

بررسی تاثیر هندسه محفظه و مشخصات مخلوط ورودی بر پایداری احتراق در ابعاد میکرو و تاثیر آن‌ها بر بازده تشعشعی محفظه میکرو

حسین فرامرزیپور^۱، کیومرث مظاهری^۲ و علیرضا علی‌پور^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، h.faramarzpour@modares.ac.ir
۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران (نویسنده مخاطب)، kiumars@modares.ac.ir
۳- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، a.alipoor@modares.ac.ir
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۱، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۵/۴/۱۳، پذیرش: ۹۵/۵/۱۱)

چکیده: در این مطالعه، به بررسی تأثیر وجود پله بر حد بیرون‌زدگی شعله و دمای دیواره خارجی محفظه احتراق، در ابعاد میکرو، پرداخته شده است. همچنین، تأثیر نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی و ضریب انتقال حرارت رسانی محفظه احتراق بر بازده تشعشعی مطالعه شده است. تأثیر پله از دو دیدگاه مورد مطالعه قرار گرفته است. در بخش اول، تأثیر وجود پله، و در بخش دوم تأثیر اندازه پله و قطر محفظه مطالعه شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که وجود پله بازه سرعت مخلوط ورودی برای بیرون‌زدگی شعله را وسیع‌تر می‌کند. همچنین، ارتفاع کمتر پله باعث افزایش دمای متوسط دیواره محفظه می‌شود. مطالعات درباره نقش قطر محفظه نشان داد که محفظه با قطر بیشتر دمای بیشتری برای دیواره خارجی محفظه حاصل می‌کند. بخش دیگر این مطالعه بیانگر اثر جنس محفظه و نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی بر بازده تشعشعی محفظه است. براساس نتایج این پژوهش، حداکثر بازده تشعشعی مخلوط هیدروژن و هوا در نسبت‌های هم‌ارزی رقیق حاصل می‌شود. همچنین، مطالعات نشان داد، جهت حصول حداکثر بازده تشعشعی، ضریب انتقال حرارت رسانی باید مقداری بهینه داشته باشد.

کلیدواژگان: احتراق در ابعاد میکرو، نسبت هم‌ارزی، بازده تشعشعی

مقدمه

با رشد فزاینده لوازم الکترونیکی قابل‌حمل، نظیر لپتاپ‌ها و گوشی‌های موبایل، و همچنین پردازنده‌های مورد استفاده در سفینه‌های فضایی و ماهواره‌ها به سیستم تامین انرژی کوچک با چگالی انرژی بالا نیاز است، در حالی که چگالی انرژی باتری‌های لیتیومی متداول در حدود 0.2 KWh/Kg است. بنابراین، یافتن ماده‌ای با چگالی انرژی بالا حائز اهمیت است. سوخت‌های هیدروکربنی با چگالی انرژی 10 KWh/kg ، حدود ۵۰ برابر باتری‌های لیتیومی معمولی، چگالی انرژی دارند. از آنجا که یکی از مناسب‌ترین روش‌های آزادکردن انرژی سوخت‌های هیدروکربنی احتراق است، ساخت مبدلی که بتواند، در عین کوچکی اندازه، انرژی گرمایی را به الکتریسیته تبدیل می‌تواند آینده تامین انرژی لوازم الکترونیکی را برای مدت‌های مدید تضمین کند. می‌توان از ترموفتولتائیک ژنراتورها به‌عنوان نمونه‌ای مناسب برای استفاده به‌عنوان سیستم تامین انرژی به‌جای باتری‌های لیتیومی نام برد. در احتراق در ابعاد میکرو، انتقال حرارت از دیواره محفظه دو نقش ایفا می‌کند. از طرفی باعث افت حرارتی محفظه شده و خاموشی حرارتی را حاصل می‌کند و از طرف دیگر، با پیش‌گرم کردن مخلوط ورودی، به احتراق پایدار کمک می‌کند. دمای دیواره خارجی بر بازده تشعشعی محفظه نیز تاثیر بسزایی دارد. بازده تشعشعی به‌صورت نسبت انرژی تشعشعی خروجی از سطح محفظه به انرژی حاصل از احتراق سوخت تعریف می‌شود. پن و همکاران [۱] در تحقیقی آزمایشگاهی از محفظه احتراق در مقیاس میکرو به‌عنوان عامل تشعشع‌کننده در میکروژنراتور ترموفتولتائیک استفاده کردند.

آن‌ها، در این تحقیق، تاثیر نسبت هم‌ارزی مخلوط هیدروژن-هوا، قطر محفظه و همچنین، ضخامت دیواره را بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها، حداکثر دمای سطح خارجی دیواره محفظه احتراق برای مخلوط هیدروژن و هوا در مقادیر رقیق حاصل می‌شود. همچنین، با توجه به نتایج تحقیق ایشان، محفظه با دیواره نازک‌تر دمای بالاتری برای دیواره خارجی ایجاد می‌کند. نورتون و ولاکوس [۲]، در شبیه‌سازی عددی احتراق مخلوط استوکیومتری متان-هوا، تاثیر پارامترهای فیزیکی محفظه و جریان، ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و همچنین سرعت مخلوط ورودی به محفظه را بر مکان شعله و دمای دیواره بررسی کردند. براساس گزارش آن‌ها، اگرچه کاهش ضریب انتقال حرارت رسانشی دیوار منجر به کاهش اتلاف حرارت از محفظه احتراق می‌شود، ولی شعله را در مکانی دورتر از ورودی محفظه شکل می‌دهد. دلیل این امر، کاهش پیش‌گرم‌شدن مخلوط ورودی است. طبق گزارش آن‌ها، با افزایش ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره تا مقداری مشخص، شعله به سمت ورودی محفظه حرکت می‌کند، ولی، بعد از آن مقدار مشخص، مکان شعله، به علت افزایش اتلاف حرارت، به سمت خروجی محفظه حرکت می‌کند. براساس این تحقیق، هرکدام از پارامترهای فوق دارای مقداری بهینه‌اند. اما احتراق میکرو، علاوه بر عدم امکان خوداشتعالی، با مشکلات دیگری نیز روبه‌روست. عدم امکان کنترل مکان شعله، و همچنین تاثیرپذیر بودن زیاد نسبت به مخلوط ورودی از مشکلات دیگر این پدیده است. این مشکل را می‌توان با قراردادن مانع در مسیر سیال ورودی و همچنین ایجاد پله در محفظه برطرف کرد. محفظه مورد استفاده در ژنراتور ترموفتولتائیک باید، علاوه بر اندازه کوچک، دمای یکنواخت در سطح و همچنین بیشینه دمای ممکن در دیواره را داشته باشد. یانگ و همکاران [۳] احتراق در محفظه میکرو در حضور و عدم حضور پله را، به منظور بررسی تاثیر وجود پله به صورت آزمایشگاهی، مورد بررسی قرار دادند. ایشان گزارش کردند که استفاده از پله منجر به یکنواختی دما در دیواره خارجی، افزایش اختلاط و افزایش زمان ماندگاری مخلوط در محفظه می‌شود. همچنین، ایشان بیان کردند که استفاده از پله در محفظه امکان احتراق هرچه کامل‌تر را در محفظه فراهم می‌کند. بیگ‌محمدی و همکاران [۴] تاثیر وجود مانع پله‌دار کاتالیستی در مرکز محفظه را به صورت عددی بررسی کردند. براساس نتایج آن‌ها استفاده از مانع کاتالیستی با پله، به همراه ضریب انتقال حرارت رسانشی بالا، پایداری شعله به خصوص در سرعت‌های بالا را افزایش می‌دهد. زروندی و همکاران [۵]، در شبیه‌سازی عددی، تاثیر اضافه کردن هیدروژن به مخلوط متان/هوا را بررسی کردند. براساس نتایج، اضافه کردن هیدروژن، علاوه بر پایداری شعله، استفاده از این محفظه را برای ترموفتولتائیک ژنراتورها مناسب‌تر می‌کند. همچنین، بیگ‌محمدی و همکاران [۶] 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. لی و همکاران [۷]، در سال ۲۰۰۹، در محفظه احتراق استوانه‌ای در حضور پله، تاثیر پارامترهای هندسی شامل قطر محفظه و اندازه پله و تاثیر پارامترهای فیزیکی مخلوط، شامل نسبت هم‌ارزی و سرعت ورودی را به صورت تجربی بررسی کردند. براساس نتایج پژوهش ایشان، افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۶ تا ۰/۸ باعث افزایش قابل توجهی در دمای دیواره می‌شود، در حالی که افزایش نسبت هم‌ارزی تا ۱ تاثیر بسیار ناچیزی در دمای متوسط دیواره دارد. همچنین، ایشان گزارش کردند که افزایش قطر محفظه و همچنین اندازه پله تاثیر قابل توجهی بر مشخصه‌های محفظه احتراق نظیر دمای خارجی محفظه احتراق و همچنین حد بیرون‌زدگی شعله می‌گذارد. افزایش قطر محفظه، در قسمت بعد از پله، به طور قابل توجهی دمای متوسط دیواره را افزایش می‌دهد. به طور کلی انرژی وارد شده به محفظه با توان دوم قطر محفظه رابطه مستقیم دارد. چو و همکاران [۸]، تاثیر مواد متخلخل بر افزایش بازده ترموفتولتائیک ژنراتورها را در ابعاد میکرو به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها، در این تحقیق، احتراق مخلوط هیدروژن و هوا را در میکروبرنر، با افزودن مواد متخلخل، بررسی کردند. براساس نتایج آن‌ها، افزودن مواد متخلخل انتقال حرارت از محصولات احتراق به دیواره خارجی را افزایش داده و علاوه بر افزایش دما، توزیع یکنواخت‌تری از دما بر روی دیواره خارجی محفظه ایجاد می‌کند. وان و همکاران [۹]، در سال ۲۰۱۲، تاثیر حضور گوه بر حد بیرون‌زدگی شعله را بررسی کردند. براساس یافته آن‌ها، حضور گوه در داخل محفظه، علاوه بر افزایش دمای دیواره خارجی، حد بیرون‌زدگی شعله را

