [۱] به بررسی تجربی و عددی محفظه احتراق میکرو با مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا و استفاده از پله پرداختند. در شبیه‌سازی عددی، هندسه به صورت دو بعدی و با شرط تقارن محوری، بررسی شد. نتایج پژوهش نشان داد با افزایش سرعت جریان ورودی، مقدار بیشینه دمای دیواره محفظه احتراق افزایش می‌یابد. همچنین حد شعله‌وری در محفظه احتراق با قرار دادن پله افزایش یافت. زروندی و همکاران [۲] به صورت عددی به مطالعه اثر اضافه کردن هیدروژن بر مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا پرداختند. آن‌ها نشان دادند با اضافه کردن هیدروژن، مقدار رادیکال‌های آزاد تولیدی افزایش می‌یابد و این پدیده منجر به حرکت جبهه شعله به سمت بالادست جریان می‌شود. اختر<sup>۱</sup> و همکاران [۳] به بررسی عددی محفظه احتراق میکرو با سطح مقطع‌های متفاوت به صورت سه بعدی پرداختند. نتایج نشان داد در زمان استفاده از سطح مقطع مستطیل شکل، دمای دیواره محفظه احتراق بیشتر از سایر حالات است و کمترین دما نیز مربوط به استفاده از سطح مقطع دایره است. علت این

<sup>1</sup> Akhtar

پدیده کوچک تر بودن سطح مقطع مستطیلی است زیرا باعث افزایش سرعت سیال و در نتیجه کاهش نرخ اتلاف حرارت شده است. جیاکیانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۴] به بررسی اثر زاویه پله بر بازده احتراق و دمای شعله پرداختند. آن‌ها نشان دادند مقدار بیشینه دما در زاویه ۴۵ درجه حاصل می‌شود و کمترین میزان دمای شعله نیز مربوط به زاویه ۶۰ درجه است. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند بیشترین بازده حرارتی محفظه احتراق مربوط به سرعت‌های ۳ و ۴ متر بر ثانیه است. ژانگ<sup>۲</sup> و همکاران [۵] به صورت عددی و دو بعدی به بررسی اثر وجود همزمان پله و جسم مانع در محفظه احتراق میکرو پرداختند. سوخت مورد استفاده توسط آن‌ها سوخت هیدروژن بود. نتایج نشان داد استفاده همزمان از پله و جسم مانع، باعث افزایش حد شعله‌وری می‌شود و شعله در سرعت‌های جریان ورودی بالاتر نیز پایدار می‌ماند. همچنین آن‌ها دریافتند در زمان استفاده همزمان از پله و جسم مانع، دمای دیواره محفظه نسبت به زمان استفاده تنها از پله یا جسم مانع، کاهش می‌یابد.

یکی از کارهای صورت پذیرفته در راستای افزایش پایداری شعله در محفظه احتراق میکرو، استفاده از جسم مانع است. جسم مانع با افزایش مدت زمان اقامت سیال درون محفظه احتراق میکرو باعث می‌شود حرارت لازم برای شروع واکنش به بالادست جریان منتقل شود. در این راستا فن<sup>۳</sup> و همکاران [۶] به صورت عددی به بررسی اثر جسم مانع بر پایداری شعله در محفظه احتراق پرداختند. هندسه طراحی شده توسط ایشان یک هندسه دو بعدی بود. آن‌ها نشان دادند در زمان استفاده از پله، شعله در سرعت‌های جریان ورودی بالاتر نیز پایدار می‌ماند. فن و همکاران [۷] در پژوهشی مشابه به بررسی اثر هندسه جسم مانع بر مشخصه‌های احتراقی پرداختند. آن‌ها دو جسم مانع با شکل‌های نیم دایره و مثلث را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد حد شعله‌وری در زمان استفاده از جسم مانع نیم دایره بیشتر است زیرا ناحیه چرخش پشت آن وسیع‌تر از حالت استفاده از جسم مانع مثلث شکل است. این ناحیه وسیع‌تر باعث افزایش مدت زمان اقامت سیال می‌شود. انصاری و امانی [۸] به بررسی عددی و سه‌بعدی استفاده همزمان از دو جسم مانع<sup>۴</sup> و ضخامت جسم مانع بر پایداری احتراق پرداختند. تحقیق آن‌ها نشان داد ضخامت جسم مانع، نقشی کلیدی را بر پارامترهایی نظیر مکان شعله، مقدار حرارت منتقل شده به دیواره و نحوه توزیع دما ایفا می‌کند. آن‌ها نشان دادند استفاده از جسم مانع با قطر کمتر باعث توزیع یکنواخت‌تر دما بر روی دیواره محفظه احتراق می‌شود که این پدیده در نهایت به افزایش بازده حرارتی منجر می‌شود. سای<sup>۵</sup> و همکاران [۹] به صورت عددی به مطالعه اثر استفاده از چند پله بر مشخصه‌های احتراقی شعله حاصل از مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا پرداختند. آن‌ها نشان دادند در مقدار بیشینه عدد ناسلت در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ به دست می‌آید و با افزایش نسبت هم‌ارزی، عدد ناسلت کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد، بر خلاف عدد ناسلت، گرمای آزاد شده ناشی از احتراق با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند افزایش ارتفاع و تعداد پله‌ها باعث افزایش دمای دیواره محفظه احتراق می‌شود. رقوان<sup>۶</sup> و همکاران [۱۰] به بررسی عددی محفظه احتراق با حضور یک جسم مانع با شکاف مرکزی پرداختند. سوخت مورد استفاده توسط ایشان، سوخت هیدروژن بود. آن‌ها نشان دادند با افزایش فاصله دو شکاف از یکدیگر مکان سرعت سوزش شعله افزایش می‌یابد. همچنین نشان داده شد، با افزایش فاصله شکاف‌ها دمای گازهای خروجی کاهش می‌یابد اما در مقابل دمای دیواره محفظه احتراق افزایش می‌یابد.

از دیگر کارهای صورت پذیرفته جهت افزایش پایداری شعله، می‌توان به استفاده از روش بازچرخش گرما اشاره کرد و به همین منظور هندسه‌های مختلفی مانند استفاده از لوله‌های U شکل پیشنهاد شده است. لی<sup>۷</sup> و همکاران [۱۱] به بررسی عددی و تجربی بازچرخش گرما بر مشخصات احتراقی در یک لوله U شکل پرداختند. سوخت مورد استفاده توسط آن‌ها، سوخت پروپان بود. آن‌ها نشان دادند بازچرخش گرما سبب افزایش حد شعله‌وری می‌شود. همچنین نتایج نشان داد با استفاده از بازچرخش گرما، مقدار بیشینه دمای شعله و به دنبال آن دمای دیواره محفظه احتراق افزایش می‌یابد. باقری و حسینی [۱۲] به بررسی محفظه احتراق داخلی و خارجی همراه با بازچرخش گرما به صورت عددی پرداختند. شبیه‌سازی آن‌ها دو بعدی و با شرط تقارن محوری بود و از سوخت پروپان استفاده کردند. نتایج نشان داد در هر دو نوع محفظه احتراق عمل پایداری شعله به‌علت

<sup>1</sup> Jiaqiang E

<sup>2</sup> Zhang

<sup>3</sup> Fan

<sup>4</sup> baffle-bluff

<sup>5</sup> Cai

<sup>6</sup> Raghavan

<sup>7</sup> Lee

پیش‌گرمایش مناسب افزایش یافته‌است. همچنین آن‌ها نشان دادند بازچرخش گرما باعث افزایش دمای دیواره محفظه احتراق می‌شود. علی‌پور و سعیدی [۱۳] به تأثیر بازچرخش گرما به صورت عددی پرداختند. آن‌ها از تک لوله U شکل جهت بازچرخش گرما استفاده کردند. شبیه‌سازی به صورت سه‌بعدی انجام شد و سوخت مورد استفاده در این تحقیق، سوخت هیدروژن بود. آن‌ها نشان دادند با افزایش ضریب رسانش حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، شعله به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کند، که علت این امر افزایش حرارت اتلافی از محفظه بود. تانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۴] به بررسی تجربی تأثیر بازچرخش گرما، نسبت هم‌ارزی و دبی جریان ورودی بر بازده تشعشعی و دمای دیواره محفظه احتراق میکرو پرداختند. آن‌ها نشان دادند در حالتی که بازچرخش گرما رخ نداده، دمای دیواره محفظه احتراق پایین‌تر از حالت استفاده از بازچرخش گرما است. علاوه بر این نتایج نشان داد دمای خارجی محفظه احتراق و بازده تشعشعی در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ بیشتر از نسبت هم‌ارزی ۱ است. آن‌ها نشان دادند با افزایش دبی جریان ورودی، دمای دیواره محفظه احتراق افزایش می‌یابد زیرا سوخت بیشتری وارد محفظه شده و در نتیجه آن انرژی حرارتی بیشتری آزاد می‌شود. چن<sup>۲</sup> و همکاران [۱۵] به بررسی بازچرخش گرما به صورت عددی در محفظه احتراق شیاردار پرداختند. آن‌ها از سوخت متان و پروپان به منظور بررسی دامنه پایداری آن‌ها استفاده کردند. نتایج نشان داد، با افزایش ضریب رسانش حرارتی، دمای دیواره کاهش می‌یابد. علت این پدیده افزایش حرارت اتلافی است. همچنین آن‌ها نشان دادند سوخت پروپان در بازدهی وسیع‌تری از سرعت‌های جریان ورودی پایدار می‌ماند. چن و پانگ<sup>۳</sup> [۱۶] به بررسی پایداری شعله به صورت عددی در یک محفظه احتراق دارای کاتالیزور با بازچرخش گرما پرداختند. آن‌ها نشان دادند با استفاده همزمان از کاتالیزور و بازچرخش گرما می‌توان محدودیت‌های افزایش سرعت جریان ورودی به محفظه احتراق که باعث خاموشی شعله می‌شود را رفع کرد. آن‌ها نشان دادند با چرخش گرما باعث افزایش انتالپی سیال ورودی می‌شود که این امر باعث افزایش بیشینه دمای شعله و سرعت سوزش شعله می‌شود. در تحقیقی دیگر عباس‌پور و علی‌پور [۱۷] به بررسی عددی مشخصات شعله در یک محفظه احتراق با دیواره موج‌دار پرداختند. شبیه‌سازی به صورت دوبعدی صورت پذیرفت و سوخت مورد استفاده هیدروژن بود. آن‌ها نشان دادند، محفظه احتراق با دیواره موج‌دار محدوده شعله‌وری را تا سه برابر نسبت به محفظه‌های احتراق معمولی افزایش می‌دهد. همچنین آن‌ها نشان دادند افزایش ضریب رسانش حرارتی منجر به توزیع یکنواخت‌تری از دما بر روی دیواره محفظه احتراق می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد پژوهش‌های مختلفی جهت پایدار کردن شعله انجام شده است که اساس کار آن‌ها بر پایه افزایش مدت زمان اقامت سیال در محفظه و افزایش انتالپی ورودی است. از کارهای انجام شده می‌توان به استفاده از پله و جسم مانع، جهت افزایش مدت زمان اقامت سیال در محفظه اشاره کرد. اما نکته قابل توجه در این هندسه، سختی پیاده‌سازی هندسه در فرآیندهای کاربردی است. یکی از هندسه‌های ساده‌تر در جهت کاربردی نمودن مفهوم احتراق در مقیاس میکرو استفاده از هندسه U شکل است که به منظور افزایش انتالپی ورودی استفاده می‌شود. هدف پژوهش حاضر مطالعه عددی مشخصه‌های احتراقی مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در محفظه احتراق شامل تک لوله U شکل و استفاده از ساختار ماژولار شامل لوله‌های دوتایی U شکل و مقایسه آن با تک لوله مستقیم به منظور بررسی اثر پیش‌گرمایش و افزایش انتالپی ورودی بر پایداری شعله و افزایش حد شعله‌وری است. در این پژوهش اثر پارامترهای سرعت جریان ورودی، نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش دیوار بررسی می‌شود.

## معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی، بقای تکانه، انرژی، بقای گونه‌ها، معادلات گاز ایده‌آل و معادلات آشفستگی است. در ادامه به تشریح معادلات حاکم بر مسئله پرداخته شده است:

معادله پیوستگی [۱۳]:

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

<sup>1</sup> Tang

<sup>2</sup> Chen

<sup>3</sup> Pang

معادله بقای تکانه [۱۳]:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial(P)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( -\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (۲)$$

که  $\rho, u, \mu$  به ترتیب چگالی، بردار سرعت و ضریب لزجت دینامیکی هستند.

معادله بقای انرژی [۱۳]:

$$\frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_f \frac{\partial T}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho \sum_{k=1}^N h_k Y_k V_{k,i} \right) + \dot{\omega}_T \quad (۳)$$

$$\dot{\omega}_T = -\sum_{k=1}^N \Delta h_{f,k}^0 \dot{\omega}_k$$

پارامترهای  $Y_k$  و  $\dot{\omega}_k$  به ترتیب نشان دهنده، کسر جرمی و نرخ واکنش گونه کام است. پارامتر  $\lambda_f$  ضریب نفوذ حرارتی مخلوط،  $\Delta h_{f,k}^0$  انتالپی تشکیل،  $V_{k,i}$  سرعت نفوذی و  $h_k$  نیز انتالپی گونه کام است. همچنین  $k_f$  نیز ضریب رسانش حرارتی سیال است.

معادله بقای گونه [۱۳]:

$$\frac{\partial(\rho u_i Y_k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho D_{k,m} \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_k \quad (۴)$$

معادله حالت گاز ایده آل [۱۳]:

$$p = \rho \frac{R_u}{\bar{W}} T \quad (۵)$$

$$\frac{1}{\bar{W}} = \sum_{k=1}^N \frac{Y_k}{W_k}$$

پارامتر  $\bar{W}$  وزن متوسط مولکولی و  $R_u$  نیز ثابت جهانی گازها است.

معادله انرژی در جسم جامد [۱۳]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (۶)$$

$$\lambda_s = \frac{k_s}{\rho c_p}$$

پارامتر  $\lambda_s$  ضریب نفوذ حرارتی جامد و  $k_s$  ضریب رسانش حرارتی جسم جامد است.

$D_{k,m}$  بیانگر نفوذ متوسط گونه  $k$  است [۱۳]:

$$D_{k,m} = \frac{1 - X_k}{\sum_{j \neq k} \left( \frac{X_j}{D_{ij}} \right)} \quad (۷)$$

در معادله ۷ پارامتر  $X_k$  نشان دهنده کسر مولی گونه کام است. همچنین جهت محاسبه ضریب انتشار دوتایی از رابطه

چپمن<sup>۱</sup> - انسکگ استفاده شده است [۱۳]:

$$D_{ij} = 10.1325 \frac{0.001858 T^{1.5} (W_{ij})^{-0.5}}{p \sigma_{ij}^2 \Omega_D} \quad (۸)$$

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

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

$$\Omega_D = \frac{1.06036}{T_N^{0.15610}} + \frac{0.193}{\exp(0.47635 N)} + \frac{1.76474}{\exp(3.8941 N)}$$

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

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

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

<sup>1</sup> Chapman-Enskog

پارامترهای  $W_k$ ،  $\sigma_i$ ،  $K_B$  و  $\varepsilon_\alpha$  به ترتیب وزن مولکولی گونه  $k$ ، قطر برخورد، ثابت بلتزنم و انرژی لنارد-جنز<sup>۱</sup> است. همچنین به منظور بررسی پارامترهای مرتبط با انرژی و کاربرد ترموفوتولتاییک راندمان تبدیل انرژی، بازده تشعشی و بازده حرارتی کل به شرح زیر در نظر گرفته می‌شود.  
راندمان تبدیل انرژی [۱۳]:

$$\eta_Q = \frac{\dot{Q}_{wall}}{\dot{Q}_R} \quad (9)$$

پارامتر  $\dot{Q}_{wall}$  نشان‌دهنده آهنگ انتقال حرارت از سیال به دیواره خارجی و  $\dot{Q}_R$  نشان‌دهنده آهنگ انرژی شیمیایی آزاد شده است.

$$\dot{Q}_{wall} = \sigma\varepsilon(T_s^4 - T_{sur}^4) + h(T_s - T_{inf}) \quad (10)$$

$$\dot{Q}_R = \dot{m}_{h_2} Q_{LHV} \quad (11)$$

پارامترهای  $\sigma$ ،  $\varepsilon$ ،  $T_s$  و  $T_{sur}$  به ترتیب ثابت استفن-بلتزنم، ضریب تشعشی سطح، دمای سطح و دمای محیط است. همچنین  $T_{inf}$  نشان‌دهنده دمای جریان هوای آزاد محیط است.

