

شبیه سازی عددی پارامترهای موثر بر پایداری احتراق مخلوط استوکیومتریک پیش اختلاط متان - هوا در یک محفظه احتراق میکرو

جلال زروندی^{۱*}، صادق تابع جماعت^۲، محمدرضا بیگ محمدی^۳

دانشکده مهندسی هوافضا - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(zarvandi@aut.ac.ir*)

چکیده

در مطالعه حاضر، مدلسازی عددی احتراق جریان کاملاً آرام، استوکیومتریک پیش اختلاط متان- هوا در یک محفظه احتراق دو بعدی در ابعاد میکرو مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه بررسی چگونگی وقوع، پدیده شناسی و پارامترهای موثر از قبیل پایداری شعله بر نحوه احتراق در تجهیزات MEMS جهت تولید انرژی یا نیروی پیشران در ابعاد کوچک جهت کاربردهای هوافضایی می باشد. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می دهند که پایداری شعله در داخل یک محفظه احتراق میکرو به مقدار زیادی به مقادیر ضخامت دیواره محفظه احتراق L_w و ضریب رسانایی حرارتی دیواره k_w ، عرض (ارتفاع) محفظه احتراق L ، ضریب انتقال حرارت جابجایی مابین دیواره بیرونی محفظه احتراق و محیط اطراف h_{out} و سرعت ورودی مواد واکنش دهنده پیش مخلوط V_{in} وابسته می باشد.

واژه‌های کلیدی: محفظه احتراق میکرو - پیش اختلاط - متان - هوا - پایداری شعله.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به پیشرفتهای صورت گرفته در زمینه نیمه- رساناها^۴ و فناوریهای ماشینکاری در ابعاد میکرو برای امکان تولید تجهیزات در ابعاد کوچک در حد میلیمتر و همچنین توسعه سریع سیستمهای الکتریکی و مکانیکی میکرو (MEMS)، تقاضاها برای طراحی و تولید این گونه از سیستمها از قبیل سیستمهای متحرک بسیار کوچک، میکرو روباتها، سیستمهای هوافضایی ابعاد کوچک و سیستمهای تولید توان میکرو دارای توانایی تولید انرژی زیاد در ابعاد کوچک، برای استفاده در دویبخش اقتصادی و نظامی سرعت در حال گسترش می باشد. با وجود پیشرفتهای و تلاشهای صورت گرفته در این زمینه، یکی از موانع عمده توسعه و پیشرفت این فناوری، یافتن منبع تامین توان و انرژی مناسبی برای اینگونه از سیستمها می باشد، بدین دلیل که منابع تولید توان الکتریکی موجود از قبیل باتریهای شیمیایی با توجه با چگالی انرژی موجود در آنها، وزن زیادی را به سیستم تحمیل می نمایند که مطلوب این گونه از سیستمها نمی باشد. با این وجود، از آنجاکه سوختههای هیدروکربنی، ارزان، در دسترس و دارای مقدار چگالی انرژی بالایی در واحد کوچکی از حجم، حتی تنها با ۵ الی ۱۰ درصد راندمان، در مقایسه با آخرین تکنولوژی باتریهای موجود نشان داده شده در نمودار ۱، می باشند، از اینرو، در سالهای اخیر بعنوان یکی از مناسبترین منابع تولید توان در سیستمهای تولید توان میکرو بصورت جدی مورد توجه قرار گرفته اند. بنابراین، از آنجاکه برای استخراج

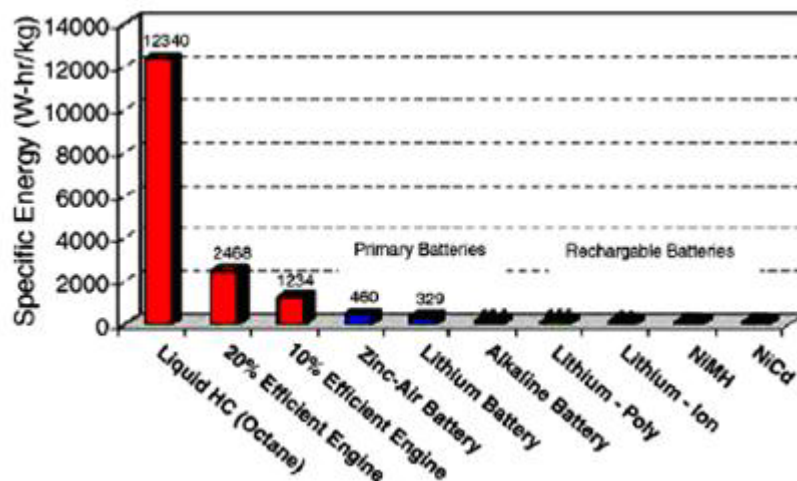
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۳- کارشناس ارشد.

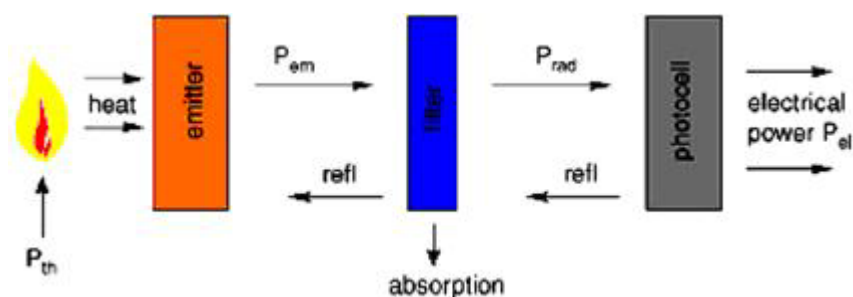
⁴ Semi-Conductor.