تا چند برابر افزایش می‌دهد. دینامیک احتراق در ابعاد میکرو نیز در سال‌های اخیر مورد علاقه محققان بسیاری قرار گرفته است. همان‌گونه که بیان شد، ناپایداری‌های به‌وجود آمده در محفظه احتراق میکرو باعث به‌وجود آمدن رژیم‌های متفاوت احتراق در محفظه احتراق می‌شود. براساس پارامترهای مختلف نظیر سرعت مخلوط ورودی به محفظه رژیم‌های متفاوت نظیر احتراق بدون شعله، خاموش-اشتعال مکرر، شعله پایا و متقارن، شعله پایا و نامتقارن و همچنین شعله لاله‌ای شکل در محفظه احتراق میکرو قابل تصور است. علی‌پور و همکاران [۱۰] به‌صورت عددی رفتار نامتقارن شعله در میکروبرنر را بررسی کردند. براساس نتایج آن‌ها، در عرض کم محفظه، شعله به‌صورت متقارن ظاهر می‌شود و رفتار نامتقارن شعله در عرض‌های بیشتر امکان‌پذیر است. همچنین، افزایش سرعت شعله نیز دلیل دیگر بر وجود رفتار نامتقارن شعله است. در تحقیق عددی دیگر، علی‌پور و همکاران [۱۱] دینامیک شعله در ابعاد میکرو را بررسی کردند. براساس نتایج آن‌ها، رژیم خاموشی-اشتعال مکرر در نزدیک حد پایین شعله‌وری ناشی از عدم برقراری تعادل بین مقیاس زمانی تعادل و مقیاس زمان اقامت مخلوط در محفظه به‌وجود می‌آید. این ناپایداری با افزایش سرعت مخلوط ورودی به رژیم پایای متقارن تبدیل شده و با افزایش بیش از حد سرعت این رژیم پایای متقارن ناشی از نفوذ ترجیحی گونه‌ها به‌صورت ناپایا و نامتقارن تبدیل می‌شود. در این تحقیق، رژیم شعله متقارن پایا مورد توجه است. با توجه به مقدمه مطرح‌شده، در این پژوهش، به‌صورت عددی به بررسی تاثیر وجود پله و همچنین پارامترهای آن بر مشخصه احتراق در ابعاد میکرو پرداخته شده است. همچنین، تاثیر نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی و جنس محفظه بر دمای دیواره و تاثیر آن بر بازده تشعشعی میکرومحفظه به‌صورت عددی مطالعه خواهد شد. به این منظور، احتراق پیش‌مخلوط هیدروژن-هوا در نسبت‌های هم‌ارزی معین در محفظه احتراق دوبعدی بررسی می‌شود. در این پژوهش، از سینتیک جزئی مارینف^۱ شامل ۹ گونه و ۲۷ واکنش (جدول ۱) استفاده شده است.

جدول ۱- واکنش احتراقی هیدروژن هوا در فاز گازی

Table 1- Gas-phase reaction mechanism of hydrogen air

Reactions	A	β	E_a (cal/mol)
OH+H ₂ =H+H ₂ O	2.14E+08	1.52	3449
O+OH=O ₂ +H	2.02E+14	-0.4	0.0
O+H ₂ =OH+H	5.06E+04	2.67	6290
H+O ₂ (+M)=HO ₂ (+M)	4.52E+13	0.0	0
H+O ₂ (+N ₂)=HO ₂ (+N ₂)	4.52E+13	0.0	0
H+O ₂ (+H ₂)=HO ₂ (+H ₂)	4.52E+13	0.0	0
H+O ₂ (+H ₂ O)=HO ₂ (+H ₂ O)	4.52E+13	0.0	0
OH+HO ₂ =H ₂ O+O ₂	2.13E+28	-4.827	-4.827
OH+HO ₂ =H ₂ O+O ₂	9.10E+14	0.0	0
H+HO ₂ =OH+OH	1.50E+14	0.0	0
H+HO ₂ =H ₂ +O ₂	8.45E+11	0.65	0.65
H+HO ₂ =O+H ₂ O	3.01E+13	0.0	0
O+HO ₂ =O ₂ +OH	3.25E+13	0.0	0
OH+OH=O+H ₂ O	3.57E+04	2.4	2.4
H+H+M=H ₂ +M	1.00E+18	-1.0	-1.0
H+H+H ₂ =H ₂ +H ₂	9.20E+16	-0.6	-0.6
H+H+H ₂ O=H ₂ +H ₂ O	6.00E+19	-1.25	-1.25
H+OH+M=H ₂ O+M	2.21E+22	-2.0	-2.0
H+O+M=OH+M	4.71E+18	-1.0	-1.0
O+O+M=O ₂ +M	1.89E+13	0.0	-1788.0
HO ₂ +HO ₂ =H ₂ O ₂ +O ₂	4.20E+14	0.0	11982
HO ₂ +HO ₂ =H ₂ O ₂ +O ₂	1.30E+11	0.0	1629-
OH+OH(+M)=H ₂ O ₂ (+M)	1.24E+14	-0.37	0.0
H ₂ O ₂ +H=HO ₂ +H ₂	1.98E+06	2.0	2435
H ₂ O ₂ +H=OH+H ₂ O	3.07E+13	0.0	4217
H ₂ O ₂ +O=OH+HO ₂	9.55E+06	2.0	3970
H ₂ O ₂ +OH=H ₂ O+HO ₂	2.40E+00	4.042	2162-

1. Marinov

به‌طور کلی، جریان در ابعاد میکرو به‌صورت آرام شبیه‌سازی می‌شود. در شبیه‌سازی شعله آرام، سازوکار^۱ اصلی انتشار شعله به‌صورت نفوذ مولکولی است. از این رو، به‌دست آوردن ضرایب نفوذ مولکولی بسیار حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر، ضرایب نفوذ چندتایی محاسبه می‌شود. از آنجا که شعله تمایلی ذاتی به ناپایداری دارد، و همچنین وجود پله در محفظه این تمایل را تقویت می‌کند، در رینولدزهای بحرانی (رینولدزهای حدود ۵۰۰) از حل مغشوش استفاده خواهد شد [۹].

وان و همکاران [۹] در گزارش خود خطای استفاده از حل آرام شعله برای جریان گذرنده از روی گوه را بیش از صد در صد بیان کردند. کو و رونی [۱۲] در شبیه‌سازی احتراق در محفظه احتراق ماریچ میکرو برای حل جریان با رینولدز بالاتر از ۵۰۰ از حل مغشوش استفاده کردند و گزارش دادند که استفاده از حل آرام در رینولدزهای بحرانی امکان افزایش خطا را افزایش می‌دهد. در پژوهش حاضر، محفظه احتراق مطلوب برای ژنراتور ترموفوتوولتائیک شبیه‌سازی شده و عوامل مطلوب بر آن (افزایش بازده تشعشعی) بررسی شده است.

معادلات حاکم

در پژوهش حاضر، به‌منظور شبیه‌سازی احتراق در ابعاد میکرو، معادلات ناویر-استوکس به‌همراه معادله انرژی و بقای گونه، به‌طور هم‌زمان، به کمک نرم‌افزار فلونت حل شده است. معادله بقای تکانه به‌صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu S) \quad (1)$$

در این روابط، ρ ، u و μ به‌ترتیب دانسیته، بردار سرعت و گرانشی دینامیکی اند. تانسور تنش (S) به‌صورت $\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u)I$ بیان می‌شود که I ماتریس واحد است. رابطه بقای انرژی به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \sum_{i=1}^N h_i \dot{\omega}_i \quad (2)$$

در این رابطه، λ ضریب هدایت حرارتی مخلوط و $c_{p,i}$ و h_i به‌ترتیب گرمای ویژه و انتالپی گونه i ام است. دو جمله سمت راست به‌ترتیب بیانگر انتقال حرارت هدایتی و انرژی آزادشده در اثر واکنش‌های شیمیایی است. با توجه به فرمولبندی عدد ماخ پایین، معادله حالت گاز کامل به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$P = \rho \frac{R}{W} T \quad (3)$$

در این رابطه، \bar{W} وزن مولکولی میانگین مخلوط و R ثابت گاز است. معادله بقای جرم برای گونه‌ها (N گونه) به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\rho \left(\frac{\partial Y_i}{\partial t} + u \cdot \nabla Y_i \right) = -\nabla \cdot (\rho Y_i V_i) + \dot{\omega}_i \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

دو جمله سمت راست به‌ترتیب بیانگر شار نفوذی مولکولی و نرخ تولید و یا مصرف گونه i ام بر واحد حجم است. V_i سرعت نفوذی گونه i ام است.