بازده تشعشی [۱۳]:

$$\eta_{Rad} = \frac{\dot{Q}_{Rad}}{\dot{Q}_R} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{Rad} = \sigma\varepsilon(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (13)$$

بازده حرارتی کل [۱۳]:

$$\eta_{total} = \eta_{Rad}\eta_{TPV} \quad (14)$$

پارامتر  $\eta_{TPV}$  نشان‌دهنده مقدار انرژی انتقالی تشعشی بوده که به الکتریسیته تبدیل می‌شود. برای تبدیل انرژی حاصل از تشعشع به الکتریسیته از سلول‌های ترموفوتولتاییک استفاده می‌شود که این نوع از سلول‌ها دارای بازده متفاوتی هستند. در این پژوهش بازده سلول‌ها ۲۰٪ در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر از مدل آشفته‌گی  $k-\varepsilon$  استاندارد و از سینتیک شیمیایی بورکی<sup>۲</sup> برای مخلوط هیدروژن - هوا شامل ۹ گونه و ۲۷ مرحله استفاده شده است. جدول ۱ نشان‌دهنده سینتیک شیمیایی مخلوط هیدروژن - هوا است [۱۸].

جدول ۱- سینتیک شیمیایی مخلوط  $H_2/O_2$  [۱۸].

Table1- Detailed reaction mechanism for H2/O2 [18].

No.	Reaction	A(mole.cm.K.s)	n	E (kJ/mole)
R1	H + O <sub>2</sub> = O + OH	1.04E+14	0.0	1.5286E+04
R2	O + H <sub>2</sub> = H + OH DUP	3.818E+12	0.0	7.948E+03
R3	O + H <sub>2</sub> = H + OH DUP	8.792E+14	0.0	1.917E+04
R4	H <sub>2</sub> + OH = H <sub>2</sub> O + H	0.216E+09	1.51	0.343E+04
R5	OH+OH = O+H <sub>2</sub> O	3.34E+04	2.42	-1.93E+03
R6	H <sub>2</sub> +M = H+H+M	4.577E+19	-1.40	1.0438E+05
	H <sub>2</sub> /2.5/ H <sub>2</sub> O/12/			
R7	O+O+M = O <sub>2</sub> +M	6.165E+15	-0.50	0.000E+00
	H <sub>2</sub> /2.5/ H <sub>2</sub> O/12/			
R8	O+H+M = OH+M	4.714E+18	-1.00	0.000E+00
	H <sub>2</sub> /2.5/ H <sub>2</sub> O/12/			
R9	H <sub>2</sub> O+M = H+OH+M	6.064E+27	-3.322	1.2079E+05
	H <sub>2</sub> /3.0/ H <sub>2</sub> O/0.0/ N <sub>2</sub> /2.00/ O <sub>2</sub> /1.5/			
R10	H <sub>2</sub> O+H <sub>2</sub> O = H+OH+H <sub>2</sub> O	1.006E+26	-2.44	1.2018E+05
R111	H+O <sub>2</sub> (+M) = HO <sub>2</sub> (+M)	4.65084E+12	0.44	0.000E+00
	LOW/6.366E+20 -1.72 5.248E+02/			
	TROE/0.5 1E-30 1E+30/			
	H <sub>2</sub> /2.0/ H <sub>2</sub> O/14/ O <sub>2</sub> /0.78/			

<sup>1</sup> Lennard-Jones energy

<sup>2</sup> Bruke

R12	$\text{HO}_2 + \text{H} = \text{H}_2 + \text{O}_2$	2.750E+06	2.09	-1.451E+03
R13	$\text{HO}_2 + \text{H} = \text{OH} + \text{OH}$	7.079E+13	0.00	2.950E+02
R14	$\text{HO}_2 + \text{O} = \text{O}_2 + \text{OH}$	2.850E+10	1.00	-7.2393E+02
R15	$\text{HO}_2 + \text{OH} = \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	2.890E+13	0.00	-4.970E+02
R16	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$ DUP	4.200E+14	0.00	1.1982E+04
R17	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$ DUP	1.300E+11	0.00	-1.6293E+03
R18	$\text{H}_2\text{O}_2(+\text{M}) = \text{OH} + \text{OH} (+\text{M})$ LOW/2.49E+24 -2.30 4.8749E+04/ TROE/0.43 1E-30 1E+30/ H <sub>2</sub> O/7.5/ N <sub>2</sub> /1.5/ O <sub>2</sub> /1.2/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /7.7/ H <sub>2</sub> /3.7/	2.00E+12	0.90	4.8749E+04
R19	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H} = \text{H}_2\text{O} + \text{OH}$	2.410E+13	0.00	3.970E+03
R20	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H} = \text{HO}_2 + \text{H}_2$	4.820E+13	0.00	7.950E+03
R21	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{O} = \text{OH} + \text{HO}_2$	9.550E+06	2.00	3.970E+03
R22	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH} = \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ DUP	1.740E+12	0.00	3.180E+02
R23	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH} = \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ DUP	7.590E+13	0.00	7.270E+03

### هندسه مسئله، شرایط مرزی و روش حل عددی

هندسه بررسی شده در این پژوهش، شامل سه هندسه متفاوت است. شکل ۱- (الف)، (ب) و (پ) به ترتیب نشان دهنده هندسه طراحی شده سه بعدی برای تک لوله مستقیم، تک لوله U شکل و لوله‌های U شکل دوتایی است. در شکل پارامترهای  $D$ ،  $L$  و  $t_w$  به ترتیب نشان دهنده طول قسمت مستقیم لوله، قطر داخلی لوله و ضخامت لوله است که مقادیر آن‌ها برابر  $10 \text{ mm}$ ،  $1 \text{ mm}$  و  $0.25 \text{ mm}$  در نظر گرفته شده است. همچنین در تمامی حالت‌ها فاصله قطر خارجی لوله‌ها نسبت به دیواره محفظه برابر  $0.6 \text{ mm}$  است و در حالت استفاده از لوله‌های دوتایی، فاصله لوله‌ها نسبت به یکدیگر برابر  $0.3 \text{ mm}$  است.

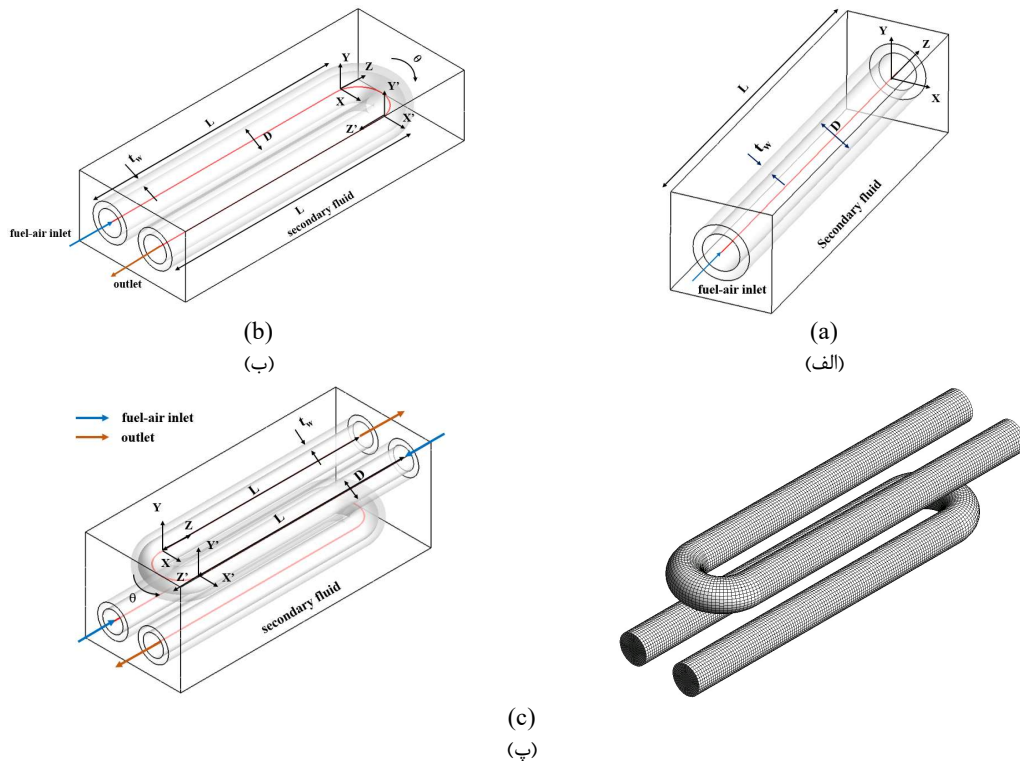


Figure 1- Geometry of the suggested micro combustor constructed with the computational grid. Single straight tube (a), single U-shaped tube (b), dual U-shaped tubes and computational grid (c)

شکل ۱- هندسه محفظه احتراق میکرو پیشنهادی شامل تک لوله مستقیم (الف)، تک لوله U شکل (ب) و لوله‌های U شکل دوتایی و شبکه محاسباتی (پ)

مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا با سرعت و نسبت هم‌ارزی ثابت و دمای ورودی  $300\text{ K}$  وارد لوله می‌شود. در ورودی لوله گرادیان فشار صفر در نظر گرفته شده است، همچنین شرط مرزی مقدار ثابت برای سرعت جریان ورودی، دما و کسر جرمی گونه‌ها لحاظ شده است. برای دیواره داخلی لوله شرط عدم لغزش برای سرعت در نظر گرفته شده است. شرایط کوپل برای سطح مشترک سیال و دیواره داخلی لوله لحاظ شده است. مکانیزم‌های انتقال حرارت بر روی دیواره‌های محفظه احتراق شامل مکانیزم همرفت و تشعشع است و دمای سیال اطراف محفظه احتراق برابر  $300\text{ K}$  در نظر گرفته شده است. همچنین ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشع برای تمامی حالت‌ها به ترتیب برابر  $15\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  و  $0.3$  است. به منظور تحلیل اثر ضریب رسانش حرارتی سه ماده کوارتز، تیتانیوم و استیل با ضرایب رسانشی  $1/18\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ،  $6/7\text{ W/m}\cdot\text{K}$  و  $12/63\text{ W/m}\cdot\text{K}$  در نظر گرفته شده است. در خروجی شرط مرزی فشار ثابت با مقدار فشار یک اتمسفر لحاظ شده است. همچنین برای شروع فرآیند احتراق، دمای  $1900\text{ K}$  به عنوان شرط اولیه در نظر گرفته شده است. برای حل معادلات از الگوریتم کوپل<sup>۱</sup> و معادلات به صورت پایا حل می‌شوند. همچنین معادلات حاکم با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent 22 و به صورت سه‌بعدی حل شده است.

### صحت‌سنجی و مطالعه دقت شبکه محاسباتی

نتایج آزمایشگاهی پینگ<sup>۲</sup> و همکاران [۱۹] جهت بررسی صحت‌سنجی حلگر انتخاب شده است. آن‌ها به مطالعه یک محفظه احتراق استوانه‌ای شکل شامل دو پله پرداختند. برای صحت‌سنجی، دمای دیواره محفظه احتراق مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ نشان‌دهنده نتیجه اعتبارسنجی است. برای صحت‌سنجی دبی‌های ورودی  $2.02\text{ gr/h}$  و  $3.03\text{ gr/h}$  مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل ۲ می‌توان دریافت نتایج حاصل از حل عددی به خوبی توانسته رفتار دمای دیواره محفظه احتراق را پیش‌بینی کند. مقدار بیشینه دمای دیواره در کار تجربی صورت پذیرفته برای دبی‌های ورودی  $2.02\text{ gr/h}$  و  $3.03\text{ gr/h}$  به ترتیب برابر  $1146\text{ K}$  و  $1218\text{ K}$  است و شبیه‌سازی دمای  $1138\text{ K}$  و  $1171\text{ K}$  را برای دبی‌های ورودی بیان شده پیش‌بینی کرده است، درصد خطا به ترتیب برابر  $0.6\%$  و  $6\%$  است. همچنین در قسمت خروجی نیز دمای دیواره در کار تجربی برای دبی‌های بیان شده به ترتیب برابر  $1018\text{ K}$  و  $1095\text{ K}$  است. در حالی که در اعتبارسنجی صورت پذیرفته این مقادیر به ترتیب برابر  $1045\text{ K}$  و  $1075\text{ K}$  است که درصد خطای آن برابر  $2/5$  و  $1/8$  است. مقدار درصد خطا در حل عددی پینگ و همکاران برای مقدار بیشینه دمای دیواره و دمای دیواره در خروجی برای دبی ورودی  $2.02\text{ gr/h}$  به ترتیب برابر  $2$  و  $3$  درصد است، که اعتبارسنجی این پژوهش، درصد خطای کمتری را به ثبت رسانده است.

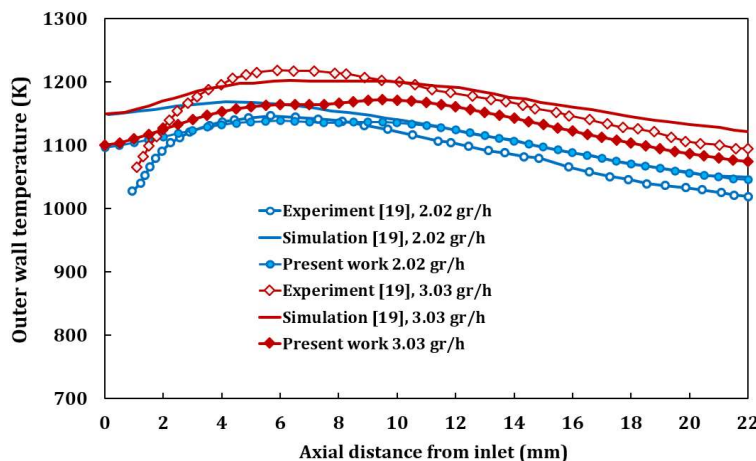


Figure 2- Variations of Experimental Data [19] and numerical Data in combustion chamber wall temperature for inlet flow rates of 2.02 g/h and 3.03 g/h

شکل ۲- تغییرات دمای دیواره محفظه احتراق به صورت تجربی [۱۹] و عددی برای دبی‌های جریان ورودی  $2.02\text{ gr/h}$  و  $3.03\text{ gr/h}$

<sup>1</sup> Coupled

<sup>2</sup> Ping

برای بررسی استقلال حل از تعداد سلول محاسباتی، هندسه تک لوله U شکل، (شکل ۱-ب)، با تعداد مختلف شبکه مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳ مربوط به دقت شبکه‌های مختلف است، به‌منظور مشاهده بهتر اثر تغییر تعداد سلول محاسباتی تنها فاصله ۴ mm از ورودی لوله نشان داده شده است. بدین‌منظور ساختارهای مختلف با تعداد سلول محاسباتی ۶۱۰۰۰، ۱۴۰۰۰۰، ۳۵۰۰۰۰ و ۴۷۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شکل ۳ نشان‌دهنده یک همگرایی با افزایش تعداد سلول محاسباتی است، بنابراین تعداد سلول ۳۵۰۰۰۰ برای ادامه فرآیند شبیه سازی انتخاب شد.