انرژی از سوخت‌های هیدروکربنی نیاز به طراحی محفظه‌های احتراقی در ابعاد کوچک می‌باشد، از اینرو، بسیاری از محققان در سراسر دنیا در تلاش جهت بهینه‌سازی و ارتقاء اینگونه از سیستم‌های احتراقی بعنوان منابع تولید انرژی آینده می‌باشند.



نمودار ۱- مقایسه انرژی مخصوص برای هیدروکربن مایع (اکتان)، در ۱۰٪ و ۲۰٪ کارایی موتورها، و چندین نسل تکنولوژی باتریها. [1]

بعنوان مثال، تحقیقات زیادی در زمینه سیستم‌های ترموفوتوولتائیک^۱ (TPV) در ابعاد میکرو صورت پذیرفته‌است [1]. این نوع از محفظه‌های احتراق میکرو بدلیل عدم داشتن قطعات متحرک و پیچیده برای تولید انرژی در سیستم‌های الکترومکانیکی کوچک پرتابل بسیار مناسب می‌باشند. در سیستم‌های میکرو ترموفوتوولتائیک (Micro-TPV)، محفظه احتراق یکی از مهمترین قسمت‌های اینگونه از سیستم‌های تولید انرژی می‌باشد، که این مطلب در شکل ۲ نشان داده شده‌است. بطوریکه، در شکل ۲ نشان داده شده‌است نقش منتشرکننده^۲ را دیواره محفظه احتراق ایفا نموده و بنابراین توزیع دمای بالا و یکنواخت در طول دیواره خارجی اینگونه از محفظه‌های احتراق مطلوب می‌باشد.



شکل ۲- طرح شماتیک کلی از نحوه تولید توان در یک سیستم Micro-TPV. [1]

بدین ترتیب، با توجه به مطالب فوق الذکر، تحقیقات و تلاش‌های گسترده‌ای چه بصورت تجری و شبیه‌سازی عددی در زمینه ایجاد احتراق پایدار و با راندمان بالا در اینگونه از محفظه‌های احتراق در طی سال‌های اخیر صورت پذیرفته‌است. بطوریکه، یک بررسی کلی شرایط حال حاضر تکنولوژی تولید توان در ابعاد کم و سیستم میکرو ترموفوتوولتائیک توسط چوان چیا و

¹ Thermophotovoltaic.

² Emitter.

همکاران^۱ صورت پذیرفته است [1]. نتایج این بررسی کلی نشان می‌دهد که افق توسعه سیستمهای تولید توان میکرو بر پایه سوختهای هیدروکربنی بسیار روشن بوده و امید آن می‌رود که در دهه آینده میلادی بصورت یک سیستم تولید توان جایگزین باتریهای امروزی گردند. بعلاوه، هوا و همکاران^۲ [2]، کمالی و همکاران [3] و لی و همکاران^۳ [4]، بترتیب، احتراق پیش مخلوط هیدروژن- هوا را در داخل یک محفظه احتراق میکرو بصورت شبیه‌سازی عدد مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند. با توجه به این مطلب که از موانع ایجاد احتراق پایدار در داخل یک محفظه احتراق میکرو، کم بودن زمان اقامت مخلوط واکنش پذیر به مقیاس زمانی واکنش شیمیایی و بالا بودن نسبت سطح انتقال حرارت به حجم محفظه احتراق می‌باشد، لذا، تحقیقات آنها نشان می‌دهد افزایش زمان اقامت جریان مخلوط پیش اختلاط در داخل محفظه احتراق در مقایسه با مقیاس زمانی واکنش شیمیایی با استفاده از تکنیکهای موجود از قبیل ایجاد پله در محفظه احتراق و غیره منجر به ایجاد یک احتراق پایدار در داخل محفظه احتراق در ابعاد میکرو می‌گردد. همچنین آنها نشان دادند که هردو پارامتر اتلاف حرارتی حجمی و تنش برشی بر روی دیواره داخلی محفظه احتراق به قطر محفظه احتراق میکرو وابسته می‌باشند [4]. در تحقیقات دیگری، جان وی و همکاران^۴ [5] اثر بارز نسبت تعادل و نرخ جریان مخلوط واکنش دهنده را بر روی تکمیل احتراق و موقعیت ناحیه واکنش مورد بررسی و تحقیق قرار داده‌اند. همچنین نتایج بدست آمده از تحقیق نورتن و همکاران^۵ [6] در زمینه پارامترهای موثر بر کنترل احتراق در داخل یک میکرو برنر^۶ نشان می‌دهد که ضریب رسانایی دیواره محفظه احتراق و ضخامت آن نقش عمده‌ای در تعیین انتقال حرارت به بالادست برنر و همچنین پیش گرمایش مخلوط واکنش دهنده بازی می‌کند. بعلاوه، آنها نشان دادند که پرش شعله^۷ زمانی رخ می‌دهد که سرعت خروجی برنر بیش از سرعت سوزش شعله باشد. در تحقیق دیگری که در زمینه احتراق اکسیژن- هیدروژن در یک محفظه احتراق میکرو از نوع ترموفوتولتائیک صورت پذیرفته‌است، پن و همکاران^۸ [7] بر روی اثرات پارامترهای عمده از قبیل نسبت اختلاط هیدروژن به اکسیژن، نسبت قطر نازل ورودی به قطر محفظه احتراق و نسبت ضخامت دیواره محفظه احتراق به قطر محفظه احتراق یک محفظه احتراق میکرو نوع تبدیل انرژی ترموفوتولتائیک تحقیقات گسترده‌ای را صورت داده‌اند. همچنین در تحقیق دیگری، یانگ و همکاران^۹ [8] اثر ترکیب بندی محفظه احتراق را بر روی کارایی و راندمان سیستمهای تولید توان بر پایه فناوری میکرو ترموفوتولتائیک را مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند. آنها نشان دادند که قطر محفظه احتراق در یک سیستم الکترو مکانیکی میکرو یک فاکتور بسیار مهم می‌باشد که کارایی سیستمهای میکرو ترموفوتولتائیک را بشدت تحت تاثیر قرار می‌دهد.