روش حل و شرایط مرزی

برای حل دستگاه معادلات، از روش حل فشار پایه استفاده شده است. در این تحقیق، برای گسسته‌سازی معادلات از روش بادسو^۲ مرتبه دو همراه با ضریب تخفیف برای معادله انرژی و فشار استفاده شده است. همچنین، برای کوپلینگ فشار و سرعت نیز از الگوریتم سیمپل^۳ با مقدار باقی‌مانده 10^{-6} بهره گرفته شد [۲]. در این تحقیق، برای شبیه‌سازی جریان اغتشاشی از روش

1. Mechanism
2. Upwind
3. SIMPLE

k-ε realizable استفاده شده است. این مدل اغتشاشی، در جریان‌های مغشوش چرخشی، نتایج بهتری را نسبت به مدل‌های دیگر پیش‌بینی می‌کند [۱۰]. برای بیان اندرکنش احتراق و جریان، از مدل احتراقی EDC استفاده شده است. جریان با سرعت و دمای مشخص وارد میکرومحفظه شده و در خروجی محفظه با فرض فشار اتمسفر و همچنین، گرادیان دمایی صفر خارج می‌شود. همچنین، شرط عدم لغزش (u=0) و مقدار گرادیان صفر برای گونه‌ها ($\frac{dY}{dn} = 0$) بر روی دیواره تنظیم می‌شود. بر روی سطح خارجی محفظه، انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشعی فرض شده است. به‌منظور شبیه‌سازی محیط آزمایشگاه ضریب صدور ۰/۸ و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی $h=5 \text{ W/m}^2/\text{k}$ در نظر گرفته شده است [۷]. در این پژوهش، برای حدس اولیه، دمای درون محفظه ۷۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. سیال، مطابق شکل ۱، وارد محفظه شده و پس از احتراق از خروجی خارج می‌شود. در شکل بالا، l_{in} و t, s, d, d_{in} به ترتیب قطر ورودی محفظه، قطر محفظه احتراق، ارتفاع پله، ضخامت دیواره، طول ناحیه ورودی به محفظه و طول محفظه احتراق است.

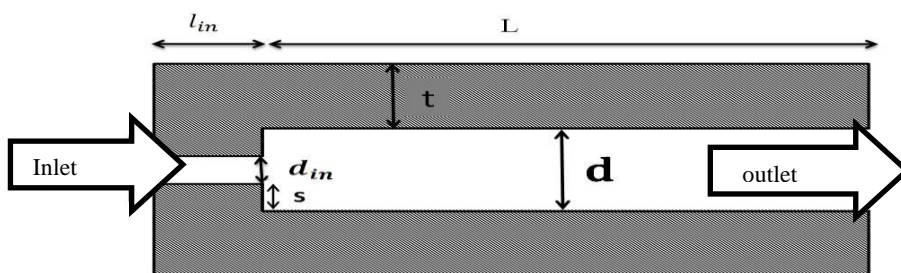


Figure 1- Schematic figure of micro combustion chamber
 شکل ۱ - طرحواره محفظه احتراق مورد شبیه سازی

ارائه نتایج و بحث

در مقدمه، بیان شد که در رینولدزهای بحرانی، به‌ویژه در حضور پله، حل اغتشاشی شعله و جریان حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر، ابتدا تأثیر حل مغشوش بررسی شده و پس از آن تأثیر مشخصات هندسی محفظه و همچنین سرعت و نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی بر دمای دیواره خارجی بررسی شده است. همچنین، تأثیر نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی و همچنین جنس محفظه احتراق بر بازده تشعشعی به‌عنوان عوامل موثر بر بازده تشعشعی بررسی شده است. بازده تشعشعی طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{\pi(d + 2t)\varepsilon\sigma \sum_{i=1}^N T_{W0,i}^4 L_i}{\dot{m}_{H_2} H_c} \quad (5)$$

در این رابطه، $T_{W0,i}$ دمای دیواره خارجی محفظه، H_c انرژی حرارتی آزاد شده در محفظه احتراق و d و t قطر و ضخامت محفظه و L_i طول هر مقطع است.

اعتبارسنجی و بررسی استقلال حل از اندازه شبکه محاسباتی

برای بررسی استقلال حل از اندازه شبکه، محفظه‌ای با پله با مشخصات $d_{in} = 1 \text{ mm}$ ، $d=2 \text{ mm}$ ، $s=0.5 \text{ mm}$ و به‌صورت شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود. برای بررسی استقلال حل از اندازه شبکه، توزیع دما بر روی محور تقارن محفظه در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۲ نشان داده شده است، نتایج با افزایش تعداد شبکه از ۴۰۶۸۰ به ۸۰۲۶۳ گره تغییری نمی‌کند. در این حالت، فاصله هر گره در راستای طولی ۰/۰۵ میلی‌متر و راستای عرضی ۰/۰۲ میلی‌متر است. به‌منظور راستی‌آزمایی نتایج، از نتایج تجربی مرجع [۷] استفاده شده است. به‌منظور حصول اطمینان از حل شعله مغشوش و کارایی مدل EDC، نتایج حل عددی با دو روش شعله آرنیوسی و شعله مغشوش با نتایج تجربی، طبق شکل ۳، مقایسه شده است.

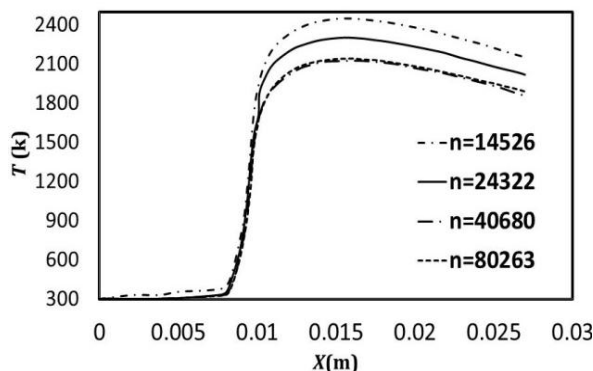


Figure 2- Temperature profile on the axis of combustion chamber for various grid size, $d=2$ mm, $s=0.5$ mm, $5W/m^2/K$, $K=20$ W/m/K
 شکل ۲- نمودار دما بر روی محور مرکزی محفظه احتراق در اندازه شبکه متفاوت (قطر محفظه ۲ mm، ارتفاع پله ۰.۵ mm و $h=5W/m^2/K$ و $K=20$ W/m/K)

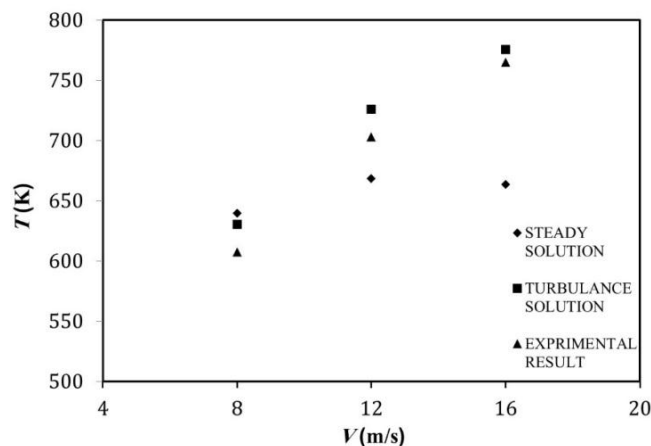


Figure 3- Comparing of mean wall temperature for combustore type 1 in laminar and turbulence flame with experimental result-
 Combustore diameter 2(mm), $s=0.5$ (mm), $h=5$ W/m²/K, $K=20$ W/m/K
 شکل ۳- مقایسه دمای متوسط دیواره محفظه نوع ۱ در حل شعله آرام و مغشوش با نتایج تجربی (قطر محفظه ۲ mm، ارتفاع پله ۰.۵ mm و $h=5W/m^2/K$ و $K=20$ W/m/K)

در شکل ۳، دمای متوسط دیواره خارجی محفظه احتراق نوع ۱ برای دو حل آرام و مغشوش در سرعت‌های مختلف رسم شده است. با توجه به شکل ۳، روند معنادار جدایی حل شعله آرام با حل مغشوش و نتایج تجربی پدیدار می‌شود. در سرعت ورودی ۸ متر بر ثانیه، حل آرام و مغشوش نزدیکی قابل قبولی با نتایج تجربی دارد. اما با افزایش سرعت و در نتیجه گذر به جریان مغشوش، حل آرام دچار خطا شده و کارایی لازم را ندارد. در این پژوهش، برای رینولدزهای بالاتر از ۵۰۰ حل مغشوش در نظر گرفته شده است.