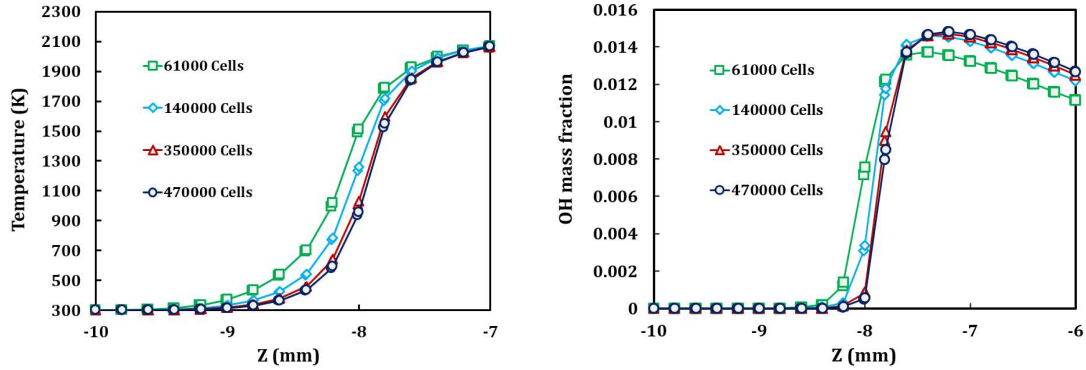


Figure 3- Graph showing changes in the mass fraction of OH species and temperature along the central axis of the U-shaped tube, based on the number of grid cells

شکل ۳- نمودار تغییرات کسر جرمی گونه OH و دما در راستای محور مرکزی لوله U شکل برحسب تعداد سلول‌های شبکه

## ارائه نتایج و تفسیر داده‌ها

### بررسی اثر تغییر سرعت ورودی بر مشخصه‌های احتراق

در این قسمت اثر تغییر پارامترهای سرعت جریان ورودی بر توزیع کسر جرمی گونه OH و دما در هندسه‌های مختلف بررسی می‌شوند. در ابتدا به بررسی تک لوله مستقیم پرداخته می‌شود. به‌منظور بررسی اثر سرعت جریان ورودی، سرعت‌های ۴ m/s، ۸ m/s و ۱۱ m/s در نظر گرفته شده است. شکل ۴ نشان‌دهنده توزیع کسر جرمی گونه OH و دما با تغییر سرعت جریان ورودی است. در شکل ۴، کانتورهای مربوط به سرعت جریان ورودی ۴ m/s و ۱۱ m/s، نشان داده شده است. همچنین برای بررسی اثر سرعت، نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش حرارتی برای سرعت‌های جریان ورودی مختلف، ثابت و به‌ترتیب برابر ۱ و ۶/۷ W/m.K فرض شده است. با توجه به شکل ۴ می‌توان دریافت با افزایش سرعت جریان ورودی، مقدار بیشینه دمای شعله کاهش یافته‌است و مکان مقدار بیشینه دمای شعله نیز به سمت پایین دست جریان حرکت کرده است. علت این پدیده مربوط به کاهش حرارت منتقل شده به سیال ورودی است زیرا مدت زمان اقامت سیال در لوله کاهش یافته‌است. بنابراین کاهش حرارت منتقل شده به بالادست جریان باعث می‌شود سیال فاصله بیشتری را جهت رسیدن به دمای شروع احتراق طی کند. از طرفی با توجه به توزیع کانتورهای کسر جرمی گونه OH می‌توان دریافت با افزایش سرعت جریان ورودی، مقدار بیشینه کسر جرمی گونه OH کاهش یافته است. علت این امر مربوط به از بین رفتن رادیکال‌های آزاد تولید شده توسط تکانه جریان ورودی و همچنین خروج آن‌ها از ناحیه واکنش به‌واسطه افزایش سرعت جریان ورودی است.

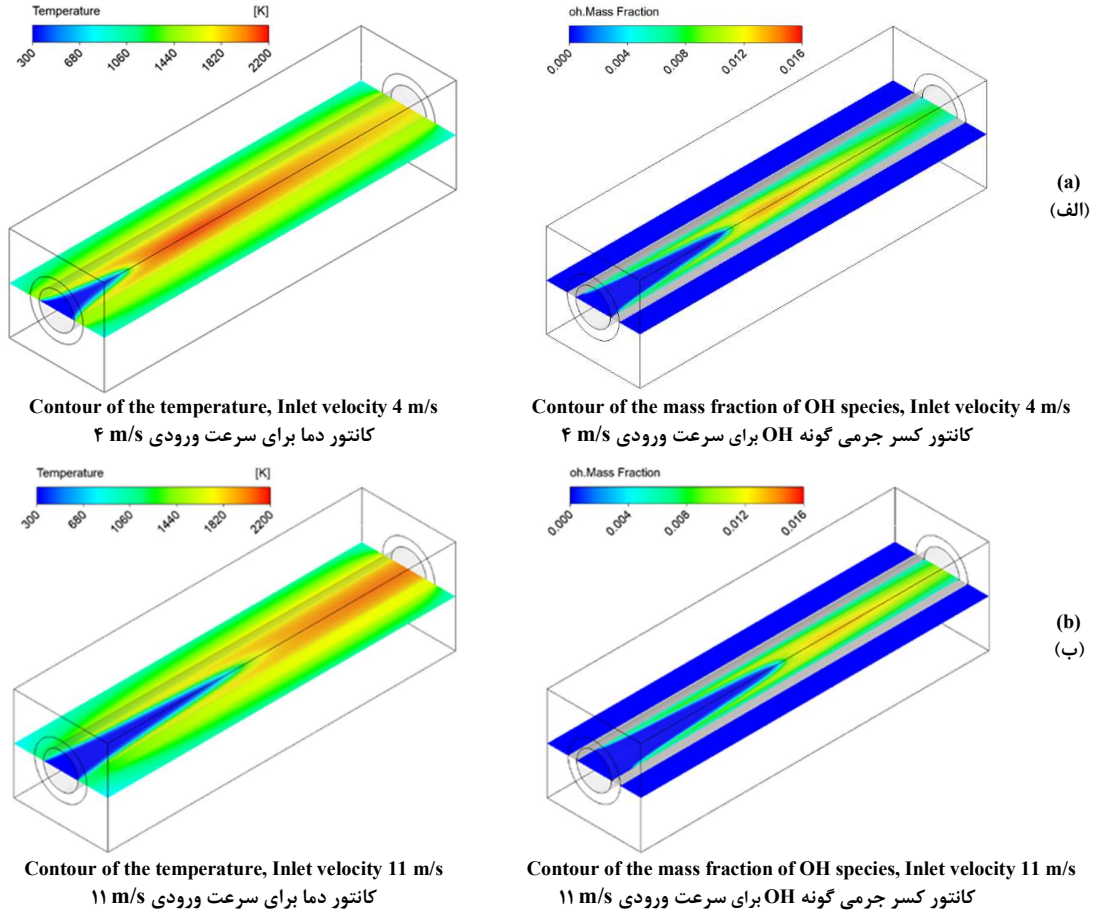


Figure 4- distribution contours of the mass fraction of OH species and temperature for the inlet velocities of 4 m/s (a) and 11 m/s (b) for a straight tube, equivalence ratio of 1 and thermal conductivity coefficient 6.7 W/m·K

شکل ۴- کانتورهای توزیع کسر جرمی گونه OH و دما برای سرعت‌های ورودی 4 m/s (الف) و 11 m/s (ب) برای لوله مستقیم، نسبت هم‌ارزی ۱ و ضریب رسانش حرارتی 6/7 W/m.K

شکل ۵ نشان‌دهنده توزیع کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) روی خط قرمز عبور کرده از لوله مستقیم، مطابق شکل ۱-الف، است. باتوجه به شکل ۵- (الف) و (ب) می‌توان دریافت با افزایش سرعت جریان ورودی مکان بیشینه کسر جرمی گونه OH و دما به پایین دست جریان حرکت می‌کند به نحوی که این فاصله نسبت به ورودی و برای سرعت‌های 4 m/s، 8 m/s و 11 m/s به ترتیب برابر 2/3 mm، 3/8 mm و 5/2 mm است. همچنین باتوجه به شکل ۵-الف مشاهده می‌شود که مقادیر بیشینه کسر جرمی گونه OH برای سرعت‌های 4 m/s، 8 m/s و 11 m/s، به ترتیب برابر با 0/0148، 0/0134 و 0/0128 است. در خصوص توجیه این پدیده می‌توان بیان کرد با افزایش سرعت جریان ورودی، احتراق ناقص رخ می‌دهد که این احتراق ناقص سبب کاهش تولید رادیکال‌های آزاد در ناحیه واکنش، از جمله رادیکال آزاد OH می‌شود. شکل ۵-ب نشان می‌دهد مقادیر بیشینه دما با افزایش سرعت جریان ورودی روندی کاهشی داشته است. مقدار بیشینه دما در سرعت 4 m/s برابر 2122 K است و برای سرعت‌های 8 m/s و 11 m/s، به ترتیب کاهشی 3 و 4 درصدی را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده حداکثر سرعت ورودی برای پایداری شعله، سرعت 11 m/s است و در سرعت 12 m/s شعله خاموش می‌شود.

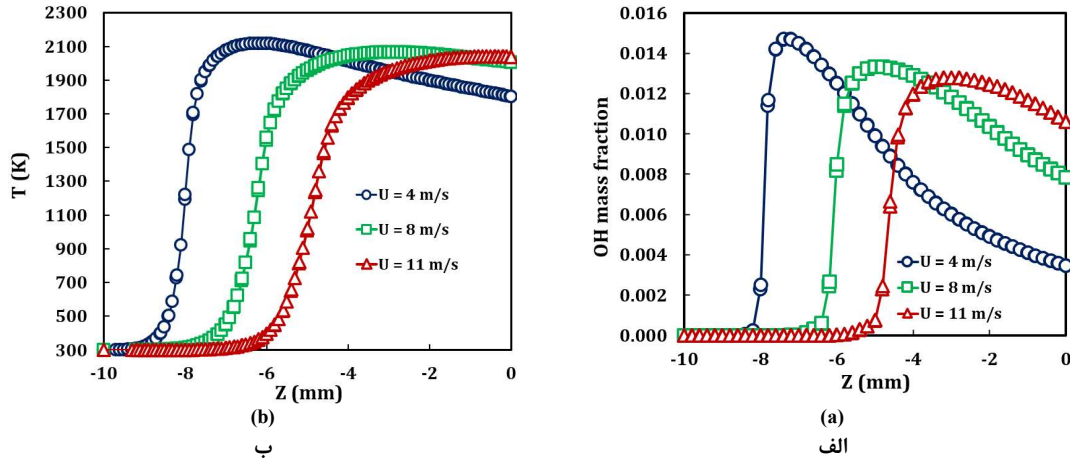
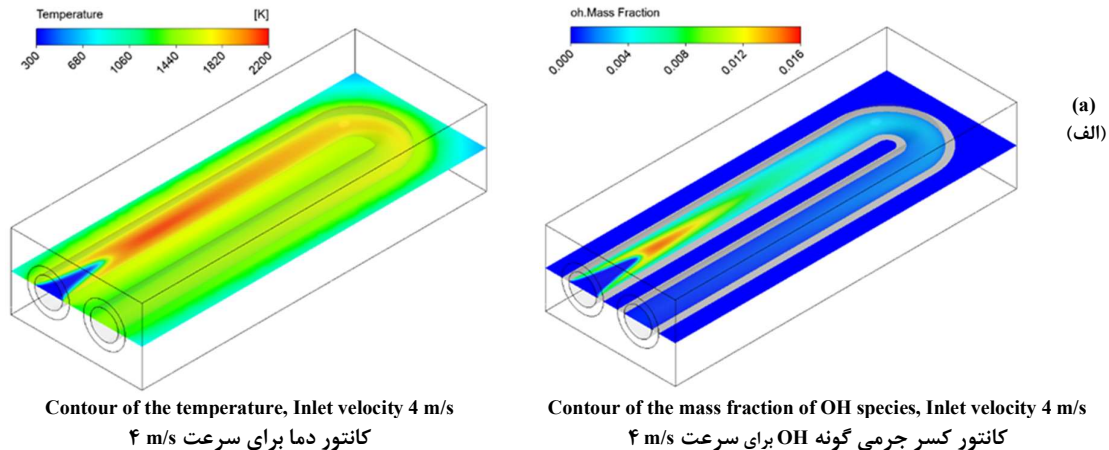


Figure 5- Distribution of the mass fraction of OH species (a) and temperature (b) along the central line of the straight tube at different Inlet velocities, equivalence ratio of 1 and thermal conductivity coefficient  $6.7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

شکل ۵- تغییرات کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) بر روی خط مرکزی لوله مستقیم برای سرعت‌های مختلف، نسبت هم‌ارزی ۱ و ضریب رسانش حرارتی  $6/7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

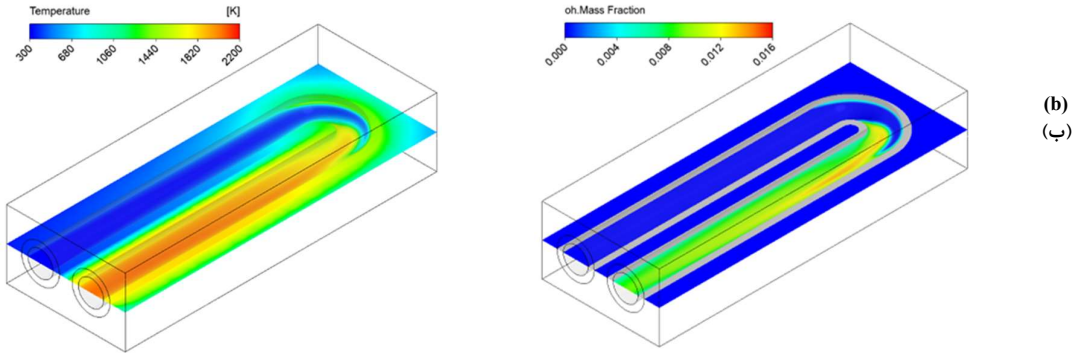
در این قسمت به بررسی اثر سرعت جریان ورودی بر توزیع کسر جرمی گونه OH و دما در تک لوله U شکل پرداخته می‌شود. برای این مطالعه، سرعت‌های جریان ورودی  $4 \text{ m/s}$ ،  $8 \text{ m/s}$ ،  $12 \text{ m/s}$  و  $14 \text{ m/s}$  در نظر گرفته شده است. شکل ۶ نشان‌دهنده کانتورهای کسر جرمی گونه OH و دما برحسب تغییر سرعت جریان ورودی است. با توجه به شکل ۶ مشهود است با افزایش سرعت جریان ورودی مقادیر بیشینه کسر جرمی گونه OH و دما به پایین دست جریان حرکت کرده است. همچنین با مقایسه نتایج حاصل از تک لوله مستقیم و تک لوله U شکل می‌توان پی برد در هنگام استفاده از لوله U شکل، حداکثر حد شعله‌وری از مقدار  $11 \text{ m/s}$  در لوله مستقیم به مقدار  $14 \text{ m/s}$  در لوله U شکل افزایش پیدا کرده است، که افزایش  $27\%$  را نشان می‌دهد.

شکل ۷ نشان‌دهنده توزیع کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) با تغییر سرعت ورودی جریان است. به منظور مطالعه اثر سرعت، نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش حرارتی ثابت و به ترتیب برابر ۱ و  $6/7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  فرض شده است. با توجه به شکل ۷-الف می‌توان دریافت، در ابتدا کسر جرمی گونه OH مقداری کاهش را تجربه کرده است، به نحوی که در سرعت‌های  $4 \text{ m/s}$  و  $8 \text{ m/s}$  این مقدار به ترتیب برابر با  $0.015$  و  $0.0134$  است، علت این پدیده مربوط به حرکت رادیکال‌های OH به سمت خروجی لوله به واسطه افزایش سرعت ورودی سیال است، همچنین با افزایش سرعت ورودی و کاهش مدت زمان اقامت سیال در محفظه، احتراق ناقص رخ می‌دهد که این امر در نهایت منجر به کاهش تولید رادیکال‌های آزاد از جمله رادیکال OH می‌شود.



Contour of the temperature, Inlet velocity 4 m/s  
کانتور دما برای سرعت  $4 \text{ m/s}$

Contour of the mass fraction of OH species, Inlet velocity 4 m/s  
کانتور کسر جرمی گونه OH برای سرعت  $4 \text{ m/s}$



Contour of the temperature, Inlet velocity 14 m/s  
کانتور دما برای سرعت ۱۴ m/s

Contour of the mass fraction of OH species, Inlet velocity 14 m/s  
کانتور کسر جرمی گونه OH برای سرعت ۱۴ m/s

Figure 6- Distribution contours of the mass fraction of OH species and temperature for the inlet velocities of 4 m/s (a) and 11 m/s (b) for the U-shaped tube, equivalence ratio of 1 and thermal conductivity of 6.7 W/m·K  
شکل ۶- کانتورهای توزیع کسر جرمی گونه OH و دما برای سرعت‌های ورودی ۴ m/s (الف) و ۱۴ m/s (ب) برای لوله U شکل، نسبت هم‌ارزی ۱ و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K

با افزایش بیشتر سرعت جریان ورودی و قرار گرفتن جبهه شعله در قسمت منحنی شکل لوله برای سرعت جریان ورودی ۱۲ m/s، مقدار کسر جرمی گونه OH افزایشی جزئی را نسبت به سرعت جریان ورودی ۸ m/s تجربه می‌کند. همچنین شکل ۷- الف نشان می‌دهد برای سرعت جریان ورودی ۱۴ m/s، مقدار بیشینه کسر جرمی گونه OH نسبت به سرعت ورودی ۱۲ m/s کاهش یافته است به نحوی که مقدار آن در سرعت‌های ۱۲ m/s و ۱۴ m/s به ترتیب برابر با ۰/۰۱۴ و ۰/۰۱۳۳ است. علت این افزایش در سرعت جریان ورودی ۱۲ m/s، کاهش سرعت محلی سیال در قسمت منحنی شکل لوله به واسطه نیروی گریز از مرکز است [۱۳].