از اینرو با توجه به مطالب ارائه شده، هدف از این مطالعه در قالب شبیه‌سازی عددی، بررسی گسترده‌تر پارامترهای موثر بر ایجاد و پایداری احتراق مخلوط پیش اختلاط متان- هوا در یک محفظه احتراق دوبعدی می‌باشد که در مطالعات قبلی کمتر بدانها پرداخته شده‌است. در این بررسی اثرات پیش گرمایش مخلوط پیش اختلاط ورودی، سرعت ورودی مواد واکنش دهنده (V_{in}) ، ضخامت دیواره محفظه احتراق (L_w) ، ضریب رسانایی دیواره محفظه احتراق (K_w) و ضریب انتقال حرارت جابجایی بر روی دیواره خارجی محفظه احتراق میکرو (h_{out}) بر توزیع دما و محل شعله در داخل یک محفظه احتراق میکرو دو بعدی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

¹ Chuan chia et al.

² Hua et al.

³ Li et al.

⁴ Junwei et al.

⁵ Norton et al.

⁶ Micro-Burner.

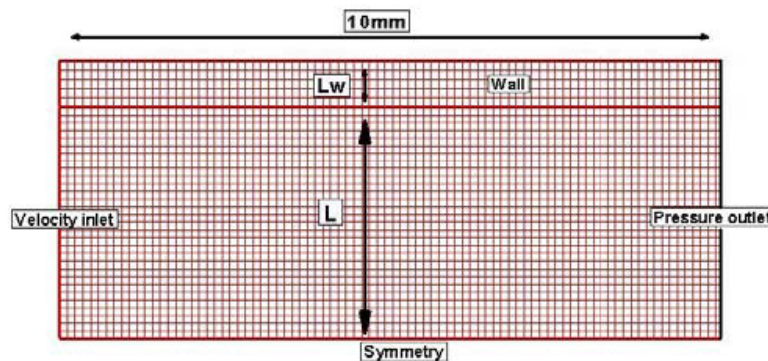
⁷ Blow out.

⁸ Pan et al.

⁹ Yang et al.

۲- مدل‌سازی فیزیکی

محفظه احتراق میکرو و دو بعدی مدل‌سازی شده شامل دو صفحه موازی به عرض بی نهایت و طول 1 cm می‌باشد که مخلوط متان - هوا در حالت استوکیومتریک ، به داخل آن تزریق شده است . از طرفی فاصله صفحات L و ضخامت دیواره محفظه احتراق L_w می باشد که جزئیات آن در شکل ۳ نشان داده شده است. به علت نسبت منطری بالا، محفظه احتراق به صورت دو بعدی مدل شده است. معادلات بقای جرم ، مومنتوم انرژی و تغییر گونه ها با استفاده از روش حجم محدود و بوسیله یک کد محاسب جریانهای واکنش پذیر دو بعدی مدل‌سازی شده اند. در این شبیه سازی همچنین معادله انرژی بر روی دیواره ها نیز حل شده و نیز برای شبیه سازی احتراق در داخل محفظه احتراق، از واکنش یک مرحله ی متان - هوا استفاده شده است. در این مدل پس از مطالعه بر روی تعداد مشهای مورد نیاز برای حل میدان جریان در داخل محفظه احتراق نهایتاً از 9000 عدد مش برای حل جریان در داخل میکروبرنر و از 1500 عدد مش نیز برای حل معادله ی انرژی بر روی دیواره استفاده شده است . نتایج بدست آمده از مدل‌سازی حاضر، با استفاده از نتایج ارائه شده در مراجع [5],[6] اعتبار دهی شده است.

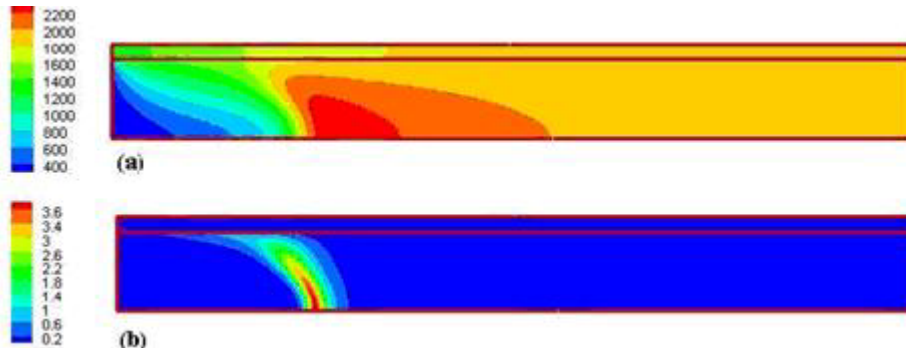


شکل ۳- نمایش هندسه تقارن محوری محفظه احتراق به همراه مش تولید شده.