تاثیر وجود پله

در این بخش، تاثیر هندسه محفظه بر مکان تشکیل شعله و پایداری آن بررسی می‌شود. مکان شعله، مکان بیشترین گرادیان دما در محصولات احتراق یا مکان حداکثر غلظت گونه OH تعریف می‌شود [۸، ۱۵]. به منظور مطالعه تاثیر پله بر حد بیرون‌زدگی شعله و بررسی تاثیر وجود پله بر توزیع دمایی دیواره خارجی، ابتدا جریان با سرعت‌های مختلف، براساس جدول ۲، در محفظه احتراق استوانه‌ای بدون پله شبیه‌سازی می‌شود. به منظور حصول اطمینان از تامین شرایط گرادیان دمای صفر در خروجی محفظه و همچنین عدم تاثیر امواج بازگشتی ناشی از حل عددی، طول محفظه ۲۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. اما ۶

میلی متر طول اولیه کانال برای بررسی در نظر گرفته شده است. ضخامت دیواره و همچنین قطر هر دو محفظه (محفظه با پله و محفظه بدون پله) ۲ میلی متر و نسبت هم‌ارزی مخلوط، ۱ است. برای یکسان‌سازی سرعت در محفظه‌های دارای پله و بدون پله نیاز است تا سرعت سیال در ورودی به محفظه احتراق محاسبه شود. این محاسبه براساس قانون پیوستگی انجام می‌گیرد. از آنجا که دبی ورودی به محفظه با دبی گذرنده از ناحیه با پله برابر است، در نتیجه سیال در ورود به محفظه احتراق کاهش سرعت خواهد داشت. سرعتی را که محفظه با پله در قسمت شروع پله مشاهده می‌کند سرعت معادل^۱ نامگذاری می‌کنند [۷]. این سرعت، با استفاده از قانون پیوستگی، در ناحیه ورود محفظه احتراق به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود [۷]. در این رابطه، U_{in} سرعت ورودی به محفظه، d_{in} قطر محفظه قبل از پله و d قطر محفظه بعد از پله است.

$$U_e = U_{in} * \left(\frac{d_{in}}{d}\right)^2 \quad (۶)$$

این شبیه‌سازی، طبق جدول ۲، برای محفظه با پله تکرار شده است. ارتفاع پله در محفظه ۱ میلی متر است. نتایج حاصل در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داد شده است. شکل ۴ توزیع دما بر روی محور تقارن محفظه احتراق استوانه‌ای بدون پله را نشان می‌دهد. شعله تا سرعت ورودی $11/5 \text{ m/s}$ در داخل محفظه احتراق به طول ۶ میلی متر باقی می‌ماند. اما، پس از این سرعت، دیگر در داخل محفظه احتراق شکل نمی‌گیرد. از طرفی، در همین شکل حد پایین شعله‌وری سرعت ورودی $1/5 \text{ m/s}$ است؛ به این معنی که در سرعت‌های پایین‌تر از این سرعت، شعله توانایی خودانتشاری را از دست می‌دهد. دلیل این امر افت حرارتی بالا درون محفظه احتراق است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه دما در محور مرکزی محفظه در سرعت $1/5 \text{ m/s}$ حدود 1100 کلوین است.

جدول ۲- مشخصات سرعت و رینولدز در نمونه‌های بررسی شده در محفظه احتراق استوانه‌ای بدون پله و با پله

Table 2- Velocity and Re number in studid combustion chambers with and without step

Combustore type	Velocity inlet (m/sec)	Re
Without step	1.5-12.5	32-220
With step	4-15.75	341-1334

در شکل ۵، نمودار توزیع دما در محور مرکزی محفظه احتراق استوانه‌ای در حضور پله در سرعت‌های متفاوت رسم شده است. با توجه به شکل ۵، به خوبی مشاهده می‌شود که چگونه شعله تا سرعت مخلوط ورودی حدود $15/75 \text{ m/s}$ در داخل محفظه احتراق در حضور پله تشکیل شده است. شکل ۵، همچنین، نشان می‌دهد که شعله حتی در سرعت‌های بالا، به دلیل وجود پله، در نزدیکی پله تشکیل می‌شود. در این شکل حد پایین سرعت 4 m/s است. در سرعت پایین‌تر از این سرعت، شعله به داخل قسمت قبل از پله کشیده می‌شود. با توجه به این شکل، دیده می‌شود که حد بالای بیرون‌زدگی شعله بیش از 20 درصد افزایش یافته است. همچنین، با مقایسه شکل‌های ۴ و ۵، دیده می‌شود که دما در محفظه احتراق میکرو با پله، افزایش 50 درجه‌ای دارد. بالاترین مقدار دما در محور مرکزی محفظه احتراق بدون پله در سرعت 4 m/s حدود 1500 کلوین است که در سرعت معادل آن در محفظه احتراق با پله این دما به 1550 کلوین می‌رسد. این افزایش دما، که به صورت متوسط در کل خط مرکزی یا دیواره خارجی مشاهده می‌شود، می‌تواند افزایش قابل توجهی در بازده سیستم‌های تشعشعی ایفا کند. نتیجه این مقایسه در شکل ۶ نشان داده شده است. طبق رابطه (۵)، افزایش دمای دیواره بازده تشعشعی محفظه را افزایش می‌دهد. تأثیری دیگری که پله بر توزیع دمایی در محور مرکزی محفظه ایجاد می‌کند یکنواختی بیشتر دما در محور مرکزی محفظه است. یانگ و همکارانش [۳] نیز تاثیر وجود پله بر توزیع دیواره خارجی محفظه و نقش آن بر افزایش تکامل احتراق و همچنین افزایش بازده تشعشعی میکروبرنر را تایید کرده‌اند. براساس این تحقیق، وجود پله افزایش دما، یکنواختی دما در محفظه و همچنین افزایش حد شعله‌وری را به دنبال دارد.

1. Equivalent velocity

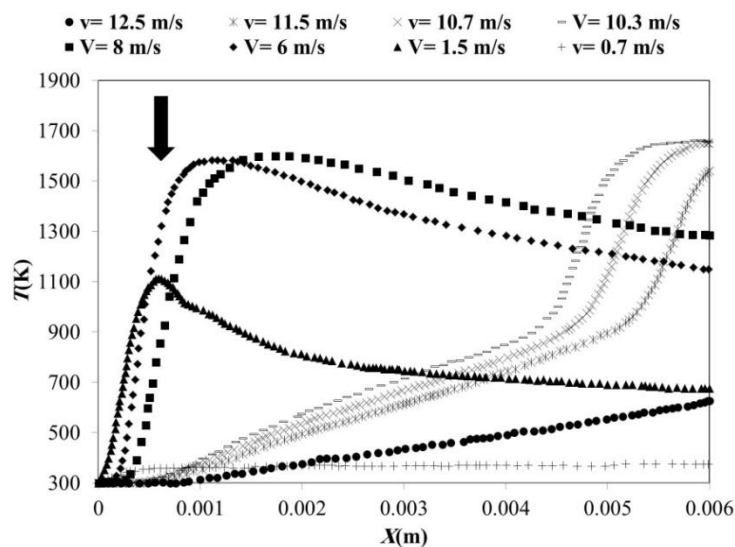


Figure 4- Temperature profile on the axis of micro combustion chamber without step- flame position for inlet velocity in 6 m/s is shown- $d=2\text{ mm}$, $h=5\text{ W/m}^2/\text{K}$, $K=20\text{ W/m/K}$
 شکل ۴- نمودار دما در محور مرکزی احتراق میکرو بدون پله-مکان شعله برای سرعت ۶ متر بر ثانیه با فلش مشخص شده است- قطر محفظه ۲ میلیمتر، $K=20\text{ W/m/K}$ و $h=5\text{ W/m}^2/\text{K}$