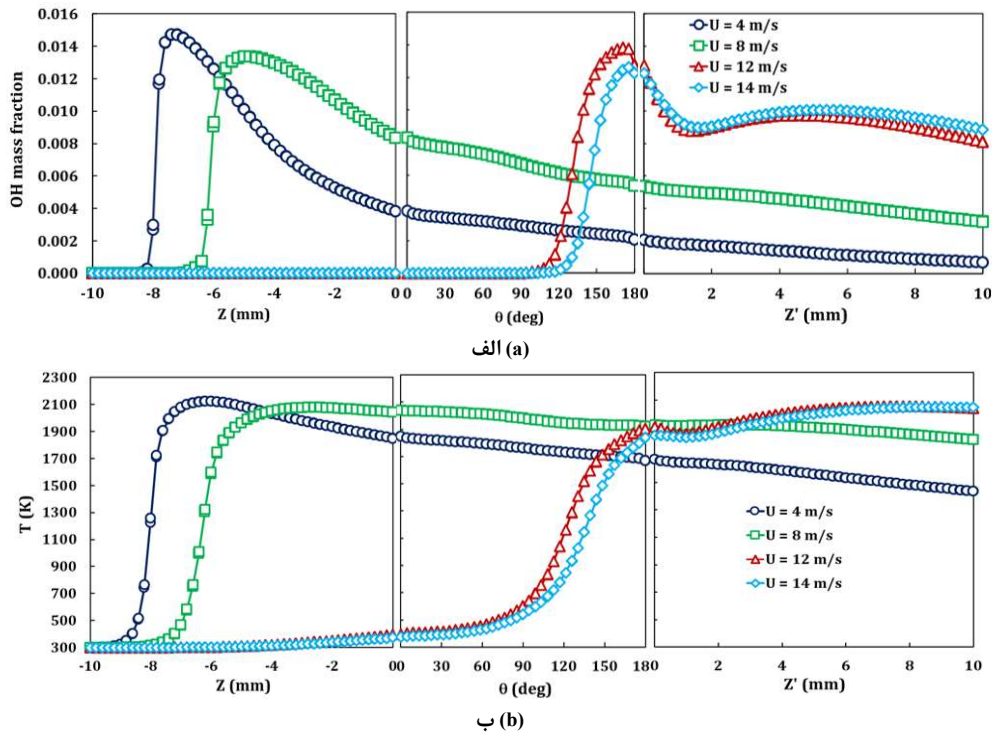


Figure 7- Distribution of the mass fraction of OH species (a) and temperature (b) along the central line of the U-shaped tube at different Inlet velocities, equivalence ratio of 1 and thermal conductivity coefficient 6.7 W/m·K  
شکل ۷- تغییرات کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) بر روی خط مرکزی لوله U شکل برای سرعت‌های مختلف، نسبت هم‌ارزی ۱ و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K

در این بخش لوله‌های دوتایی U شکل بررسی می‌شود. شکل ۸ نشان‌دهنده کانتورهای کسر جرمی گونه OH و دما بر روی صفحه مرکزی عبور کرده از محفظه احتراق با لوله‌های غیرهمسو و جهت ورودی مخالف است. همچنین با توجه به شکل ۸ می‌توان دریافت افزایش سرعت جریان ورودی تأثیر زیادی بر مکان مقدار بیشینه پارامترهای کسر جرمی و دما داشته است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش سرعت جریان ورودی، کشیدگی شعله افزایش پیدا کرده است.

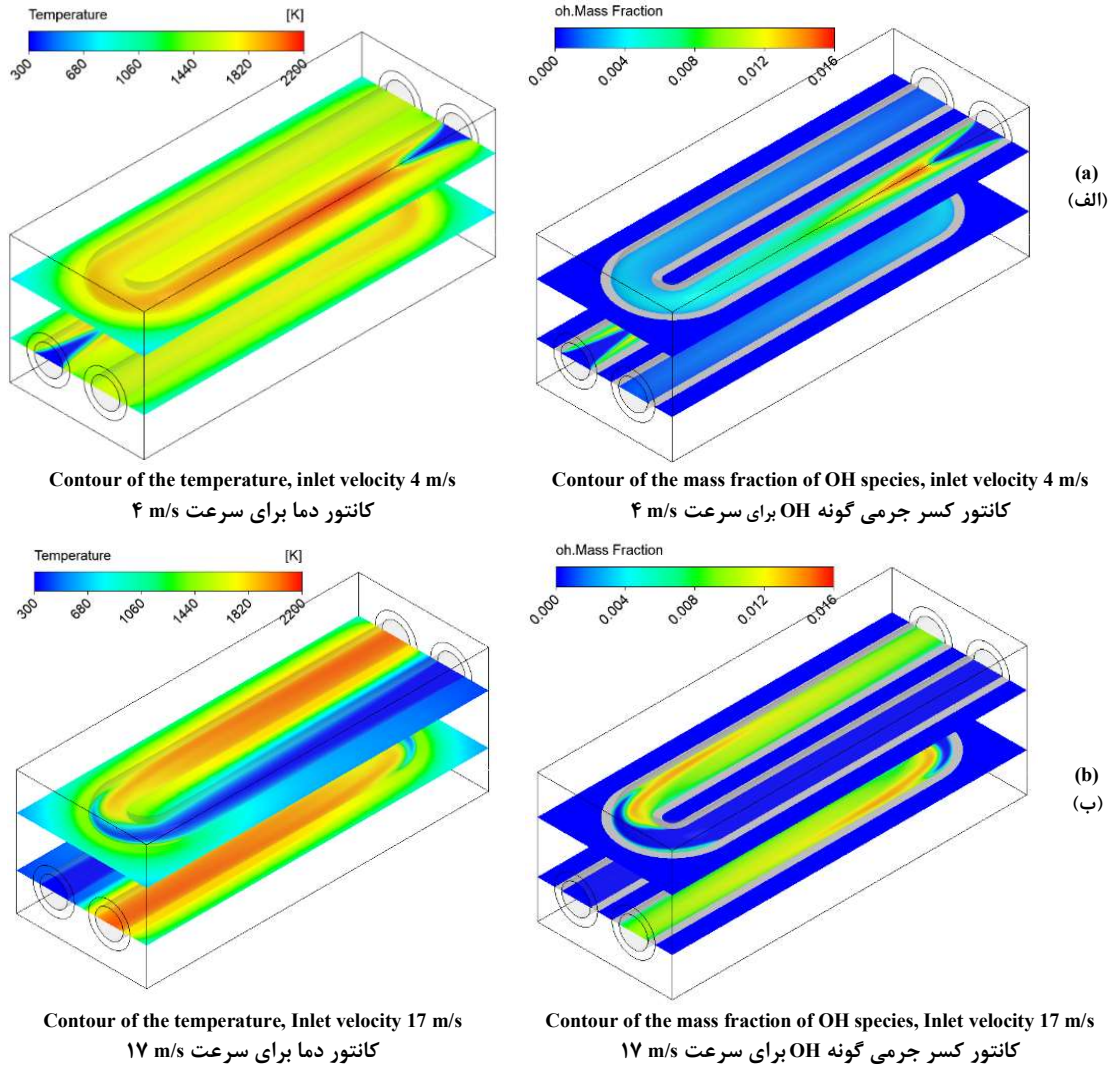


Figure 8- distribution contours of the mass fraction of OH species and temperature for the inlet velocities of 4 m/s (a) and 17 m/s (b) for dual U-shaped tubes, equivalence ratio of 1 and thermal conductivity coefficient of 6.7 W/m.K

شکل ۸- کانتورهای توزیع کسر جرمی گونه OH و دما برای سرعت‌های ورودی ۴ m/s (الف) و ۱۷ m/s (ب) برای لوله‌های U شکل، نسبت هم‌ارزی ۱ و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K

شکل ۹ نشان‌دهنده اثر سرعت ورودی جریان بر توزیع کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) روی خط مرکزی عبور کرده از لوله‌های U شکل است. مقادیر پارامترهای نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش حرارتی دیواره، ثابت و به ترتیب برابر ۱ و W/m.K فرض شده است. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که توزیع کسر جرمی گونه OH برای سرعت‌های ورودی یکسان کاملاً متقارن است، همچنین می‌توان دریافت با افزایش سرعت جریان ورودی، مکان مقدار بیشینه کسر جرمی به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کند. تغییر در مقدار بیشینه کسر جرمی گونه OH دارای نوسان زیادی با تغییر سرعت جریان ورودی دارد. به‌عنوان نمونه مقدار کسر جرمی گونه OH از ۰/۰۱۴۸۷ در سرعت ۴ m/s، به مقدار ۰/۰۱۲۷۷ در سرعت ۱۲ m/s می‌رسد. با

افزایش بیشتر سرعت جریان ورودی مقدار بیشینه پارامتر بیان شده ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد به گونه‌ای که مقدار آن در سرعت‌های ۱۶ m/s و ۱۷ m/s، به ترتیب برابر ۰/۰۱۳۷۸ و ۰/۰۱۳۴۸ است. علت این پدیده مربوط به کاهش مدت زمان اقامت سیال در لوله است. از طرف دیگر، افزایش سرعت جریان ورودی سبب تأخیر در انجام واکنش می‌شود، زیرا زمان کافی جهت رسیدن مخلوط سوخت-هوا به دمای احتراق وجود ندارد و تأخیر در انجام واکنش سبب خاموشی رادیکال‌هائی نظیر OH می‌شود. باتوجه به شکل ۹ می‌توان پی‌برد مکان مقدار بیشینه دما همانند کسر جرمی با افزایش سرعت به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کند. همچنین می‌توان دریافت مقدار بیشینه دما در سرعت جریان ورودی ۴ m/s حاصل می‌شود زیرا در این سرعت احتراق کامل‌تری رخ می‌دهد و انرژی بیشتری آزاد می‌شود. علاوه بر این، عمل پیش‌گرمایش نیز بهتر صورت می‌پذیرد و این پیش‌گرمایش باعث افزایش انتالپی ورودی سیال و در نتیجه افزایش بیشینه دما می‌شود.

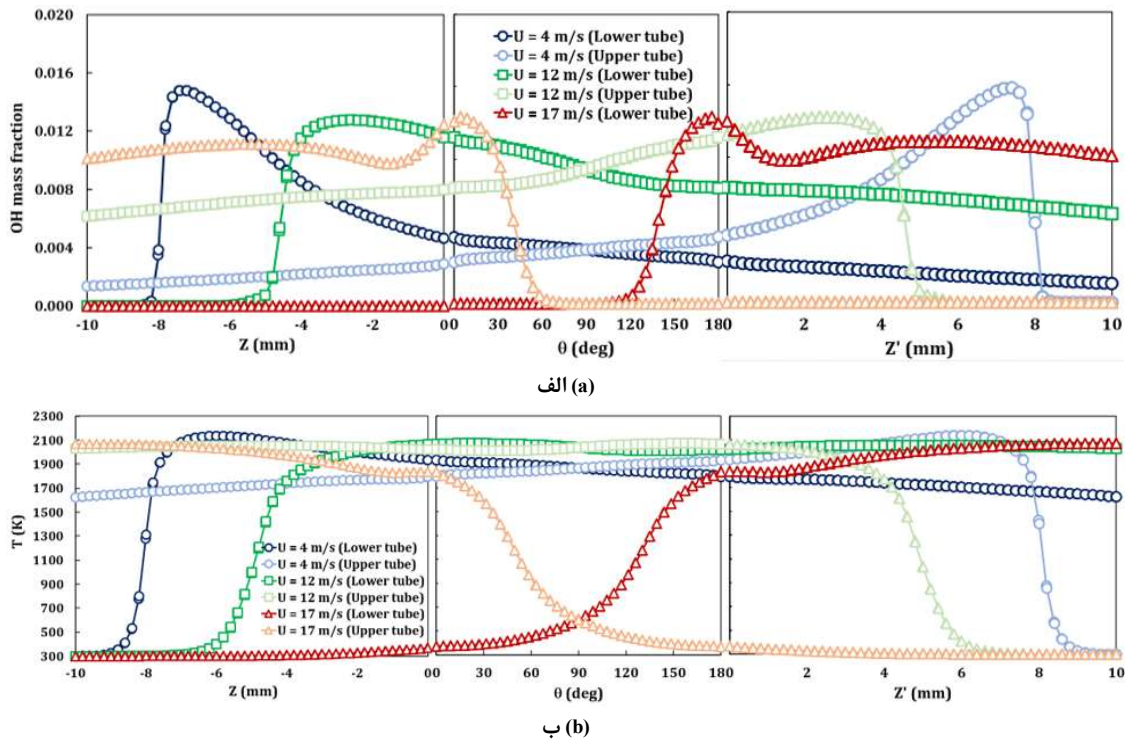


Figure 9- Distribution of the mass fraction of OH species (a) and temperature (b) along the central line of the dual U-shaped tube at different inlet flows, equivalence ratio of 1 and thermal conductivity coefficient 6.7 W/m.K

شکل ۹- تغییرات کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) بر روی خط مرکزی لوله U شکل برای سرعت‌های مختلف، نسبت هم‌ارزی ۱ و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K

### بررسی اثر تغییر نسبت هم‌ارزی بر مشخصه‌های احتراق

در ادامه به بررسی تغییر نسبت هم‌ارزی بر توزیع کسر جرمی گونه OH و دما در هندسه‌های مختلف پرداخته شده است. برای این مطالعه، برای تمامی هندسه‌ها، نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸، ۱ و ۱/۲ بررسی شده است. همچنین با تغییر نسبت هم‌ارزی پارامترهای سرعت جریان ورودی و ضریب رسانش حرارتی ثابت و به ترتیب برابر ۸ m/s و ۶/۷ W/m.K فرض شده است. شکل ۱۰ نشان‌دهنده کانتورهای توزیع کسر جرمی گونه OH و دما در یک لوله مستقیم و براساس تغییر نسبت هم‌ارزی است. باتوجه به شکل می‌توان پی‌برد با افزایش نسبت هم‌ارزی مقدار بیشینه کسر جرمی گونه OH در ابتدا روندی افزایشی و سپس کاهشی داشته است، اما مقدار بیشینه دما روندی افزایشی داشته است. علت افزایش و کاهش کسر جرمی مربوط به این نکته بوده که در نسبت هم‌ارزی ۱ احتراق استوکیومتری رخ داده است. همچنین علت افزایش دما با افزایش نسبت هم‌ارزی، ورود سوخت بیشتر به محفظه احتراق است که این افزایش ورودی سوخت باعث آزاد شدن انرژی حرارتی بیشتر می‌شود.