۳- مشخصات احتراق در یک محفظه احتراق میکرو (میکروبرنر)

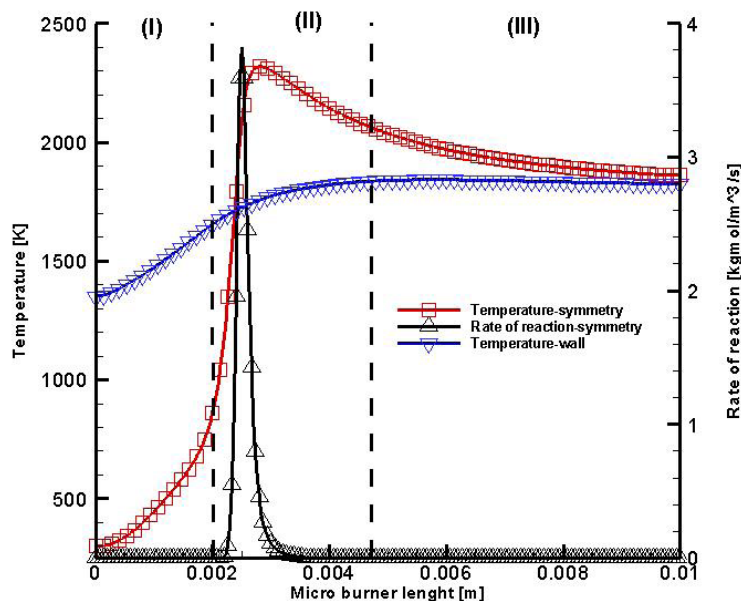
در این قسمت مشخصات احتراق در یک محفظه احتراق میکرو با در نظر گرفتن مدل سازی دیواره بررسی خواهد شد. شکل ۴ کانتورهای دما و نرخ واکنش را برای میکروبرنری با ابعاد $10\text{mm} \times 2\text{mm}$ ، $V_{in}=0.3\text{m/s}$ ، $K_w=7.5\text{w/m.k}$ نشان می دهد. همچنین نمودار ۵، پروفیل دما بر روی خط مرکزی و دیواره و نرخ واکنش را بر روی خط مرکزی محفظه احتراق نشان می دهد. با توجه به نمودار ۵، سه ناحیه در میکروبرنر مشاهده می شود: ۱- ناحیه پیش گرم (I) - ناحیه احتراق (II) - ناحیه پس احتراق (III). عرض هر یک از این نواحی بنا به شرایط کاری و ورودی میکروبرنر تغییر خواهد کرد. در ناحیه ی پیش گرم (I) دمای دیواره به اندازه کافی از دمای سیال بالاتر است، به طوری که دیواره می تواند انرژی خود را به سیال منتقل کند. از طرفی، به علت بالا بودن ضریب انتقال حرارت دیواره نسبت به سیال این انتقال انرژی بهتر به سیال صورت می گیرد. این انرژی از ناحیه پس احتراق (III)، که دمای گازها به اندازه کافی بالا می باشد و از طریق دیواره به ناحیه (I) منتقل می شود. زمانی که سیال به دمای اشتعال می رسد، مخلوط به سرعت محترق می گردد و حرارت رها می شود که در ناحیه ی (II) یک منحنی با گرادیان شدید به وجود می آید. به علت این که انتقال حرارت عرضی داخل سیال، بسیار آهسته تر از نرخ رها شدن انرژی می باشد در نتیجه در مرکز سیال می توان دمایی تقریباً برابر با دمای آدیاباتیک داشت. در ناحیه ی (III)، بعد از اینکه واکنش دهنده ها مصرف شدند واکنش متوقف شده و سیال به دمای دیواره و پایین دست می رسد و همچنین دیواره ها به وسیله ی اتلاف حرارت بیرونی سرد می شوند. در حالت غیر آدیاباتیک، اگر طول محفظه احتراق بزرگ باشد، دمای دیواره و

سیال به دمای اتاق می رسند. در بعضی از حالات ماکزیمم دمای سیال از دمای آدیاباتیک شعله‌ی متان- هوا برای ورودی 300 K تجاوز می کند. که این امر به دلیل یک مرحله‌ای بودن شیمی مساله و پیش گرم شدن سیال به وسیله دیواره رخ می دهد.



شکل ۴- کانتورهای توزیع دما بر حسب کلوین و نرخ واکنش بر حسب $\text{kgmol/m}^3\cdot\text{s}$ در داخل محفظه احتراق (a) - توزیع دما. (b) - توزیع

$$\cdot \left(L = 2 \text{ mm}, K_w = 7.5 \frac{W}{m.K}, V_{in} = 0.3 \frac{m}{\text{sec}}, h_{out} = 8 \frac{W}{m^2.K} \right) \cdot \text{نرخ واکنش.}$$

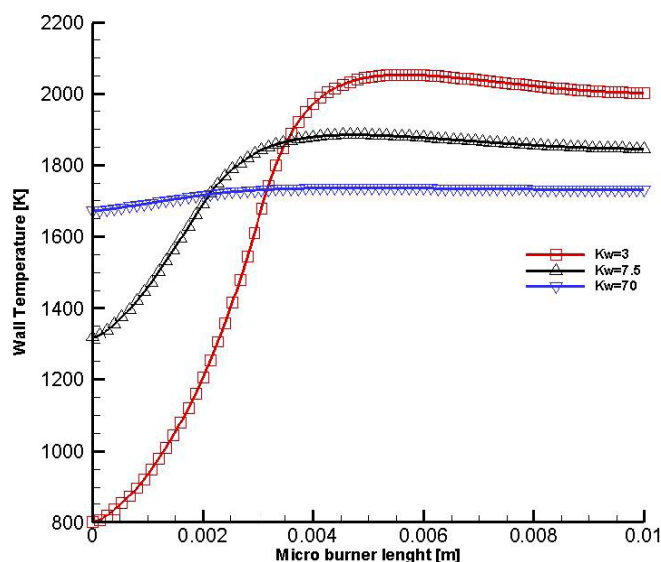


نمودار ۵- پروفیل دما و نرخ واکنش بر روی خط مرکزی و دیواره محفظه احتراق.