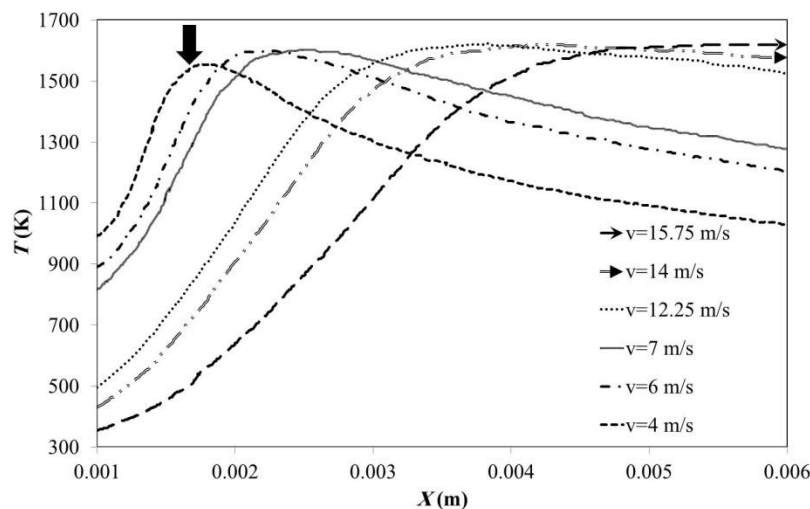


Figure 5- Temperature profile on the axis of micro combustion chamber without step- flame position for inlet velocity in 4 m/s is shown- $d=2\text{ mm}$, $h=5\text{ W/m}^2/\text{K}$, $K=20\text{ W/m/K}$
 شکل ۵- نمودار دما در محور مرکزی محفظه احتراق میکرو با پله-مکان شعله برای سرعت ۴ متر بر ثانیه با فلش مشخص شده است- ارتفاع پله ۰/۵ میلی‌متر، قطر محفظه احتراق ۲ میلی‌متر، $K=20\text{ W/m/K}$ ، $h=5\text{ W/m}^2/\text{K}$

در شکل ۶، دمای محور مرکزی محفظه احتراق استوانه‌ای با پله و بدون پله مقایسه شده‌اند. در این مقایسه، هر دو محفظه در هر شبیه‌سازی سرعت معادل یکسانی را تجربه می‌کنند. این شکل به‌خوبی افزایش دما در اثر ایجاد پله در محفظه را نشان می‌دهد. مشاهده شده است که پله افزایش دمایی حدود ۵۰ درجه‌ای در بیشینه دمای محور مرکزی ایجاد می‌کند. در شکل ۶، وجود یکنواختی دما در قسمت بعد از پله در محفظه احتراق با پله به‌خوبی قابل مشاهده است. با وجود پله بازه تغییرات دمایی در محفظه حدود ۶۰۰ درجه است.

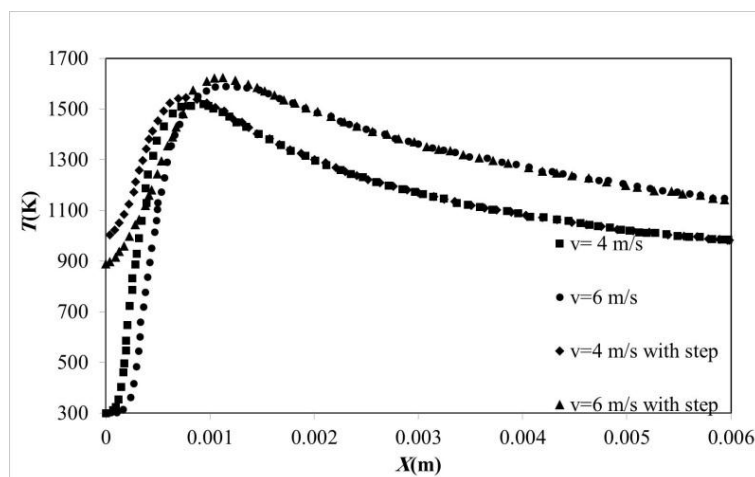


Figure 6- Temperature profile on the axis of micro combustion chamber with & without step in equivalent velocity $h=5 \text{ W/m}^2/\text{K}$, $K=20 \text{ W/m/K}$

شکل ۶- نمودار دما در محور مرکزی محفظه احتراق میکرو برای دو محفظه احتراق استوانه‌ای با پله و بدون پله در سرعت‌های معادل متفاوت، $K=20 \text{ W/m/K}$ و $h=5 \text{ W/m}^2/\text{K}$

تأثیر پارامترهای هندسی محفظه

در بخش قبلی، تأثیر وجود پله در محفظه بیان شد، اما مشخصات هندسی پله نیز می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر دمای محفظه احتراق بگذارد. در این بخش، تأثیر ارتفاع پله و همچنین قطر محفظه بر دمای دیواره خارجی محفظه بررسی خواهد شد. در جدول ۳، مشخصات سه محفظه احتراق مورد بررسی بیان شده است. طول هر سه محفظه ۱۰ میلی‌متر است.

جدول ۳ - سرعت و عدد رینولدز نمونه‌های بررسی شده در محفظه احتراق استوانه‌ای در حضور پله

Table 3- Velocity & Re number in combustors with step

Combustor type	Re(acording V_{in})	Equivalent velocity (m/s)	Velocity inlet (m/s)	d_{in}	d
1	503-1007	4-2	16-8	1	2
2	1510-755	1.33-3	24-12	1	3
3	1258-755	4.44-2.67	10-6	2	3

مقایسه محفظه شماره ۱ و ۳ بیانگر تأثیر قطر محفظه احتراق بر دمای دیواره خارجی محفظه است. در این دو محفظه اندازه پله یکسان است و تنها قطر محفظه تغییر می‌کند. با مقایسه محفظه شماره ۲ و ۳، دیده می‌شود که هر دو محفظه قطر یکسانی دارند و تنها اندازه پله در آن‌ها متفاوت است. با مقایسه این دو محفظه تأثیر اندازه پله بر دمای شعله بررسی خواهد شد. ابتدا، سیال پیش‌مخلوط هوا-هیدروژن با سرعت‌های یادشده وارد محفظه شده، و پس از رسیدن به حالت پایا، میانگین دما در دیواره هر محفظه اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به رینولدز جریان، برای تمام نمونه‌ها از حل آشفته استفاده شده است. شکل ۷ نمایانگر مقایسه دمای متوسط دیواره خارجی این سه محفظه است.

با توجه به شکل ۷ و مشاهده نمودار محفظه احتراق ۱ و ۳ و مقایسه آن‌ها با هم، مشاهده می‌شود که در سرعت مبنای برابر، محفظه احتراق با قطر بزرگ‌تر (محفظه ۳) دمای متوسط بالاتری در دیواره ایجاد می‌کند. دلیل این امر متناسب بودن نرخ انرژی ورودی به محفظه با توان دوم قطر است. با کاهش قطر محفظه، نسبت سطح به حجم در محفظه استوانه‌ای افزایش می‌یابد. این افزایش به معنای افزایش نسبت افت حرارتی به انرژی تولیدی است. در نتیجه محفظه با قطر بزرگ‌تر، به علت نرخ ورودی انرژی بالاتر و همچنین افزایش نسبت تولید انرژی ورودی به انرژی هدررفته، دمای بیشتری در دیواره خارجی ایجاد می‌کند. مقایسه بین نمودارهای توزیع دمای دیواره خارجی در محفظه‌های احتراق نوع ۲ و ۳ نشان می‌دهد ارتفاع پله کمتر

باعث ایجاد دمای بالاتری برای دیواره خارجی محفظه احتراق می‌شود. با توجه به شکل ۸، مشاهده می‌شود که در محفظه با پله کوچک‌تر (محفظه نوع ۳)، پیش‌گرم‌شدن مخلوط ورودی بیشتر بوده و همچنین دمای بالاتری برای دیواره خارجی به‌همراه دارد. شعله ضخامت بیشتری داشته و دمای بالاتری برای دیواره خارجی به‌وجود می‌آورد. در نتیجه، به‌منظور استفاده از میکرومحفظه‌ها با بازده تشعشعی بالا، در میان سه اندازه پله ذکرشده در این تحقیق، ساخت محفظه با پله کوچک‌تر مناسب‌تر است. طبق رابطه (۵)، افزایش دمای دیواره خارجی محفظه بازده تشعشعی محفظه را افزایش خواهد داد.

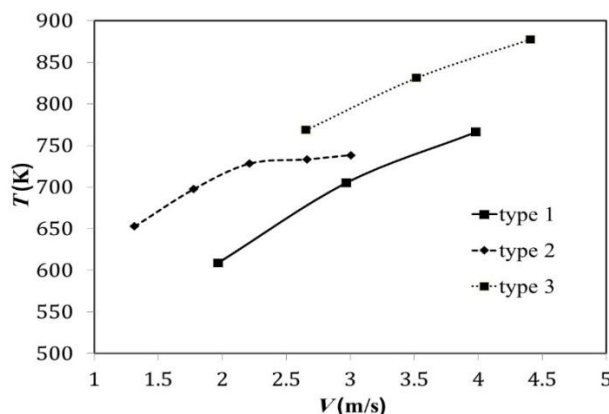


Figure 7- Comparin mean wall temperature of micro combustion chamber with various geometry, type 1: $d=2\text{mm}$ $s=0.5$, type 2: $d=3\text{mm}$ $s=1\text{mm}$, type 3: $d=3\text{mm}$ $s=0.5\text{mm}$, $h=5$ W/m²/K, $K=20$ W/m/K

شکل ۷- مقایسه دمای متوسط دیواره برای هندسه‌های مختلف محفظه در سرعت‌های مبنای معین: محفظه ۱- قطر محفظه احتراق ۳ mm و ارتفاع پله ۰/۵ mm، محفظه ۲- قطر محفظه احتراق ۳ mm و ارتفاع پله ۰/۵ mm، محفظه ۳- قطر محفظه احتراق ۳ mm و ارتفاع پله ۰/۵ mm، $K=20$ W/m/K و $h=5$ W/m²/K