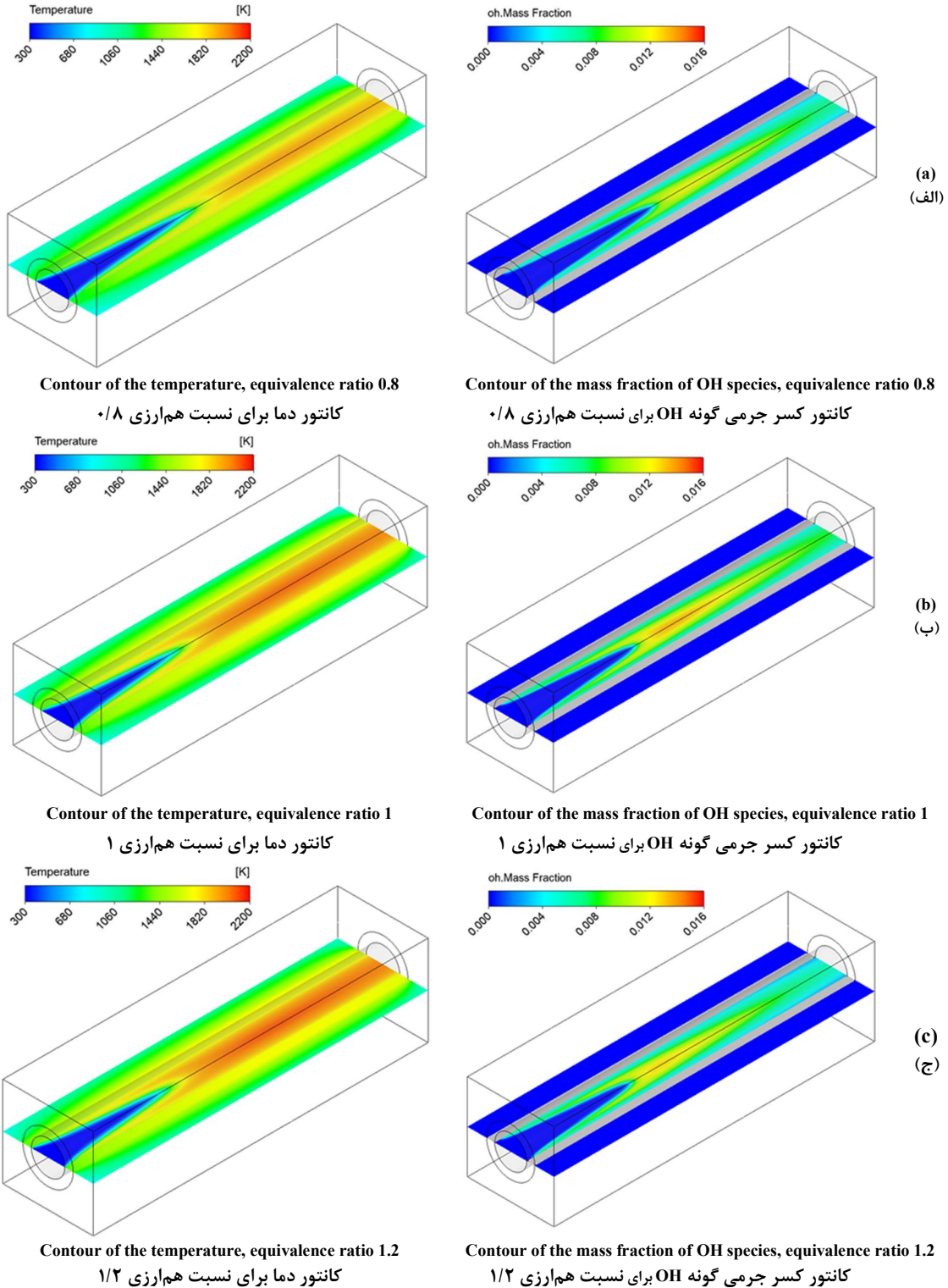


Figure 10- distribution contours of the mass fraction of OH species and temperature for the equivalence ratios of 0.8 (a), 1 (b), and 1.2 (c) for a straight tube, Inlet velocity 8 m/s and thermal conductivity coefficient 6.7 W/m·K

شکل ۱۰- کانتورهای توزیع کسر جرمی گونه OH و دما برای نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸ (الف)، ۱ (ب) و ۱/۲ (ج) برای لوله مستقیم،

سرعت جریان ورودی ۸ m/s و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K

شکل ۱۱ تغییرات کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) را بر روی خط مرکزی و در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸، ۱ و ۱/۲ نشان می‌دهد. مقادیر بیشینه کسر جرمی گونه OH در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸، ۱ و ۱/۲ به ترتیب برابر ۰/۰۱۱۸، ۰/۰۱۳۴ و ۰/۰۱۲۷ است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در نسبت هم‌ارزی ۱، مقدار کسر جرمی در بیشینه مقدار خود قرار دارد که علت آن رخ دادن احتراق استوکیومتریک است. همچنین مقدار بیشینه کسر جرمی در نسبت هم‌ارزی ۱/۲ بیشتر از ۰/۸ است که این به علت این پدیده ورود سوخت بیشتر به محفظه احتراق و صورت پذیرفتن یک واکنش کامل نسبت به نسبت هم‌ارزی ۰/۸ است. با توجه به شکل ۱۱-ب می‌توان دریافت مقدار بیشینه دما در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸، ۱ و ۱/۲ به ترتیب برابر با ۱۹۵۳ K، ۲۰۶۸ K و ۲۱۰۰ K است. علت این افزایش مربوط به افزایش انرژی حرارتی آزاد شده به علت ورود سوخت بیشتر به محفظه احتراق است. همچنین شکل ۱۱ نشان می‌دهد مکان مقادیر بیشینه کسر جرمی گونه OH و دما نسبت به ورودی لوله مستقیم و برای نسبت‌های هم‌ارزی بیان شده به ترتیب برابر ۴/۳۱۵ mm، ۳/۸ mm و ۳/۶۸ mm است، این موضوع بیانگر این نکته بوده که با افزایش نسبت هم‌ارزی و به علت افزایش دبی سوخت ورودی به محفظه، سرعت سوزش شعله افزایش می‌یابد و از آنجایی که محل این مقادیر بیشینه، محل تعادل سرعت سیال ورودی و سرعت سوزش شعله است، محل این مقادیر بیشینه به ورودی نزدیک شده است.

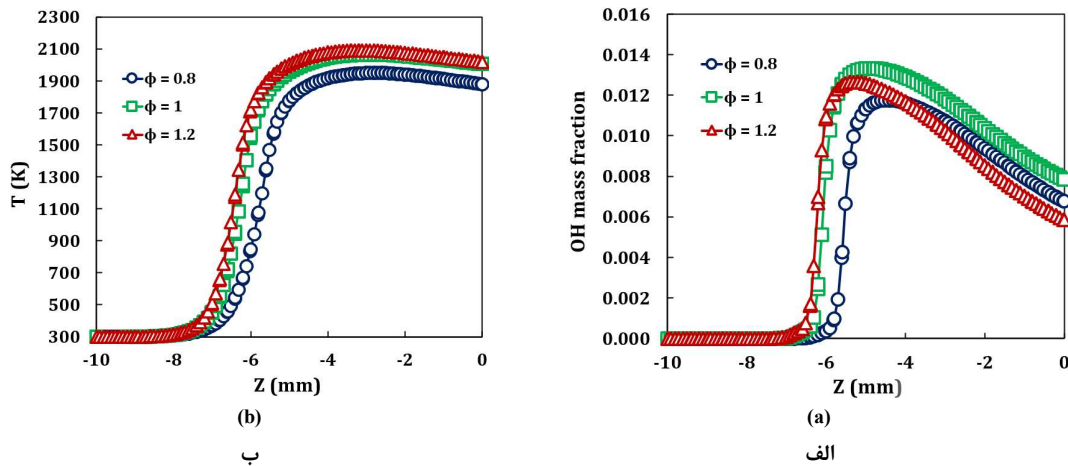


Figure 11- Distribution of the mass fraction of OH species (a) and temperature (b) along the central line of the straight tube at different equivalence ratios, Inlet velocity 8 m/s and thermal conductivity coefficient 6.7 W/m·K

شکل ۱۱- تغییرات کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) بر روی خط مرکزی لوله مستقیم برای نسبت‌های هم‌ارزی، سرعت ورودی ۸ m/s و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K

در ادامه اثر تغییر نسبت هم‌ارزی بر توزیع کسر جرمی گونه OH و دما در تک لوله U شکل بررسی شده است. شکل ۱۲ نشان‌دهنده تغییر کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) بر روی خط مرکزی عبور کرده از لوله U شکل، نشان داده شده در شکل ۱-ب، است. با توجه به شکل ۱۲-الف می‌توان پی برد مقدار بیشینه گونه OH در نسبت هم‌ارزی یک به دست آمده است و مقدار آن برابر ۰/۰۱۳۴ است در حالی که برای نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸ و ۱/۲، این مقادیر به ترتیب برابر ۰/۰۱۱۸ و ۰/۰۱۲۷ است. برخلاف مقدار بیشینه کسر جرمی گونه OH، مقدار بیشینه دما با افزایش نسبت هم‌ارزی روندی افزایشی داشته است و مقادیر بیشینه دما برای نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸، ۱ و ۱/۲ به ترتیب برابر با ۱۹۶۳ K، ۲۰۸۰ K و ۲۱۰۶ K است. هرچه سرعت سوزش شعله بیشتر باشد، جبهه شعله به ورودی محفظه احتراق نزدیک‌تر می‌شود و از طرفی سرعت شعله وابسته به پارامترهایی از قبیل نوع سوخت، دمای شعله، میزان حرارت تولید شده و اتلاف از محفظه احتراق است و از آنجایی که با افزایش نسبت هم‌ارزی، سوخت بیشتری وارد محفظه احتراق میکرو می‌شود به دنبال آن حرارت بیشتری نیز تولید می‌شود، این حرارت تولیدی بیشتر باعث افزایش سرعت سوزش شعله و در نتیجه حرکت آن به سمت بالادست جریان می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد،

مکان مقدار بیشینه کسر جرمی گونه OH و دما که به‌نوعی بیانگر مکان جبهه شعله هستند برای نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸، ۱ و ۱/۲ به ترتیب در فاصله‌های ۴/۲۳، ۳/۷۷ و ۳/۶ میلی‌متری نسبت به ورودی جریان قرار می‌گیرند.

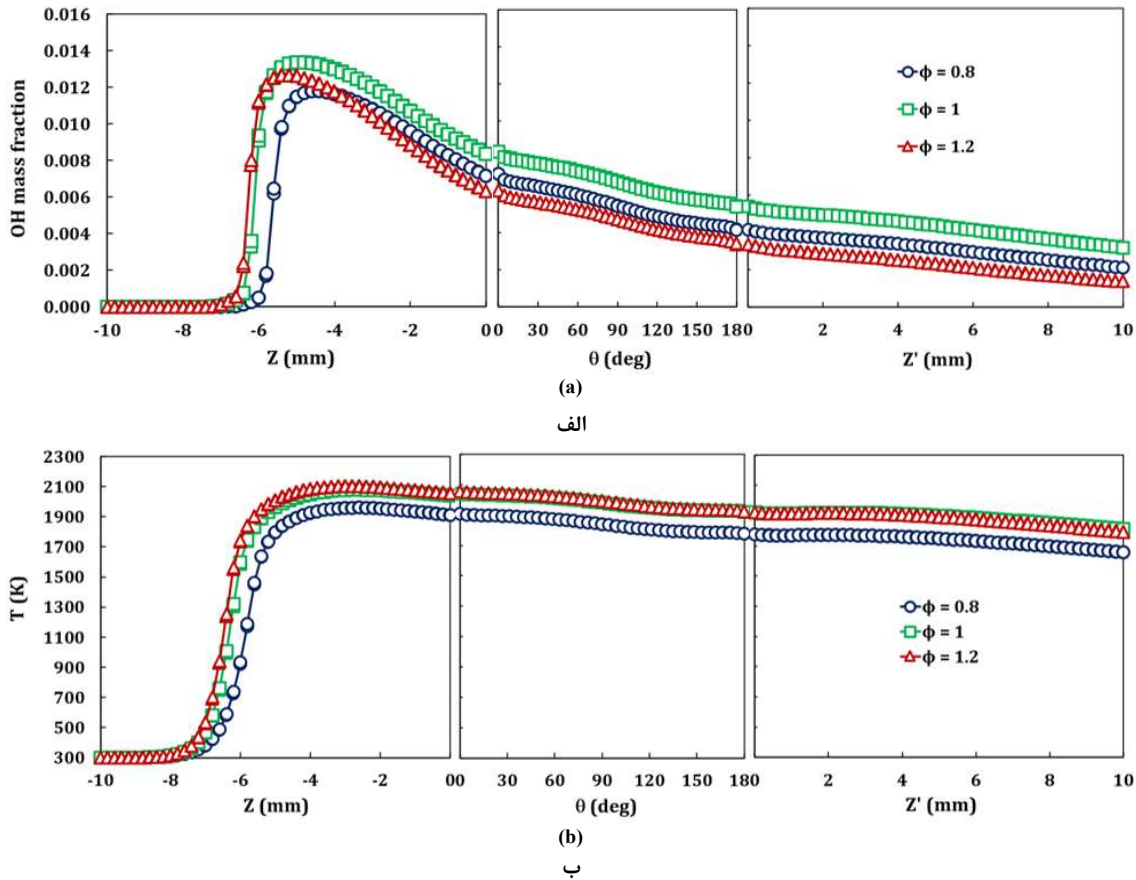


Figure 12- Distribution of the mass fraction of OH species (a) and temperature (b) along the central line of the U-shaped tube at different equivalence ratios, Inlet velocity 8 m/s and thermal conductivity coefficient 6.7 W/m·K

شکل ۱۲- تغییرات کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) بر روی خط مرکزی لوله U شکل برای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف، سرعت ورودی ۸ m/s و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K

در ادامه به بررسی اثر تغییر نسبت هم‌ارزی بر توزیع کسر جرمی گونه OH و دما در محفظه احتراق شامل دو لوله U شکل پرداخته شده است. شکل ۱۳ نشان‌دهنده توزیع کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) بر روی خط مرکزی عبور کرده از لوله‌های U شکل بر اساس تغییر نسبت هم‌ارزی است. نتایج نشان می‌دهد، مقدار بیشینه کسر جرمی گونه OH در لوله‌های بالا و پایین برابر است و برای نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸، ۱ و ۱/۲ مقدار آن به ترتیب برابر ۰/۰۱۱۹، ۰/۰۱۳۵ و ۰/۰۱۲۷ است. همچنین براساس شکل ۱۳-الف می‌توان پی‌برد توزیع کسر جرمی گونه بررسی شده، در لوله‌های بالا و پایین دارای تقارن است. با توجه به شکل ۱۳-ب می‌توان پی‌برد با افزایش نسبت هم‌ارزی و به‌علت ورود سوخت بیشتر به محفظه دمای شعله روندی افزایشی داشته است و مقدار آن برای نسبت‌های هم‌ارزی بیان شده به ترتیب برابر ۱۹۷۸ K، ۲۱۰۰ K و ۲۱۲۵ K است. با توجه به شکل ۱۳ مشخص است که با افزایش نسبت هم‌ارزی، مکان مقدار بیشینه کسر جرمی گونه OH و دما به سمت بالادست جریان حرکت می‌کند، زیرا با افزایش سوخت ورودی، مقدار دمای بیشینه شعله افزایش یافته و سرعت سوزش شعله بیشتر می‌شود. از آنجایی که مکان جبهه شعله محل تعادل سرعت جریان ورودی و سرعت سوزش شعله است، با افزایش سرعت سوزش شعله، جبهه آن به سمت بالادست جریان حرکت می‌کند.

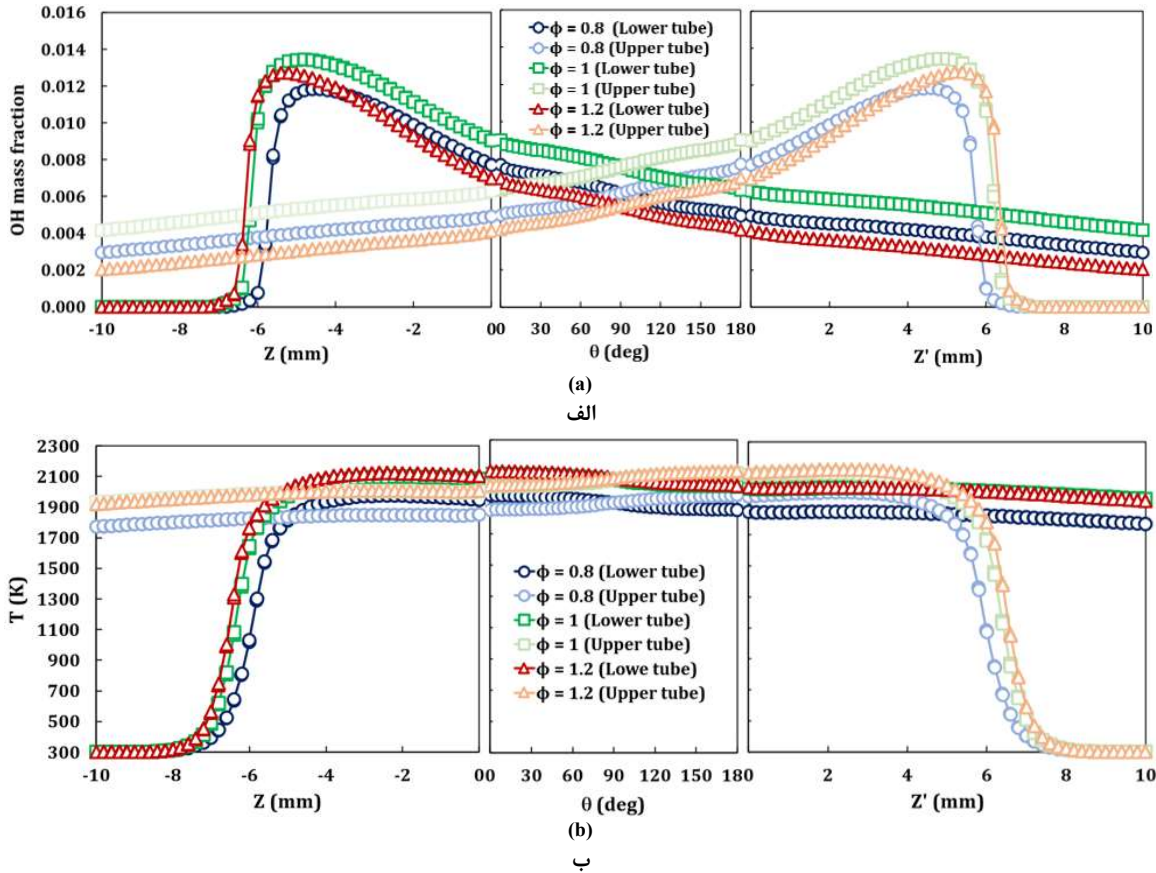


Figure 13- Distribution of the mass fraction of OH species (a) and temperature (b) along the central lines of the dual U-shaped tubes at different equivalence ratios, inlet flow Inlet velocity 8 m/s and thermal conductivity coefficient 6.7 W/m·K

شکل ۱۳- تغییرات کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) بر روی خط مرکزی لوله‌های U شکل دوتایی برای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف، سرعت ورودی ۸ m/s و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K

### بررسی اثر تغییر ضریب رسانش حرارتی دیواره بر مشخصه‌های احتراق

در این قسمت به بررسی اثر تغییر ضریب رسانش حرارتی بر توزیع کسر جرمی گونه OH و دما پرداخته شده است. از کوارتز، تیتانیوم و استیل با ضریب رسانش حرارتی ۱/۱۸ W/m.k، ۶/۷ W/m.K و ۱۲/۶۳ W/m.K در این تحقیق استفاده شده است. همچنین سرعت جریان ورودی و نسبت هم‌ارزی ثابت و به ترتیب برابر ۸ m/s و ۱ در نظر گرفته شده است. شکل ۱۴ نشان‌دهنده توزیع کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) بر روی خط مرکزی لوله مستقیم و براساس تغییر ضریب رسانش حرارتی سه ماده ذکر شده است.