۴- نقش ضریب هدایت حرارتی و اتلاف حرارتی خارجی در پایداری شعله

شبه سازی های انجام شده نشان می دهند که ضریب هدایت حرارتی، یک نقش اساسی در پایداری شعله در محفظه های احتراق میکرو (میکروبرنر) بازی می کند. با توجه به مطالعات صورت گرفته در این زمینه، دیواره محفظه احتراق میکرو دارای یک نقش دو جانبه و رقابتی در انتقال حرارت می باشد. از یک سو، دیواره مسیری را برای انتقال حرارت از ناحیه پس احتراق (III) به بالا دست، برای پیش گرم کردن سیال مخلوط ورودی فراهم می کند، که این کار برای ایجاد اشتعال و پایداری شعله لازم است. از طرف دیگر، دیواره شرایطی را فراهم می نماید که افت حرارتی خارجی ایجاد شود و این امر باعث تاخیر در ایجاد اشتعال و نهایت منجر به خاموشی شعله در داخل محفظه احتراق می شود. همچنین به علت وجود نقاط داغ و

همچنین دمای بالای دیواره مشکل ذوب شدگی نیز وجود دارد که منجر به انهدام محفظه احتراق می‌گردد. ضریب انتقال حرارتی دیواره یک نقش بزرگ بر روی نحوه توزیع پروفیل دمایی بر روی دیواره محفظه احتراق دارد. نمودار ۶ پروفیل توزیع دمای محوری بر روی دیواره محفظه احتراق را برای انواع مختلف ضریب هدایت حرارتی رسانایی دیواره نشان می‌دهد همانگونه که مشاهده می‌گردد، هنگامیکه ضریب انتقال حرارت هدایتی دیواره خیلی پایین باشد، شیب تندی در گرادیان توزیع دمای محوری در داخل دیواره مشاهده می‌شود. همچنین برای دیواره ای با ضریب انتقال حرارت هدایتی متوسط، پروفیل توزیع دمای محوری یکنواختی بیشتری دارد و برای مواد فلزی نیز بدلیل بالابودن ضریب انتقال حرارت هدایتی آنها پروفیل دما بصورت یکنواخت در داخل دیواره توزیع می‌شود، که این امر موجب تسهیل انتقال حرارت از پائین دست محفظه احتراق به بالادست آن شده و همچنین خطر ذوب شدگی دیواره محفظه احتراق را کاهش می‌دهد. جدول ۱ نمونه‌ای از مواد با ضریب هدایت حرارتی مختلف را نشان می‌دهد.



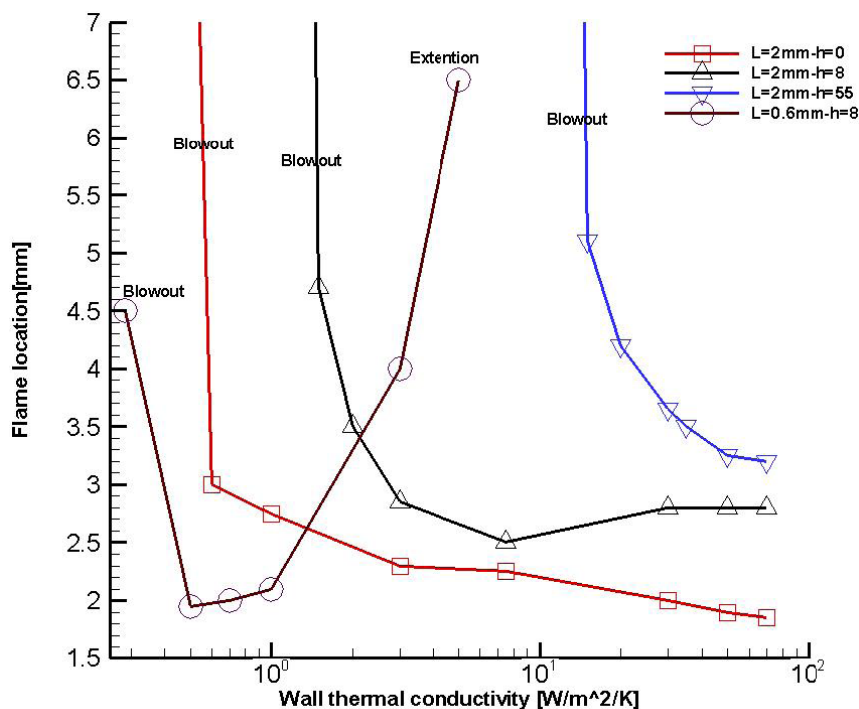
نمودار ۶- پروفیل دمای محوری دیواره برای رسانایی های مختلف ($K_w: 3, 7.5, 70 \text{ W/m.K}$) ($L = 1.2 \text{ mm}, V_{in} = 0.5 \frac{m}{s}, h_{out} = 8 \frac{W}{m^2.K}$)

جدول ۱- نمونه ای از مواد با رسانایی مختلف.