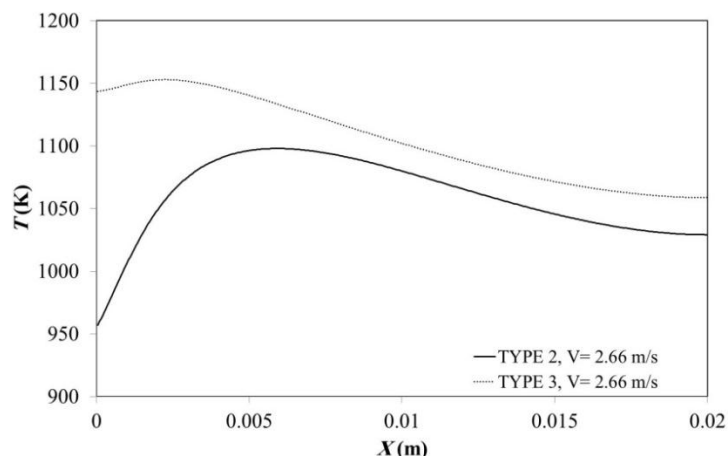


Figure 8- Outer wall static temperature profile in step tube in combustor type 2&3, $h=5$ W/m²/K, $K=20$ W/m/K
شکل ۸- نمودار دما بر روی دیواره خارجی محفظه احتراق نوع ۲ و ۳، $K=20$ W/m/K و $h=5$ W/m²/K

تأثیر نسبت هم‌ارزی

در یک ژنراتور ترموفتوولتائیک، انرژی شیمیایی مخلوط در نتیجه احتراق آزاد شده، دیواره محفظه را گرم می‌کند. محفظه داغ شده تولید تشعشع می‌کند و فوتون‌های آزادشده از طریق صفحه‌های مخصوص جذب و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. نسبت هم‌ارزی بهینه، نکته‌ای حائز اهمیت در افزایش بازده حرارتی و تشعشعی محفظه احتراق میکروست [۱۵]. نسبت هم‌ارزی

مخلوط ورودی یکی از مهم‌ترین عوامل در افزایش بازده تشعشعی محفظه است. در این بخش، به بررسی تاثیر نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی بر دمای متوسط دیواره پرداخته شده است. بدین منظور، در محفظه احتراق نوع ۱ در چهار نسبت هم‌ارزی مختلف دمای متوسط دیواره محاسبه شد. شکل ۹ توزیع دمای دیواره خارجی محفظه احتراق در سه نسبت هم‌ارزی متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۶ به ۰/۸ تغییر دمایی حدود ۷۰ درجه ایجاد می‌کند، ولی برای نسبت هم‌ارزی ۱ در مقایسه با نسبت هم‌ارزی ۰/۸ تغییر دما حدود ۱۵ درجه است. با توجه به شکل ۹، مشاهده می‌شود که در محفظه احتراق نوع ۱ حداکثر دما در نسبت هم‌ارزی رقیق حاصل می‌شود. دیده می‌شود که افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۸ به ۱ کاهش دما را به دنبال خواهد داشت. براساس نتایج شبیه‌سازی محفظه نوع ۱ حداکثر دمای دیواره خارجی محفظه در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ حاصل خواهد شد. دلیل این امر را می‌توان در کویلینگ حرارتی بین مخلوط ورودی به محفظه و دیواره محفظه جستجو کرد [۱۵،۷]. با توجه به دو شکل ۱۰ و ۱۱، مشاهده می‌شود که شعله در نسبت هم‌ارزی ۰/۸ کشیده‌تر و همچنین دمای بالاتری را حاصل می‌کند. این امر عدم نیاز به استفاده از مخلوط استوکیومتریکی در محفظه نوع ۱ را تایید می‌کند. این نتیجه در برخی از آزمایش‌های تجربی نیز مشاهده شده است. کو و ژو [۱۵] و همچنین لی و همکارانش [۷] تاثیر نسبت هم‌ارزی بر دمای دیواره خارجی و همچنین دمای خروجی از میکروبرنر را بررسی کردند. کو و ژو حداکثر دما در دیواره خارجی و همچنین حداکثر دمای خروجی را در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ مشاهده کردند. لی و همکارانش نیز افزایش بازده تشعشعی را در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ تایید کردند.

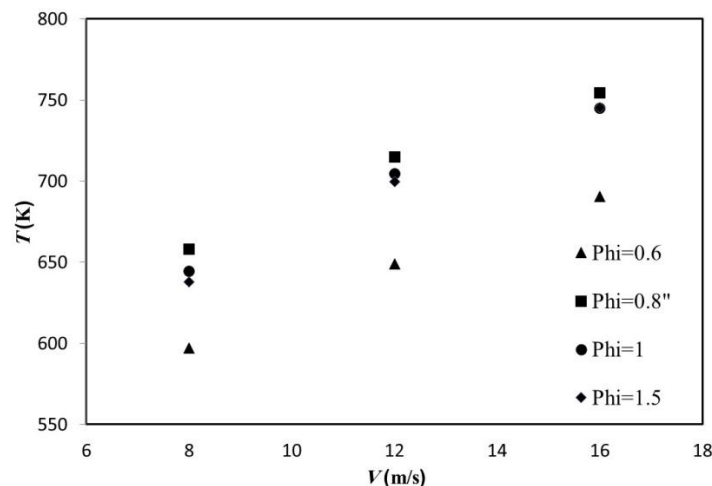


Figure 9- Mean wall temperature of micro combustion chamber, h₂-air mixture with various equivalence ratio, d=2mm & s=0.5, h=5 W/m²/K, K= 20 W/m/K

شکل ۹- دمای متوسط دیواره خارجی محفظه احتراق میکرو (مخلوط هیدروژن-هوا در نسبت هم‌ارزی های مختلف)، قطر محفظه پله ۲ و ارتفاع پله ۰/۵ mm، K= 20 W/m/K و h=5 W/m²/K

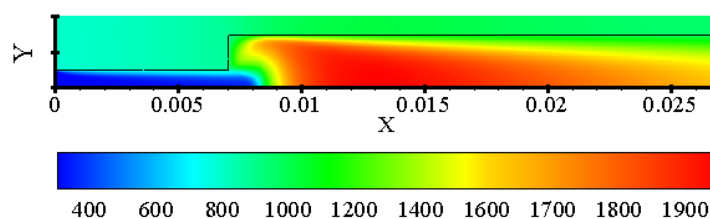


Figure 10- Contour of static temperature in step tube in combustor type 2, phi= 0.8, h=5 W/m²/K, K= 20 W/m/K

شکل ۱۰- کانتور دما در محفظه احتراق با پله، محفظه نوع ۲، نسبت هم‌ارزی ۰/۸، K= 20 W/m/K و h=5 W/m²/K

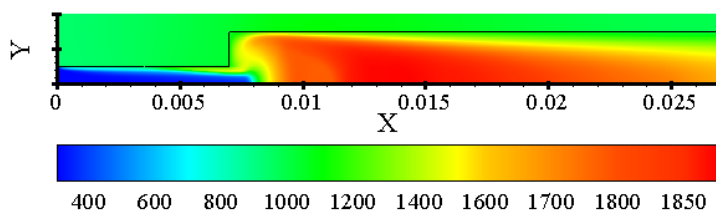


Figure 11- Contour of static temperature in step tube in combustore type 2, $\phi=0.6$, $h=5 \text{ W/m}^2/\text{K}$, $K=20 \text{ W/m/K}$
 شکل ۱۱- کانتور دما در محفظه احتراق با پله، محفظه نوع ۲، نسبت هم‌ارزی ۱، $K=20 \text{ W/m/K}$ و $h=5 \text{ W/m}^2/\text{K}$

تاثیر ضریب انتقال حرارت رسانشی دیوار (جنس دیوار)

ضریب انتقال حرارت رسانشی دیوار تاثیری دوگانه در پایداری احتراق در ابعاد میکرو ایفا می‌کند [۲]. در مقدمه بیان شد که ضریب انتقال حرارت رسانشی در راستای محوری محفظه احتراق باعث نفوذ حرارتی شده و به پیش‌گرم کردن مخلوط ورودی کمک می‌کند. از طرف دیگر، انتقال حرارت شعاعی باعث افزایش افت حرارتی محفظه احتراق می‌شود. در شکل ۱۲، تاثیر ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره بر مکان شعله و همچنین حداکثر دمای شعله در محور مرکزی محفظه احتراق نشان داده شده است. در شکل ۱۲، مشاهده می‌شود در مقادیر پایین ضریب انتقال حرارت رسانشی شعله قابلیت تشکیل در داخل میکروبرنر را ندارد. این شرایط را با شرایط محفظه بی‌دررو^۱ می‌توان برابر فرض کرد. در این شکل، مشاهده می‌شود که مقادیر بالاتر این ضریب، شعله را در مکانی داخل محفظه و نزدیک‌تر به ورودی تشکیل می‌دهد. در شکل ۱۳، تاثیر این ضریب بر دمای دیواره خارجی نشان داده شده است. دیده می‌شود که با افزایش ضریب انتقال حرارت رسانشی، توزیع دما در دیواره خارجی محفظه احتراق حالت یکنواختی پیدا می‌کند. همچنین، دمای متوسط دیواره با افزایش این ضریب افزایش یافته و در مقادیر بالا ($K > 10 \text{ W/m/K}$) توزیع دما در سطح خارجی دیوار تغییر زیادی از خود نشان نمی‌دهد. افزایش دمای متوسط دیواره خارجی در سیستم‌های تشعشی (ترموفتولتائیک ژنراتورها) باعث افزایش بازده به صورت قابل توجهی خواهد شد.