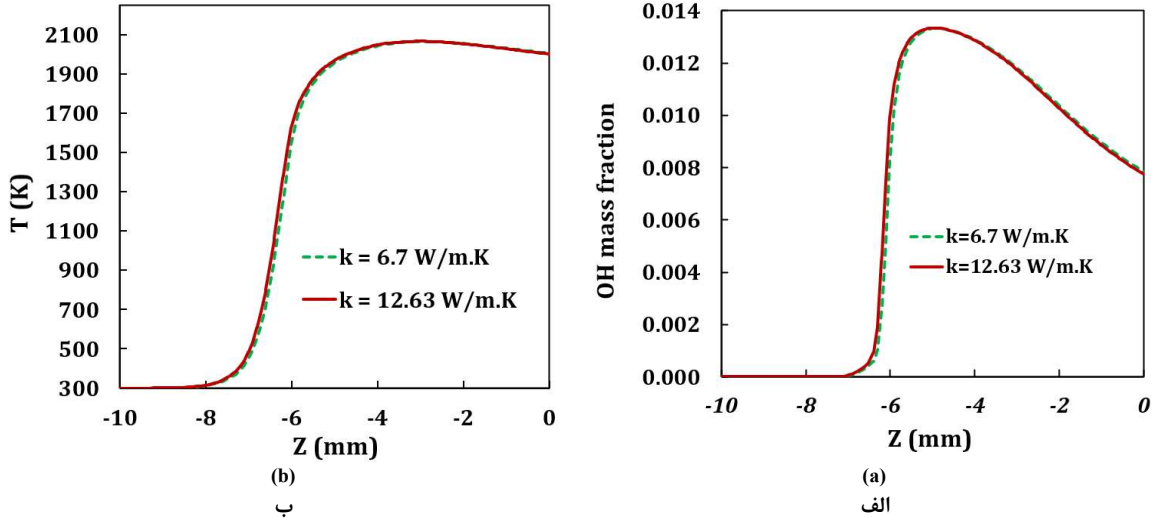
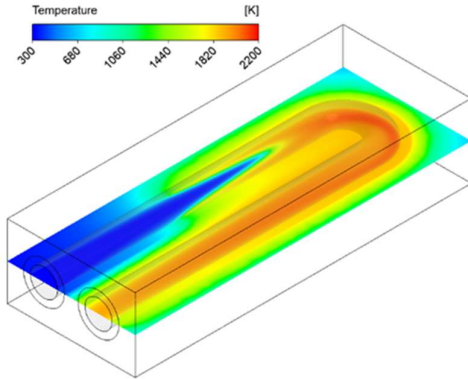


Figure 14- Distribution of the mass fraction of OH species (a) and temperature (b) along the central line of the straight tube at different thermal conductivity coefficients, Inlet velocity 8 m/s and equivalence ratio 1  
 شکل ۱۴- تغییرات کسر جرمی گونه OH (الف) و دما (ب) بر روی خط مرکزی لوله مستقیم برای ضرایب رسانشی متفاوت، سرعت ورودی ۸ m/s و نسبت هم‌ارزی ۱

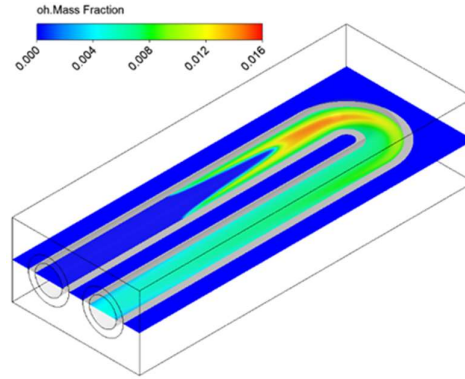
با توجه به شکل ۱۴ می‌توان دریافت با افزایش ضریب رسانش حرارتی، مقدار بیشینه کسر جرمی گونه OH و دما افزایشی جزئی را تجربه کرده است. همچنین افزایش ضریب رسانش حرارتی از مقدار ۶/۷ W/m.K به ۱۲/۶۳ W/m.K باعث شده مکان مقدار بیشینه کسر جرمی گونه OH و دما کمی به سمت ورودی محفظه احتراق حرکت کند که این عامل می‌تواند باعث افزایش پایداری بیشتر فرایند احتراق شود. اگرچه این انتظار وجود داشت با افزایش ضریب رسانش حرارتی و به‌علت رخ دادن بهتر عمل پیش‌گرمایش، مکان بیشینه مقدار کسر جرمی گونه OH و دما، جهش قابل توجه‌تری به سمت ورودی محفظه احتراق داشته‌باشد، اما به‌علت افزایش حرارت اتلافی از دیواره‌های محفظه احتراق با افزایش ضریب رسانش حرارتی و کاهش سرعت سوزش شعله در نتیجه اتلاف حرارتی، این امر محقق نشده است.

در ادامه به بررسی اثر ضریب رسانش حرارتی مواد بیان شده بر توزیع کسر جرمی گونه OH و دما در تک لوله U شکل پرداخته شده است. شکل ۱۵ نشان‌دهنده کانتورهای توزیع کسر جرمی گونه OH و دما در یک لوله U شکل برای ضرایب رسانش حرارتی مواد مختلف است. مقایسه نتایج لوله مستقیم و U شکل نشان می‌دهد شعله در محفظه احتراق با لوله U شکل بر خلاف لوله مستقیم در هنگام استفاده از کوارتز پایدار می‌ماند. علت این پدیده مربوط به بازچرخش گرما در محفظه احتراق میکرو در زمان استفاده از لوله U شکل است. در این حالت حرارت تولید شده توسط واکنش به سیال ورودی منتقل می‌شود و حرارت منتقل شده باعث افزایش بیشینه دمای جبهه شعله می‌شود، که به آن انتالپی اضافی می‌گویند. انتالپی اضافی باعث پیش‌گرمایش سیال ورودی می‌شود و سرعت سوزش شعله افزایش می‌یابد. افزایش سرعت سوزش باعث حرکت جبهه شعله به سمت بالادست جریان و پایداری بهتر شعله می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۱۵ می‌توان دریافت با افزایش ضریب رسانش حرارتی مقدار بیشینه کسر جرمی گونه OH و دما به سمت بالادست جریان حرکت کرده است.



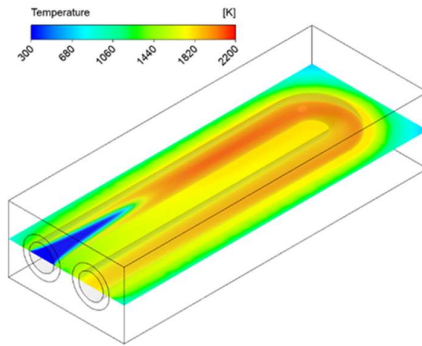
Contour of the temperature, thermal conductivity coefficient 1.18 W/m.K

کانتور دما برای ضریب رسانش حرارتی ۱/۱۸ W/m.K



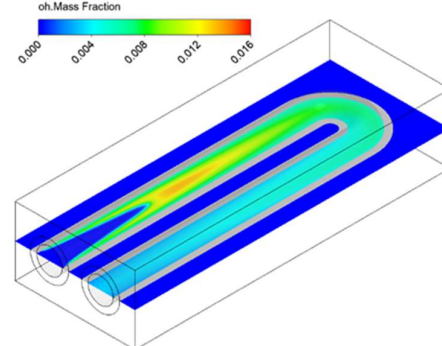
Contour of the mass fraction of OH species, thermal conductivity coefficient 1.18 W/m.K

کانتور کسر جرمی گونه OH برای ضریب رسانش حرارتی ۱/۱۸ W/m.K



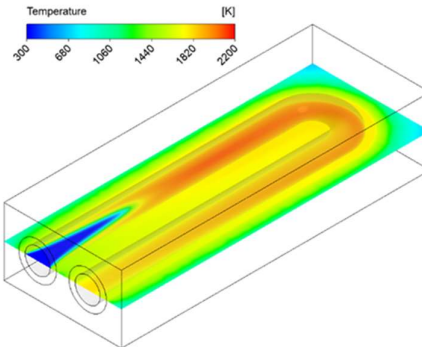
Contour of the temperature, thermal conductivity coefficient 6.7 W/m.K

کانتور دما برای ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K



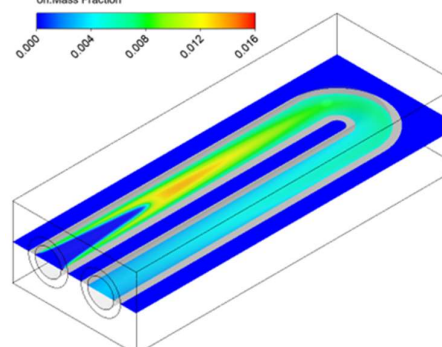
Contour of the mass fraction of OH species, thermal conductivity coefficient 6.7 W/m.K

کانتور کسر جرمی گونه OH برای ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K



Contour of the temperature, thermal conductivity coefficient 12.63 W/m.K

کانتور دما برای ضریب رسانش حرارتی ۱۲/۶۳ W/m.K



Contour of the mass fraction of OH species, thermal conductivity coefficient 12.63 W/m.K

کانتور کسر جرمی گونه OH برای ضریب رسانش حرارتی ۱۲/۶۳ W/m.K

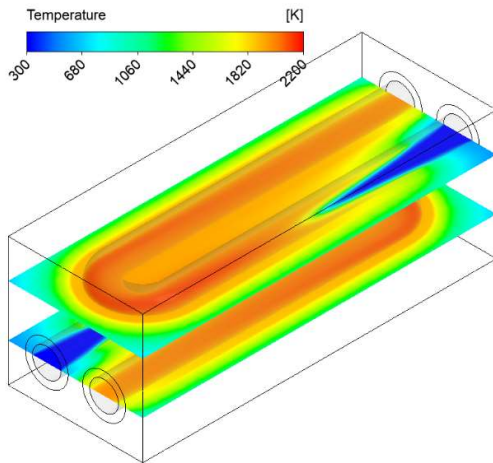
Figure 15- distribution contours of the mass fraction of OH species and temperature for thermal conductivity of 1.18 W/m.K (a), 6.7 W/m.K (b), and 12.63 W/m.K (c) for the U-shaped tube, inlet flow Inlet velocity 8 m/s and equivalence ratios

شکل ۱۵- کانتورهای توزیع کسر جرمی گونه OH و دما برای ضرایب رسانش حرارتی ۱/۱۸ W/m.K (الف)، ۶/۷ W/m.K (ب) و ۱۲/۶۳ W/m.K

برای لوله U شکل، سرعت جریان ورودی ۸ m/s و نسبت هم‌ارزی ۱

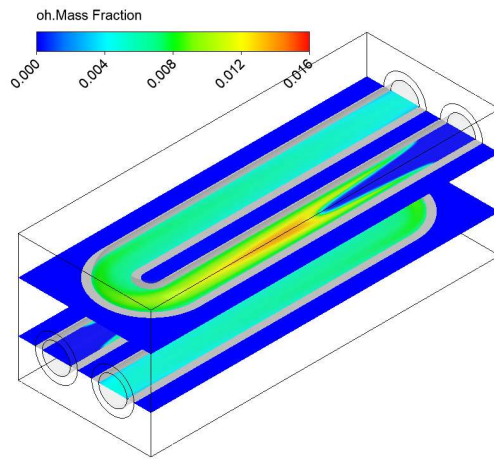
نتایج نشان می‌دهد در زمان استفاده از تک لوله U شکل، فاصله مقدار بیشینه دما از مکان ورودی محفظه احتراق، در هنگام استفاده از کوارتز برابر  $8/35$  mm است در حالی که در زمان استفاده از تیتانیوم این مقدار به  $3/77$  mm کاهش یافته است. با انتخاب ماده‌ای با ضریب رسانش حرارتی بیشتر، نظیر استیل، فاصله پارامتر بیان شده به  $3/69$  mm کاهش می‌یابد.

شکل ۱۶ نشان‌دهنده کانتورهای توزیع کسر جرمی گونه OH و دما در ساختار ماژولار دوتایی است. با مقایسه شکل‌های ۱۵-الف و ۱۶-الف می‌توان بیان کرد، در هنگام استفاده از کوارتز، در ساختار ماژولار دوتایی مکان جبهه شعله به مقدار قابل توجهی، نسبت به زمان استفاده از تک لوله مستقیم، به ورودی نزدیک شده است. این پدیده نشان‌دهنده اثر قابل توجه پیش‌گرمایش سیال بر پایداری شعله، به خصوص در زمان استفاده از مواد با ضریب رسانش حرارت پایین در دیواره است. اگرچه در تک لوله U شکل، بازچرخش گرما باعث گرم شدن سیال ورودی می‌شود، اما در ساختار ماژولار به علت انتقال حرارت بیشتر به سیال ورودی توسط لوله دیگر، سیال ورودی حرارت بیشتری دریافت کرده و فاصله کوتاه‌تری را جهت رسیدن به دمای شعله‌وری طی کرده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد، بیشینه دمای شعله حاصل از احتراق در زمان استفاده از کوارتز برابر  $2121$  K بوده است و با تغییر جنس آن به تیتانیوم این مقدار بیشینه دما به  $2099$  K رسیده است. با انتخاب استیل که ضریب رسانش حرارتی بیشتری از تیتانیوم دارد، دما افزایشی جزئی را تجربه کرده و به  $2102$  K رسیده است. این الگو نشان می‌دهد در زمان استفاده از کوارتز عدم اتلاف حرارت باعث افزایش بیشینه مقدار دما شده است و در زمان استفاده از استیل، فرایند پیش‌گرمایش تا حدودی توانسته با افزایش انتالپی سیال ورودی، اتلاف حرارت را جبران نماید.