نوع ماده	K_w (W/m.K)
آزبست (Asbestos)	0.6
SiO_2	3
Steel	16.27
Al_2O_3	7.5
Ni	91.74
Al	202.4
Cu	387.6

نکته‌ای که در این قسمت باید بدان اشاره کرد آن است که مکان شعله با استفاده از نقطه‌ای که بیشترین مقدار نرخ واکنش را دارد محاسبه شده است. در تمامی حالات، این نقطه در خط مرکزی اتفاق می‌افتد مگر آنکه فاصله صفحات از یک دیگر زیاد باشد. نمودار ۷ مکان شعله را بر حسب رسانایی دیواره برای سه نوع ضریب انتقال حرارت جا به جایی خارجی و سرعت مخلوط ورودی 0.3 m/s متر بر ثانیه نمایش می‌دهد. برای ضرایب انتقال حرارت هدایتی پایین در دیواره، مکان شعله به طور قابل

ملاحظه‌ای به سمت پایین حرکت می‌کند و ممکن است که بلند شدگی شعله رخ دهد. البته این اتفاق به طول میکروبرنر و سرعت ورودی مخلوط پیش اختلاط بستگی دارد. برای حالتی که در آن ضریب انتقال حرارتی دیواره پایین می‌باشد، شار حرارتی گذرنده از میان دیواره به سمت بالا محدود می‌شود، در نتیجه سیال به میزان کمتری پیش گرم می‌شود، که این امر منجر به تعویق افتادن ایجاد اشتعال در مخلوط پیش اختلاط شده و در نهایت شعله به سمت پایین دست محفظه احتراق کشیده می‌شود. بدین ترتیب، به هر میزان که ضریب انتقال حرارت هدایتی افزایش می‌یابد، فاصله میان مکان تشکیل شعله از محل ورودی به محفظه احتراق بشدت کاهش می‌یابد. شبیه سازی‌ها نشان می‌دهند که برای انتقال حرارت از پایین دست محفظه احتراق به بالا دست برای ایجاد اشتعال و نیز کاهش میزان اتلاف حرارتی از دیواره محفظه احتراق میکرو، باید از دیواره‌ای با ضریب انتقال حرارت هدایتی متعادل استفاده کنیم. بطوریکه، برای محفظه احتراقی با ضریب هدایت حرارتی دیواره بالا و اتلاف حرارتی خارجی پایین، ضریب هدایت حرارتی بالا تاثیر کوچکی بر مکان شعله می‌گذارد. و این در حالیست که برای سیستمی با اتلاف حرارتی خارجی زیاد، ضریب انتقال حرارتی بالای دیواره، نظیر فلزات، باعث می‌شود که مکان شعله به سمت خروجی محفظه احتراق حرکت کند که در نتیجه باعث خاموشی شعله خواهد شد.

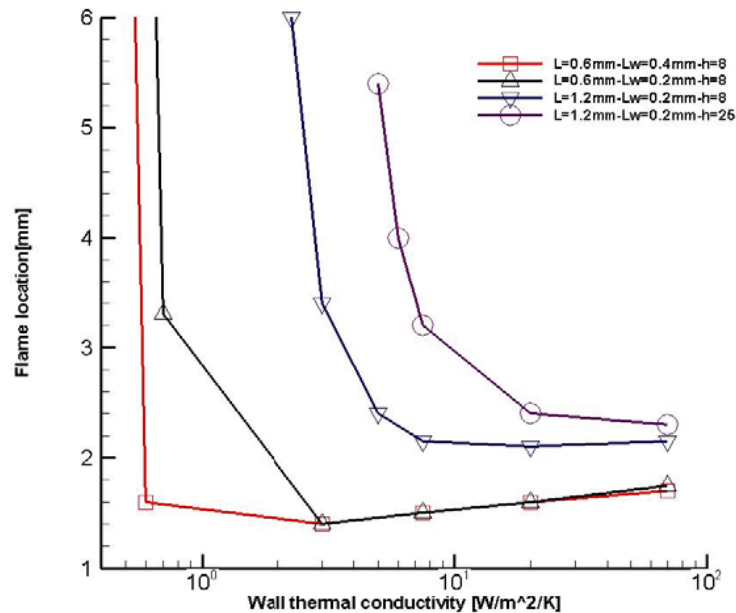


نمودار ۷- نمودار مکان شعله بر حسب رسانایی دیواره برای سه مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی خارجی (h_{out} : 0, 8, 55W /m².K) و دو

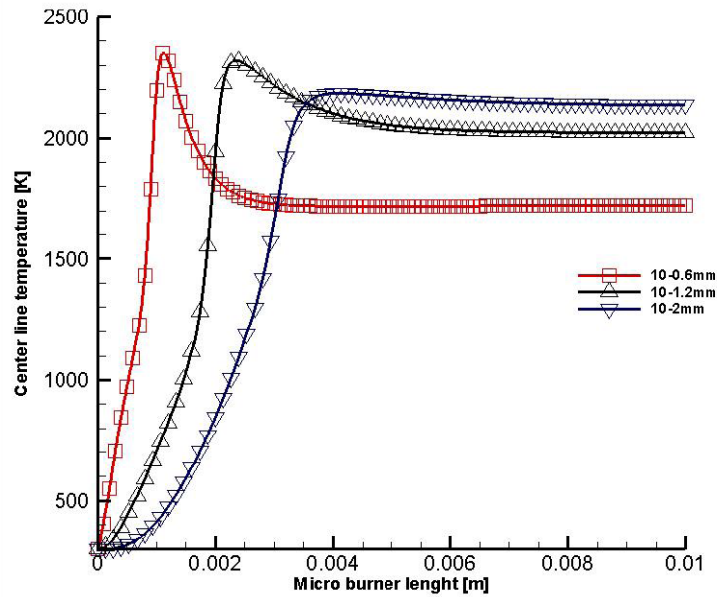
$$\text{عرض متفاوت محفظه احتراق (L: 0.6, 2 mm) } \left(V_{in} = 0.3 \frac{m}{s} \right)$$