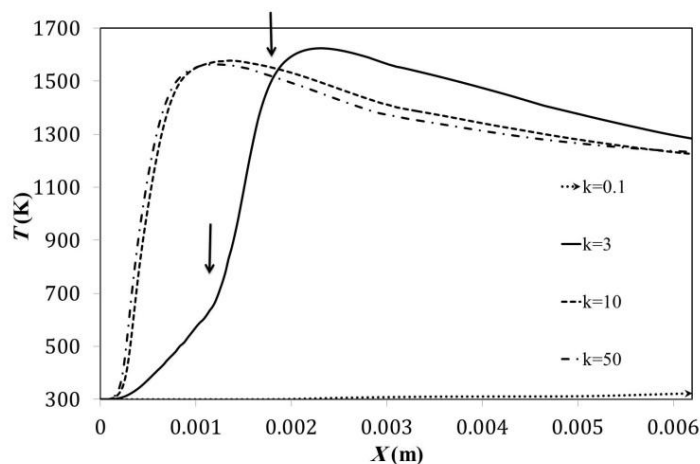


Figure 12- Temperature profile in axis of combustion chamber in different conduction Heat Transfer Coefficient, from left (first arrowshoed preheated zone and second flame position) in $k=3 \text{ W/m/K}$, $t=0.2 \text{ mm}$, h_2/air stoichiometric mixture, $h=5 \text{ W/m}^2/\text{K}$

شکل ۱۲- دما در محور مرکزی محفظه احتراق در ضرایب متفاوت رسانشی محفظه احتراق (فلش اول از چپ ناحیه پیش‌گرم و فلش دوم مکان شعله) در ضریب انتقال حرارت رسانشی 3 W/m/K ، ضخامت 0.2 mm ، مخلوط استوکیومتری هیدروژن و هوا، $h=5 \text{ W/m}^2/\text{K}$

1. Adiabatic

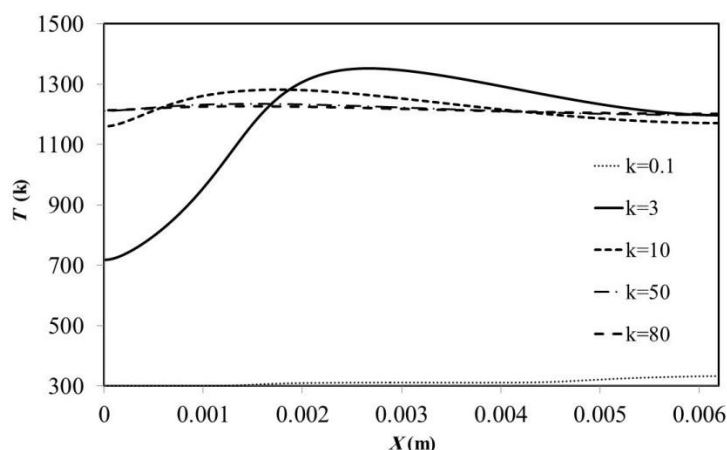


Figure 13- Wall temperature profile in different conduction heat coefficient, $t=0.2$ mm, h_2 / air stoichiometric mixture, $h=5$ W/m²/K
 شکل ۱۳- دما در دیواره خارجی محفظه احتراق در ضرایب متفاوت انتقال حرارت رسانشی، ضخامت 0.2 میلی متر، مخلوط استوکیومتری هیدروژن و هوا، $h=5$ W/m²/K

بررسی بازده تشعشعی محفظه احتراق میکرو

بیان شد که لی و همکاران [۷] تاثیر نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی و همچنین مشخصات هندسی محفظه بر بازده تشعشعی را به صورت تجربی بررسی کردند. اما، علاوه بر موارد فوق، جنس محفظه احتراق نیز تاثیر قابل توجهی بر بازده تشعشعی خواهد داشت. در این بخش، بازده تشعشعی میکروبرنرها، طبق رابطه (۵)، محاسبه شده است. همان‌گونه که اشاره شد، تحقیقات زیادی در مورد نقش هندسه و شرایط جریان بر بازده تشعشعی جریان صورت گرفته است. در این قسمت (شکل‌های ۱۴ و ۱۵) عوامل مؤثر بر افزایش بازده تشعشعی میکروبرنر بررسی می‌شود. در مقدمه، بیان شد که نسبت هم‌ارزی بهینه عامل مهمی در به دست آوردن حداکثر بازده تشعشعی در میکروبرنرهاست. در شکل ۱۴، بازده تشعشعی در سه نسبت هم‌ارزی مختلف رسم شده است. دیده می‌شود که حداکثر بازده تشعشعی در نسبت هم‌ارزی رقیق ($\phi = 0.8$) حاصل می‌شود.

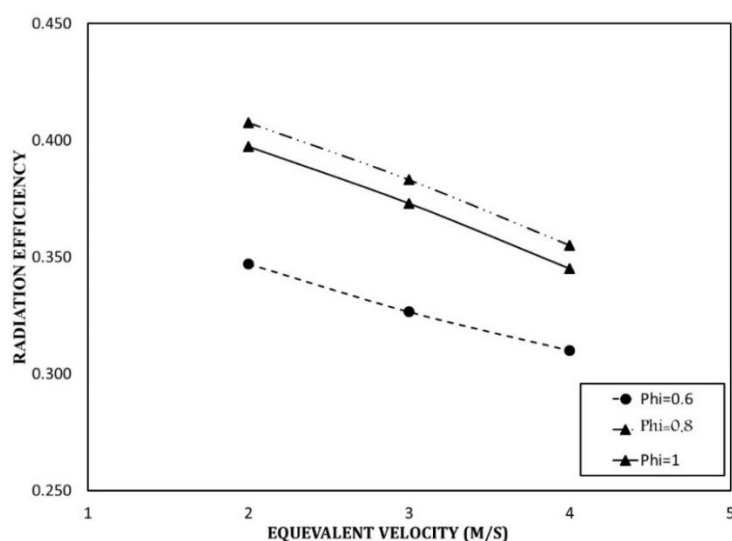


Figure 14- Radiation efficiency of micro burner, type 1: $d=2$ mm, $s=0.5$ mm, h_2 / air stoichiometric mixture, $h=5$ W/m²/K, $K=20$ W/m/K

شکل ۱۴- بازده تشعشعی میکروبرنر، محفظه احتراق نوع ۱، قطر محفظه ۲ میلی متر، ارتفاع پله 0.5 میلی متر، مخلوط استوکیومتری هیدروژن و هوا، $h=5$ W/m²/K و $K=20$ W/m/K

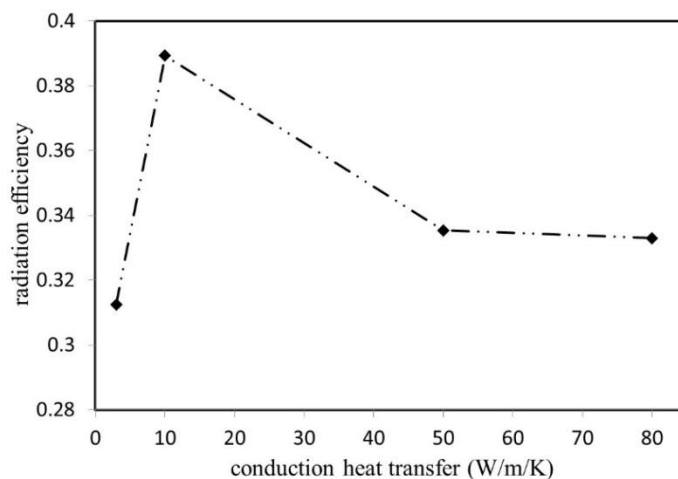


Figure 15- Radiation efficiency in different K (W/m/K)