Contour of the temperature, thermal conductivity coefficient  $1.18$  W/m.K

کانتور دما برای ضریب رسانش حرارتی  $1/18$  W/m.K

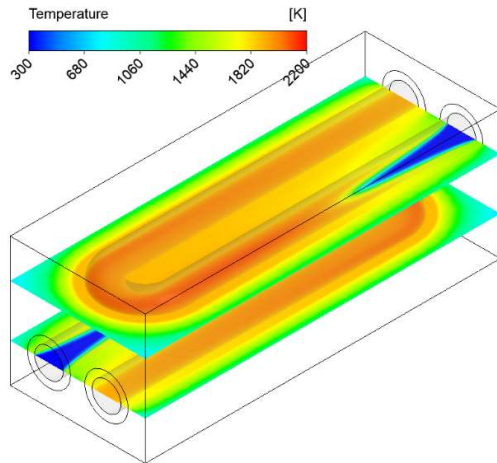


(a)  
(الف)

Contour of the mass fraction of OH species, thermal conductivity coefficient  $1.18$  W/m.K

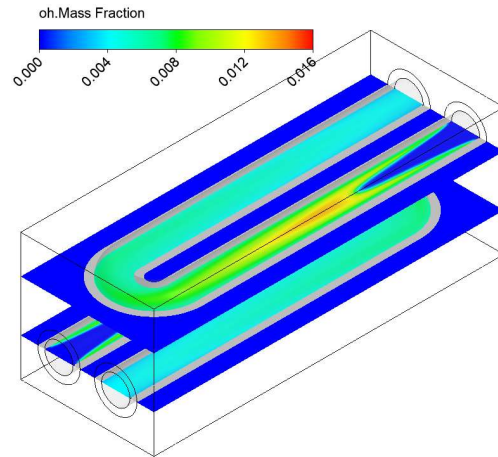
کانتور کسر جرمی گونه OH برای ضریب رسانش حرارتی  $1/18$  W/m.K

۱/۱۸



Contour of the temperature, thermal conductivity coefficient 6.7 W/m.K

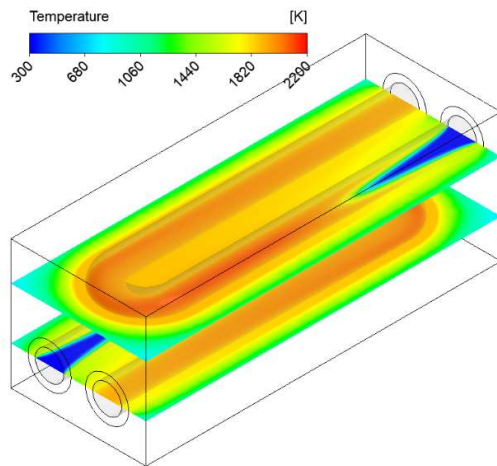
کانتور دما برای ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K



Contour of the mass fraction of OH species, thermal conductivity coefficient 6.7 W/m.K

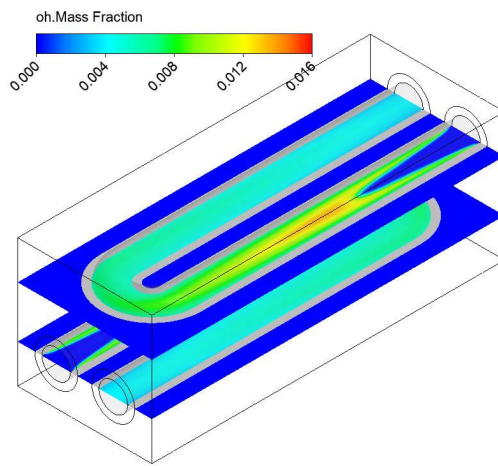
کانتور کسر جرمی گونه OH برای ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K

(ب)  
(ب)



Contour of the temperature, thermal conductivity coefficient 12.63 W/m.K

کانتور دما برای ضریب رسانش حرارتی ۱۲/۶۳ W/m.K



Contour of the mass fraction of OH species, thermal conductivity coefficient 12.63 W/m.K

کانتور کسر جرمی گونه OH برای ضریب رسانش حرارتی ۱۲/۶۳ W/m.K

(ج)  
(ج)

Figure 16- distribution contours of the mass fraction of OH species and temperature for thermal conductivity of 1.18 W/m.K (a), 6.7 W/m.K (b), and 12.63 W/m.K (c) for dual U-shaped tubes, inlet flow Inlet velocity 8 m/s and equivalence ratios

شکل ۱۶- کانتورهای توزیع کسر جرمی گونه OH و دما برای ضرایب رسانش حرارتی ۱/۱۸ W/m.K (الف)، ۶/۷ W/m.K (ب) و ۱۲/۶۳ W/m.K

(ج) ۱۲/۶۳ برای لوله‌های U شکل دوتایی، سرعت جریان ورودی ۸ m/s و نسبت هم‌ارزی ۱

### بررسی جبهه شعله، کشیدگی شعله و بازده حرارتی کل

در ادامه به بررسی جبهه شعله و کشیدگی آن برای حالت‌های مختلف لوله میکرو پرداخته شده است. برای تعیین جبهه شعله و کشیدگی آن یک خط هم‌تراز که با خطوط سفید نقطه‌چین در شکل ۱۷ نشان داده شده، تعریف شده است که مقدار آن برابر با نصف مقدار بیشینه کسر جرمی گونه هیدروژن ( $H_2$ ) است. جهت محاسبه کشیدگی شعله، دو نقطه بر روی خط هم‌تراز معرفی شده و این نقاط با زیرنویس‌های F و T تعریف شده است و طول کشیدگی برابر با فاصله بین نقاط F و T در راستای محور Z است.

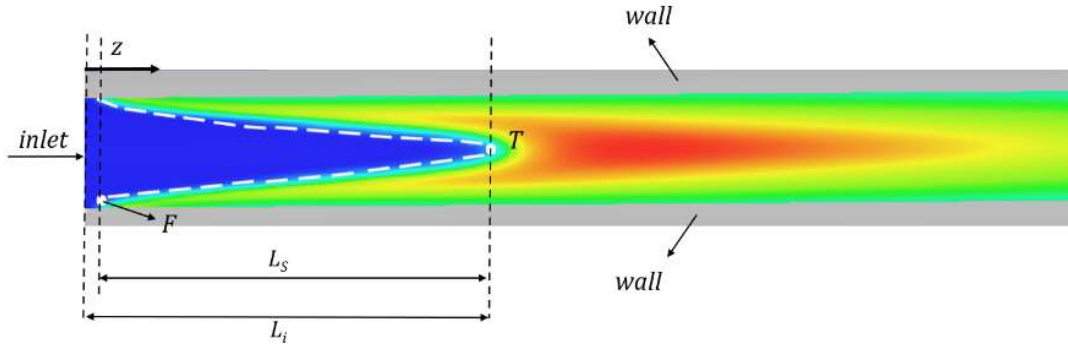
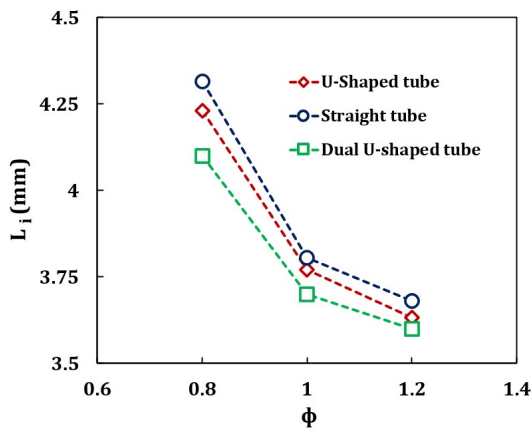
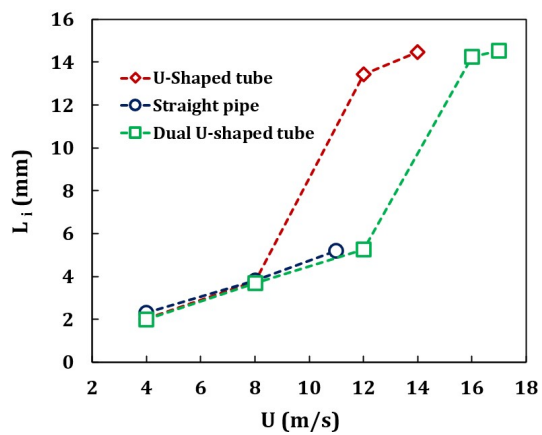


Figure 17- Parameters displayed on a section of the U-shaped tube to determine the flame front distance and flame stretch  
 شکل ۱۷- پارامترهای نشان داده شده بر روی قسمتی از لوله U شکل جهت تعیین فاصله جبهه شعله و کشیدگی شعله

شکل‌های ۱۸-الف)، (ب) و (ج) به ترتیب نشان‌دهنده اثر تغییرات سرعت جریان ورودی، نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش حرارتی بر مکان جبهه شعله نسبت به ورودی محفظه احتراق است. مکان جبهه شعله با افزایش سرعت افزایش یافته‌است زیرا مخلوط ورودی سوخت-هوا، فرصت کافی برای رسیدن به دمای شروع احتراق را نداشته‌است. با توجه به شکل ۱۸-الف می‌توان دریافت در سرعت جریان ورودی ۱۲ m/s، مکان جبهه شعله نسبت به ورودی در لوله U شکل دوتایی به مقدار قابل توجهی کاهش یافته‌است. این پدیده به علت افزایش سرعت سوزش شعله در لوله‌های دوتایی U شکل است. همچنین شکل ۱۸-ب نشان می‌دهد با تغییر نسبت هم‌ارزی، مکان جبهه شعله در لوله‌های دوتایی U شکل به ورودی نزدیک‌تر است که این می‌تواند به پایداری بهتر شعله منجر شود. در قسمت‌های قبل اشاره شد در لوله مستقیم و در زمان استفاده از دیواره کوارتز، شعله پایداری تشکیل نمی‌شود، اما استفاده از تک لوله U شکل منجر به ایجاد شعله پایدار می‌شود. شکل ۱۸-ج نشان می‌دهد ساختار دوتایی لوله‌های U شکل در زمان استفاده از کوارتز نه تنها باعث ایجاد یک شعله پایدار شده، بلکه فاصله جبهه شعله نسبت به ورودی را به مقدار قابل توجهی کاهش داده است که این یکی از مهم‌ترین مزیت‌های استفاده از ساختار ماژولار دوتایی است.



(b)  
ب



(a)  
الف

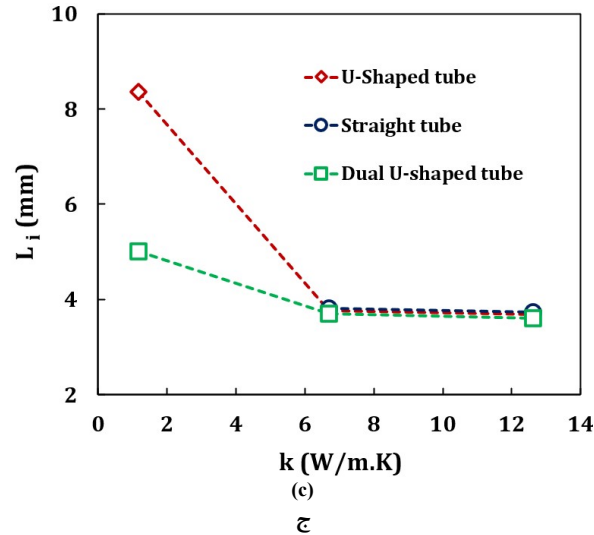


Figure 18- The effect of variations in inlet flow, equivalence ratio, and thermal conductivity coefficient on the distance of the flame front from the micro-combustor entrance; equivalence ratio 1 and thermal conductivity coefficient 6.7 W/m.K (a), inlet velocity 8 m/s and thermal conductivity coefficient 6.7 W/m.K (b), inlet velocity 8 m/s and equivalence ratio 1 (c)

شکل ۱۸- بررسی اثر تغییرات سرعت، نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش حرارتی بر فاصله جبهه شعله نسبت به ورودی محفظه احتراق، نسبت هم‌ارزی ۱ و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K (الف)، سرعت ورودی ۸ m/s و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K (ب) و سرعت ورودی ۸ m/s و نسبت هم‌ارزی ۱ (ج)

شکل‌های ۱۹-الف)، (ب) و (ج) به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات طول کشیدگی شعله براساس تغییرات سرعت جریان ورودی، نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش حرارتی است. با توجه به شکل ۱۹-الف می‌توان دریافت با افزایش سرعت جریان ورودی، کشیدگی شعله افزایش یافته‌است. همچنین با توجه به شکل ۱۹-الف مشخص می‌شود در سرعت جریان ورودی ۱۲ m/s، کشیدگی شعله در تک لوله U شکل کمتر از لوله‌های دوتایی U شکل است. علت این پدیده مربوط به تشکیل جبهه شعله در قسمت منحنی شکل لوله، در زمان استفاده از تک لوله U است. درحالی‌که در زمان استفاده از لوله‌های دوتایی، جبهه شعله در سرعت جریان ورودی ۱۲ m/s، در قسمت مستقیم لوله تشکیل شده است. از آنجایی‌که در قسمت منحنی شکل لوله سرعت محلی سیال کمتر است، گرادیان سرعت و در نتیجه تنش برشی کمتر است و کشیدگی شعله نیز کاهش یافته است.

از دیگر نکات قابل توجه کاهش کشیدگی شعله با افزایش نسبت هم‌ارزی و افزایش ضریب رسانش حرارتی است. زیرا افزایش این دو پارامتر باعث افزایش سرعت سوزش شعله می‌شود و افزایش سرعت سوزش شعله نیز باعث کاهش گرادیان سرعت جریان ورودی می‌شود. با توجه به نکات بیان شده و شکل‌های ۱۹-ب) و (ج) کشیدگی شعله کاهش یافته‌است و این پدیده به‌خوبی خود را در لوله‌های دوتایی U شکل و در زمان استفاده از کوارتز نشان داده است.

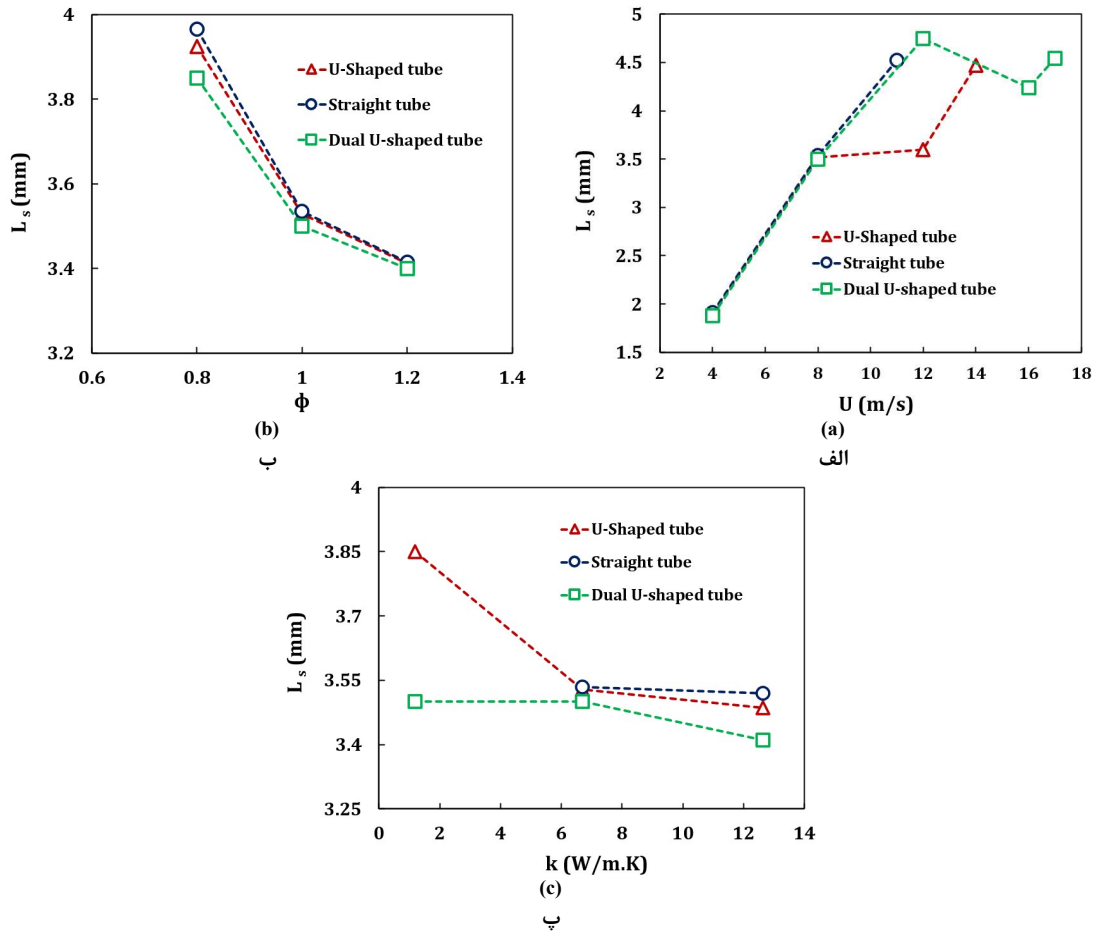


Figure 19- The effect of variations in inlet flow, equivalence ratio, and heat conduction coefficient on flame stretch; equivalence ratio 1 and thermal conductivity coefficient 6.7 W/m.K (a), inlet velocity 8 m/s and thermal conductivity coefficient 6.7 W/m.K (b), inlet velocity 8 m/s and equivalence ratio 1 (c)

شکل ۱۹- بررسی اثر تغییرات سرعت، نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش حرارتی بر طول کشیدگی شعله، نسبت هم‌ارزی ۱ و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K (الف)، سرعت ورودی ۸ m/s و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K (ب) و سرعت ورودی ۸ m/s و نسبت هم‌ارزی ۱ (ج)

شکل‌های ۲۰ - (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب نشان‌دهنده اثرات تغییر سرعت، نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش بر بازده حرارتی کل است. همان‌طور که اشاره شد برای تبدیل حرارت تشعشعی حاصل از سطح محفظه احتراق میکرو به الکتروسیسته از سلول‌های ترموفتوولتاییک با بازده ۲۰٪ استفاده شده است. با توجه به شکل ۲۰ می‌توان دریافت بازده حرارتی کل تک لوله U شکل، بیشتر از سایر هندسه‌ها بوده است و لوله مستقیم نیز کمترین بازده حرارتی کل را داشته است. توجه به شکل ۲۰-الف این نکته را آشکار می‌سازد که مطلب بیان شده تنها در سرعت جریان ورودی ۱۲ m/s نقض شده است و لوله‌های دوتایی U شکل بازده حرارتی بیشتری داشته‌اند. علت این پدیده مربوط به تشکیل جبهه شعله در قسمت مستقیم لوله‌های دوتایی U شکل است، زیرا باعث توزیع یکنواخت دما بر روی سطح محفظه احتراق شده است. با توجه به شکل‌های ۲۰-الف) و (ب) می‌توان دریافت، بازده حرارتی کل با افزایش سرعت جریان ورودی و نسبت هم‌ارزی روندی کاهشی داشته است. علت این پدیده مربوط به افزایش سوخت ورودی به محفظه احتراق با افزایش سرعت و نسبت هم‌ارزی است، زیرا بازده حرارتی کل براساس رابطه‌های ۱۳ و ۱۵، نسبت عکس با مقدار حرارت آزاد شده دارد. همچنین شکل ۲۰-ج نشان می‌دهد، بازده حرارتی کل با افزایش ضریب رسانش حرارتی، افزایش یافته است. علت این رخداد مربوط به توزیع یکنواخت‌تر دما در محفظه احتراق است زیرا با افزایش ضریب رسانش حرارتی، حرارت بیشتری از ناحیه واکنش به سایر نقاط منتقل شده است.