علاوه بر رسانایی دیواره دو عامل ضخامت دیواره (L_w) و ارتفاع میکروبرنر (L) نیز در پایداری شعله در داخل یک محفظه احتراق میکرو مؤثر می‌باشند. نمودار ۸ اثر ضریب رسانایی دیواره را بر روی مکان شعله برای ارتفاع‌ها و ضخامت‌های مختلف میکروبرنر نشان می‌دهد. همچنین نمودارهای ۹ و ۱۰ پروفیل‌های توزیع دما و نرخ واکنش را در مرکز برای سه ارتفاع مختلف میکروبرنر نشان می‌دهند. مکان شعله برای ارتفاع (عرض) 1.2 mm رفتار کیفی متفاوتی نسبت به ارتفاع 0.6 mm دارد. وقتی که ارتفاع یا عبارتی عرض محفظه احتراق میکرو افزایش می‌یابد، مقیاس زمانی برای انتقال حرارت از ناحیه‌ای که در آن واکنش

صورت می‌گیرد، به دیواره‌ها و از دیواره‌های داغ به واکنش دهنده‌های ورودی افزایش می‌یابد و این افزایش به دلیل افزایش در مقیاس بعد (ارتفاع میکروبرنر) می‌باشد. در نتیجه مکان شعله به سمت پایین دست محفظه احتراق حرکت میکند و برای این که این حرکت به سمت بالا دست تغییر پیدا کند، لازم است که از دیواره‌های با ضریب رسانایی هدایتی بالاتری استفاده شود. اما از طرف دیگر افزایش ارتفاع میکروبرنر باعث افزایش حجم تولید حرارت میشود (افزایش نسبت حجم به سطح محفظه احتراق) و این امر سبب می‌شود که میکروبرنر در مقابل افت حرارتی خارجی، مقاومت بیشتری از خود نشان دهد. همان طور که قبلاً اشاره شد، ضخامت دیواره نیز نقش اساسی در پایداری شعله ایفا میکند. با نگاه مجدد به نمودار ۸ در می‌یابیم که دیواره با ضخامت 0.4 mm حتی با کمتر بودن مقدار ضریب رسانایی هدایتی، نسبت به دیواره با ضخامت 0.2 mm مقاومت بهتری در مقابل افت حرارت خارجی از خود نشان می‌دهد. از طرفی با توجه به نمودار ۱۱، مشاهده میشود که افزایش ضخامت دیواره باعث توزیع بهتر حرارت در درون دیواره محفظه احتراق میشود. به طور کلی افزایش ضخامت دیواره باعث افزایش انتقال حرارت از پایین دست محفظه احتراق به بالا دست آن شده و از این طریق باعث پایداری بهتر و بیشتر شعله می‌شود.

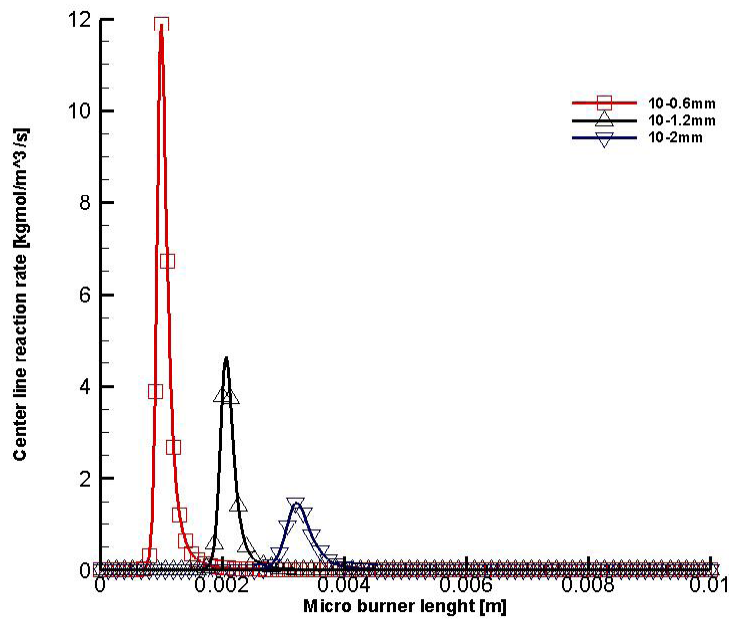


نمودار ۸ - نمودار مکان شعله بر حسب رسانایی دیواره برای $(L_w: 0.2, 0.4 \text{ mm}), (L: 0.6, 1.2 \text{ mm})$, $(h_{out}: 8, 25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})$ $(V_{in} = 0.5 \frac{m}{s})$