شکل ۱۵- بازده تشعشعی برای ضرایب انتقال حرارت رسانشی متفاوت

تاکنون، به‌درستی، دلیل قابل قبولی برای توجیه این پدیده ارائه نشده است. ولی بیشتر محققین کوپلینگ بین دمای دیواره و سیال ورودی و همچنین ضخامت شعله در نسبت هم‌ارزی ۱ را دلیل اصلی این رفتار در میکروبرنر می‌دانند [۱۴،۷]. براساس مشاهدات تجربی، در سرعت‌های پایین (حدود ۱ متر بر ثانیه) مخلوط با نسبت هم‌ارزی رقیق و نزدیک به یک، ضخامت بیشتری داشته و در ناحیه‌ای نزدیک‌تر به دیواره تشکیل می‌شود که می‌تواند دمای بالاتری برای دیواره خارجی به‌همراه داشته باشد. با توجه به شکل ۱۴، عدم نیاز به مخلوط استوکیومتریکی برای به‌دست‌آمدن حداکثر بازده حرارتی مشاهده می‌شود. در شکل ۱۵، بازده تشعشعی میکروبرنر در ضریب انتقال حرارت رسانشی‌های متفاوت رسم شده است. مشاهده می‌شود که بازده تشعشعی میکروبرنر تا مقداری معینی افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. به‌نظر می‌رسد، در موارد مختلف، مقدار بهینه این ضریب متفاوت باشد. دلیل وجود این نقطه بهینه بازده در شکل ۱۵ دوگانه‌بودن رفتار نفوذی حرارتی دیواره محفظه است. ملاحظه می‌شود تا اندازه‌ای که مقدار پیش‌گرم‌شدن سوخت بیشتر از افت حرارتی باشد، بازده افزایش می‌یابد. ولی، پس از مقدار مشخص، اتلاف حرارت مقدار بازده تشعشعی را کاهش می‌دهد. در شکل ۱۵، بازده تشعشعی پس از مقدار 50 W/m/K کاهش بسیار کمی را نشان می‌دهد. این رفتار، با توجه به شکل ۱۳ و بررسی توزیع دمایی بر روی دیواره خارجی محفظه، قابل توجیه است. براساس این شکل، حداکثر دمای متوسط دیواره در ضریب خاصی از انتقال حرارت رسانشی حاصل می‌شود. این موضوع لزوم به‌کار بردن جنس مناسب برای ساخت میکروبرنرها برای به‌دست آوردن حداکثر بازده تشعشعی را تایید می‌کند.

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی احتراق در ابعاد میکرو به منظور بررسی تاثیر هندسه محفظه و همچنین مشخصات مخلوط ورودی بر مکان تشکیل شعله در تحقیق حاضر مطالعه شد. در این پژوهش، از مدل هندسه لی و همکاران [۷] برای بررسی پارامترهای هندسی محفظه و همچنین تاثیر مشخصات مخلوط ورودی بر پایداری احتراق استفاده شد. در کار حاضر، همچنین، از دو مدل احتراقی متفاوت، یکی مغشوش (EDC) و دیگری آرام (آرنیوسی)، به‌منظور شبیه‌سازی احتراق استفاده شد. مشاهده شد که در رینولدزهای بحرانی استفاده از مدل اغتشاشی ضروری است. در بررسی تاثیر وجود پله در محفظه احتراق، دیده شد که وجود پله در محفظه سه تاثیر عمده بر احتراق دارد: اول اینکه باعث پایداری احتراق در سرعت‌های بالا می‌شود؛ دوم اینکه وجود پله متوسط دما در دیواره خارجی محفظه را افزایش می‌دهد؛ سومین تاثیر پله، تشکیل شعله در مکانی نزدیک‌تر به ورودی محفظه است. همچنین، قطر محفظه بعد از پله و اندازه پله نقش قابل توجهی بر دمای متوسط دیواره خارجی ایفا می‌کند. دیده شد که ارتفاع کمتر پله

در قطر یکسان، در بین این دو محفظه احتراق، دمای بالاتری برای دیواره خارجی ایجاد می‌کند. همچنین، محفظه با قطر بالاتر دمای دیواره بیشتری را در شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد. تاثیر نسبت هم‌ارزی پارامتر دیگری بود که بررسی شد. دیده شد که حداکثر دمای دیواره خارجی محفظه (در نتیجه حداکثر بازده تشعشعی) الزاما در نسبت هم‌ارزی استوکیومتریکی حاصل نخواهد شد. بازده تشعشعی، علاوه بر مقدار نسبت هم‌ارزی، از پارامتر موثر دیگری نیز تاثیر می‌پذیرد. این پارامتر، جنس محفظه احتراق است. از آنجا که افزایش ضریب انتقال حرارت رسانشی دیواره محفظه افت حرارتی محفظه را افزایش می‌دهد، دمای دیواره را کاهش داده، سبب کاهش بازده تشعشعی محفظه می‌شود. این امر، به دلیل تاثیر جنس محفظه بر آنتالپی احتراق در میکروبرنر است.

منابع

1. J. F. Pan, J. Huang, D. T. Li, W. M. Yang, W. X. Tang and H. Xue, "Effects of Major Parameters on Micro Combustion for Thermophotovoltaic Energy Conversion," *Applied Thermal Engineering*, 27, 2007, pp. 1089-1095.
2. D. G. Norton and D. G. Vlachos, "Combustion Characteristics And Flame Stability at The Microscale: A CFD Study of Premixed Methane/Air Mixtures," *Chemical Engineering Science*, 58, 2003, pp. 4871-4882.
3. W. M. Yang, S. K. Chou, C. Shu, Z. W. Li, and H. Xue, "Combustion in Micro-Cylindrical Combustors with and Without a Backward Facing Step," *Applied Thermal Engineering*, 22, 2002, pp. 1777-1787.
4. M. Baigmohammadi, S. Tabejamaat, 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.
5. M. Baigmohammadi, S. Tabejamaat and B. Kashir, A Numerical Study on The Effects of Hydrogen Addition Levels, Wall Thermal Conductivity and Inlet Velocity on Methane/Air Pre-Mixed Flame in a Micro Reactor," *Energy Equipment and Systems*, 2, No. 2, 2014, pp. 103-119.
6. M. Baigmohammadi, S. S. Sadeghi, S. Tabejamaat and J. Zarvandi, "Numerical Study of The Effects of Wire Insertion on CH₄ (Methane)/AIR Pre-Mixed Flame in a Micro Combustor," *Energy*, 54, 2012, pp. 271-284.
7. J. Li, S. K. J. Li, S. K. Chou, Z. W. Li and W. M. Yang, "Characterization of Wall Temperature and Radiation Power Through Cylindrical Dump Micro-Combustors," *Combustion and Flame*, 156, 2009, pp. 1587-1593.
8. S. K. Chou, W. M. Yang, J. Li and Z. W. Li, "Porous Media Combustion for Micro Thermophotovoltaic System Applications," *Applied Energy*, 87, 2010, pp. 2862-2867.
9. 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, 2012, pp. 19190-19197.
10. A. Alipoor, K. Mazaheri and A. shamounipour, "Dynamic of Lean Hydrogen/Air Flame Regims in Micro Scale Combustion," *Modares Mechanical Engineering*, 14, No. 3, 2014, pp. 94-102. (in persian)
11. A. Alipoor, K. Mazaheri and H. Faramarzpour, "Numerical Study of Asymmetric Flame in Micro Scale Combustion," *12th Aerospace Conference*, Tehran, Iran, 2013. (in persian)
12. C. H. Kuo and P. D. Ronney, "Numerical Modeling of Non-Adiabatic Heat-Recirculating Combustors," *proceedings of the Combustion Institute*, 31, 2007, pp. 3277-3284.
13. Fluent Inc., "FLUENT 6.3 User's Guide," Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, 2006.
14. Y. Ju and K. Maruta, "Microscale Combustion: Technology Development and Fundamental Research," *Progress in Energy and Combustion Science*, 37, 2011, pp. 669-715.
15. J. H. L. Cao and J. L. Xu, "Thermal Performance of A Micro-Combustor for Micro-GasTurbine System," *Energy Conversion and Management*, 48, 2007, pp. 1569-1578.

English Abstract

The Numerical Investigation of Physical and Geometrical Conditions of Combustor and Mixture on Flame Stability in Micro Burner and Their Effects on Radiation Efficiency

Hosein Faramarzpour, Kiumars Mazaheri and Alireza Alipoor

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received: 2016.12.21, Received in revised form: 2017.7.3, Accepted: 2017.8.1)

The present numerical study investigates the effects of a step in a micro scale combustor on blow out limit and outer wall temperature. Also, the effects of the equivalence ratio of hydrogen-air mixture and combustion material on the emitter efficiency are scrutinized. The effects of the step in combustor is studied from two viewpoints: first the existence of the step, and second the step height and combustor diameter. The results showed that blow out limit is increased when using a step at the entrance of the combustion chamber. Besides, the mean wall temperature increases, while the flame temperature in the micro burner shows a more uniform behavior. It was observed, by comparing combustor 2 and 3, that the combustor with the lowest step height had higher (mean) wall temperature. On the other hand, the combustor with larger diameter achieves higher mean wall temperature. In this study, the effects of the equivalence ratio and conduction heat transfer coefficient on radiation efficiency of the micro burner are also investigated. It was observed that the maximum emitter efficiency of the micro burner is achieved for lean mixture. It was also observed that the conduction heat transfer coefficient has an optimum value.

Keywords: Micro combustion, Equivalence ratio, Emitter efficiency