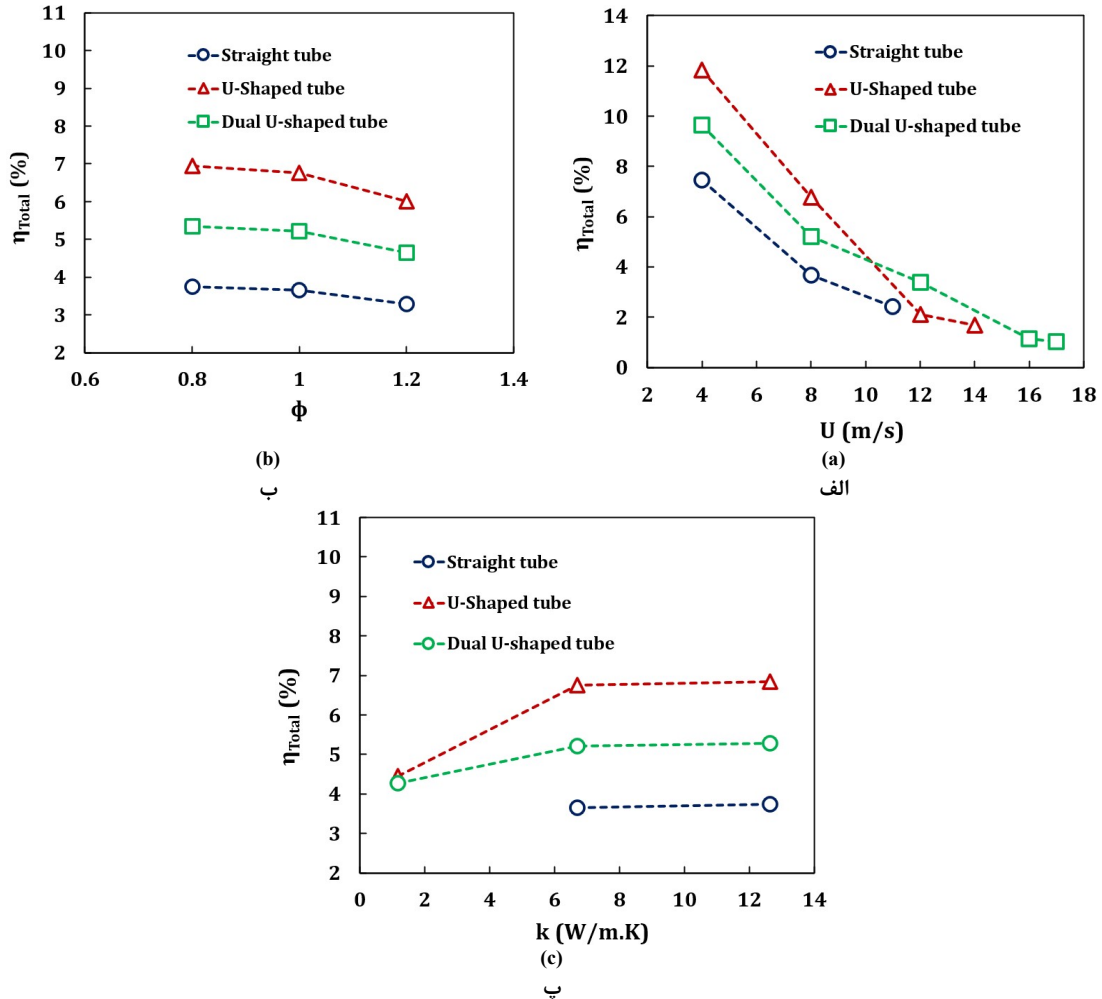


Figure 20- Effect of variations in inlet flow, equivalence ratio, and thermal conductivity coefficient on total thermal efficiency; equivalence ratio 1 and thermal conductivity coefficient 6.7 W/m.K (a), inlet velocity 8 m/s and thermal conductivity coefficient 6.7 W/m.K (b), inlet velocity 8 m/s and equivalence ratio 1 (c)

شکل ۲۰- بررسی اثر تغییرات سرعت، نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش حرارتی بر بازده حرارتی کل، بازده سلول‌های ترموفوتوولتاییک ۲۰٪، نسبت هم‌ارزی ۱ و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K (الف)، سرعت ورودی ۸ m/s و ضریب رسانش حرارتی ۶/۷ W/m.K (ب) و سرعت ورودی ۸ m/s و نسبت هم‌ارزی ۱ (ج)

## نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی عددی مشخصه‌های احتراقی شعله حاصل از مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در لوله مستقیم، تک لوله U شکل و لوله‌های دوتایی U شکل پرداخته‌است. پارامترهای مورد بررسی شامل سرعت جریان ورودی، نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش حرارتی بوده است. نتایج به‌دست آمده به‌صورت خلاصه به شرح زیر است.

- افزایش سرعت جریان ورودی تأثیر چشمگیری بر مکان شعله و شکل آن دارد به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت جریان ورودی، مکان جبهه شعله به سمت پایین‌دست جریان حرکت می‌کند و کشیدگی شعله نیز به‌واسطه افزایش تنش برشی، افزایش پیدا کرده است.
- افزایش نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش حرارتی باعث حرکت مکان جبهه شعله به سمت بالادست جریان می‌شود. زیرا با افزایش نسبت هم‌ارزی، سوخت بیشتری وارد محفظه شده و مقدار دمای بیشینه شعله افزایش می‌یابد و این افزایش

دمای شعله باعث افزایش سرعت سوزش شعله می‌شود. افزایش ضریب رسانش حرارتی نیز باعث انتقال حرارت بیشتر به سیال ورودی شده و با افزایش انتالپی سیال ورودی، مقدار بیشینه دمای شعله را افزایش می‌دهد. با افزایش نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش حرارتی، کشیدگی شعله به علت افزایش سرعت سوزش شعله، کاهش یافته‌است.

- بررسی ساختارهای متفاوت نشان داد، هندسه استفاده شده در محفظه احتراق میکرو تأثیر زیادی بر حد شعله‌وری دارد. به نحوی که در زمان استفاده از لوله مستقیم، شعله در سرعت جریان ورودی ۱۲ m/s دچار خاموشی شده است، درحالی‌که این مقدار برای تک لوله U شکل و لوله‌های دوتایی U شکل به ترتیب برابر ۱۵ m/s و ۱۸ m/s بوده است. همچنین مشخص شد در زمان استفاده از مواد با ضریب رسانش پایین، شعله در لوله مستقیم خاموش می‌شود، اما در زمان استفاده از تک لوله U شکل و لوله‌های U شکل دوتایی پایدار مانده‌است.
- نتایج نشان داد اگرچه استفاده از ساختار ماژولار دوتایی باعث پایداری بهتر شعله می‌شود، اما از نظر بازده حرارتی کل عملکرد ضعیفی داشته است. زیرا با وجود آزاد شدن انرژی حرارتی بیشتر در حین واکنش، انرژی تشعشعی منتشر شده از دیواره محفظه احتراق افزایش قابل توجهی را تجربه نکرده‌است. برای سرعت‌های جریان ورودی ۴ m/s و ۶ m/s ۸ بازده حرارتی کل در تک لوله مستقیم به ترتیب برابر ۱۱/۸۳ و ۶/۷۶ درصد است، درحالی‌که برای ساختار ماژولار لوله‌های دوتایی مقادیر بیان شده به ترتیب برابر ۹/۶۳ و ۵/۲۱ درصد است.
- قابل ذکر است که مقالات مرتبط با بررسی پایداری شعله در لوله U محدود است و یکی از کارهای انجام شده در این زمینه مربوط به پژوهش علی پور و سعیدی [۱۳] است. به طوری که در این مقاله اشاره شده است که با افزایش سرعت جریان ورودی، جبهه شعله به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کند، که نتایج مشابه مقاله در پژوهش حاضر نیز به دست آمد. همچنین آن‌ها نشان دادند، با استفاده از ساختار ماژولار می‌توان عمل پیش گرمایش را بهبود داد. در پژوهش حاضر نیز نشان داده شد استفاده از ساختار ماژولار، به خصوص در زمانی که ضریب رسانش حرارتی پایین است، می‌تواند با انجام عمل پیش گرمایش و افزایش انتالپی سیال ورودی، باعث حرکت جبهه شعله به سمت بالادست جریان و در نتیجه افزایش پایداری شعله شود. به عنوان مثال، فاصله جبهه شعله نسبت به ورودی برای محفظه احتراق شامل تک لوله U شکل برابر ۸/۳۵ mm است، درحالی‌که این مقدار در زمان استفاده از ساختار ماژولار دوتایی، به ۵ mm کاهش یافته است.

## مراجع

- [1] J. Li, S. K. Chou, W. M. Yang, and Z. W. Li, 'Experimental and numerical study of the wall temperature of cylindrical micro combustors', *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 19, no. 1, 2009, doi: 10.1088/0960-1317/19/1/015019.
- [2] 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*, vol. 44, no. 1, pp. 396-409, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.06.015.
- [3] S. Akhtar, J. C. Kurnia, and T. Shamim, 'A three-dimensional computational model of H<sub>2</sub>-air premixed combustion in non-circular micro-channels for a thermo-photovoltaic (TPV) application', *Appl Energy*, vol. 152, pp. 47-57, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.068.
- [4] Jiaqiang, E., Liu, H., Zhao, X., Han, D., Peng, Q., Zuo, W., ... & Qiu, R. (2018). Investigation on the combustion performance enhancement of the premixed methane/air in a two-step micro combustor. *Applied Thermal Engineering*, 141, 114-125.
- [5] Z. Zhang, K. Wu, W. Yao, R. Yuen, and J. Wang, 'Enhancement of combustion performance in a microchannel: Synergistic effects of bluff-body and cavity', *Fuel*, vol. 265, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116940.
- [6] 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', *Int J Heat Mass Transf*, vol. 66, pp. 72-79, 2013, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.024.
- [7] 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', *Appl Therm Eng*, vol. 62, no. 1, pp. 13-19, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.09.010.

- [8] M. Ansari and E. Amani, 'Micro-combustor performance enhancement using a novel combined baffle-bluff configuration', *Chem Eng Sci*, vol. 175, pp. 243–256, 2018, doi: 10.1016/j.ces.2017.10.001.
- [9] T. Cai, Y. Sun, and D. Zhao, 'Enhancing heat transfer performance analyses of a hydrogen-fueled meso-combustor with staggered bluff-bodies', *Fuel Processing Technology*, vol. 218, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.fuproc.2021.106867.
- [10] K. A. S. Raghavan, S. S. Rao, and V. R. K. Raju, 'Numerical investigation of the effect of slit-width on the combustion characteristics of a micro-combustor with a centrally slotted bluff body', *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 14, pp. 5696–5707, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.064.
- [11] K. H. Lee and O. C. Kwon, 'Studies on a heat-recirculating microemitter for a micro thermophotovoltaic system', *Combust Flame*, vol. 153, no. 1–2, pp. 161–172, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.combustflame.2008.01.003.
- [12] G. Bagheri and S. E. Hosseini, 'Impacts of inner/outer reactor heat recirculation on the characteristic of micro-scale combustion system', *Energy Convers Manag*, vol. 105, pp. 45–53, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.07.056.
- [13] A. Alipoor and M. H. Saidi, 'Numerical study of hydrogen-air combustion characteristics in a novel micro-thermophotovoltaic power generator', *Appl Energy*, vol. 199, pp. 382–399, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.027.
- [14] A. Tang, T. Cai, J. Deng, Y. Xu, and J. Pan, 'Experimental investigation on combustion characteristics of premixed propane/air in a micro-planar heat recirculation combustor', *Energy Convers Manag*, vol. 152, pp. 65–71, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.09.011.
- [15] J. Chen, W. Song, and D. Xu, 'Thermal management in catalytic heat-recirculating micro-combustors: A computational fluid dynamics study', *Appl Therm Eng*, vol. 160, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114073.
- [16] J. Chen and Z. Pang, 'Catalytically stabilized combustion characteristics of methane-air mixtures in micro-scale heat-recirculating systems', *Fuel*, vol. 306, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121693.
- [17] Abbaspour, P., & Alipoor, A. (2024). Numerical study of wavy-wall effects on premixed H<sub>2</sub>/air flammability limits, propagation modes, and thermal performance of micro combustion chambers. *Applied Energy*, 359, 122727.
- [18] Burke, M. P., Chaos, M., Ju, Y., Dryer, F. L., & Klippenstein, S. J. (2012). Comprehensive H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> kinetic model for high-pressure combustion. *International Journal of Chemical Kinetics*, 44(7), 444-474.
- [19] Peng, Q., Wu, Y., Jiaqiang, E., Yang, W., Xu, H., & Li, Z. (2019). Combustion characteristics and thermal performance of premixed hydrogen-air in a two-rearward-step micro tube. *Applied Energy*, 242, 424-438.

## English Abstract

# Numerical Investigation of Modular Structures in a U-Shaped Micro-Combustor on Combustion Characteristics of Hydrogen-Air Premixed Mixtures for Micro thermophotovoltaic Applications

Hamed Mohammadi<sup>1</sup>, Alireza Alipoor<sup>2\*</sup>

1- School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran, hamed.mohammadi@hafez.shirazu.ac.ir

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

\*Corresponding author

(Received: 2024/11/24, Received in revised form: 2025/01/10, Accepted: 2025/01/11)

Enhancing the flammability limit in micro-combustors can be effectively achieved through the implementation of modular structures, facilitating their application across varying power outputs. This study examines the performance of different geometries, including a single straight tube, a single U-shaped tube, and a modular double U-shaped tube configuration. The effects of inlet flow velocity, equivalence ratio, and thermal conductivity coefficient on the combustion characteristics of a hydrogen-air premixed mixture are investigated. The results demonstrate that the use of single U-shaped tubes and modular double U-shaped tube configurations increases the flammability limit for inlet velocities by 27% and 54%, respectively, compared to single straight tubes. Additionally, the modular structure reduces flame stretch and the flame front distance from the inlet, enhancing flame stability. A comparison of geometries reveals that the single U-shaped tube achieves the highest total thermal efficiency, whereas the single straight tube exhibits the lowest. Furthermore, for the straight tube, single U-shaped tube, and dual U-shaped tubes the highest total thermal efficiency is observed at an equivalence ratio of 0.8, beyond which efficiency decreases. Analysis of the thermal conductivity coefficient indicates that increasing this parameter enhances total thermal efficiency across all geometries, with the highest efficiency achieved using steel with a thermal conductivity coefficient of 12.63 W/m.K.

**Keywords:** Hydrogen, Flammability Limit, Radiation Efficiency, Micro thermophotovoltaics