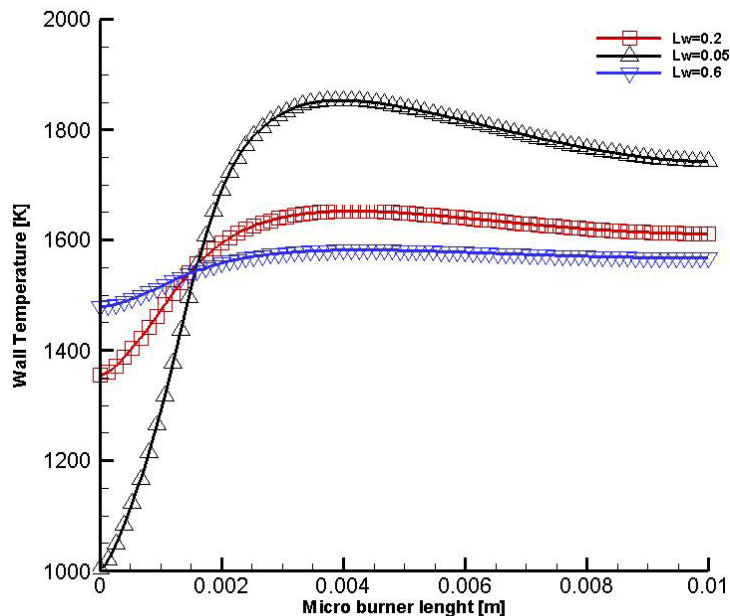
نمودار ۹- نمودار توزیع پروفیل دما در مرکز محفظه احتراق برای سه ارتفاع مختلف (L: 0.6, 1.2, 2 mm)

$$\left(K_w = 7.5 \frac{W}{m.K}, V_{in} = 0.5 \frac{m}{s}, h_{out} = 0 \frac{W}{m^2.K} \right)$$



نمودار ۱۰- نمودار پروفیل نرخ واکنش در مرکز محفظه احتراق برای سه ارتفاع مختلف (L: 0.6, 1.2, 2 mm)

$$\left(K_w = 7.5 \frac{W}{m.K}, V_{in} = 0.5 \frac{m}{s}, h_{out} = 0 \frac{W}{m^2.K} \right)$$



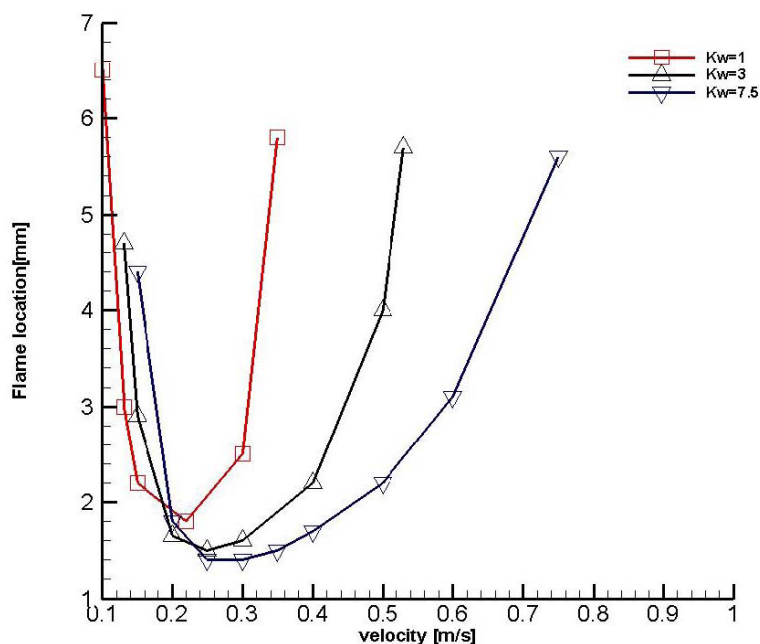
نمودار ۱۱- نمودار توزیع پروفیل دما بر روی دیوارهٔ محفظهٔ احتراق برای سه ضخامت مختلف (L_w: 0.05, 0.2, 0.6 mm)

$$\left(L = 2\text{mm}, K_w = 7.5 \frac{W}{m.K}, V_m = 0.2 \frac{m}{s}, h_{out} = 8 \frac{W}{m^2.K} \right)$$

۵- اثر سرعت ورودی در پایداری شعله

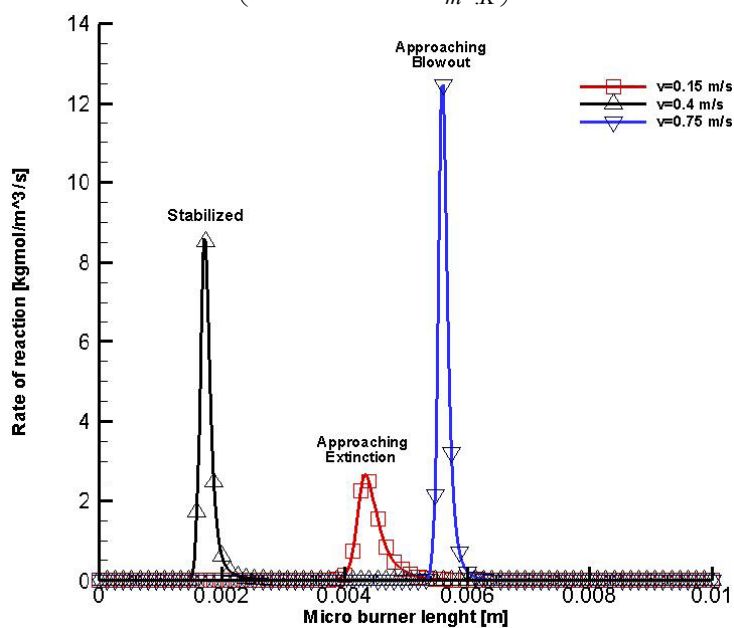
سرعت ورودی یک نقش اساسی در تعیین مکان شعله در میکروبرنر ها بازی میکند ، نمودار ۱۲ مکان شعله را به عنوان تابعی از سرعت برای چند دیواره با ضریب رسانایی متفاوت نشان میدهد . برای سرعت های ورودی بالا ، مکان شعله به سمت پایین دست حرکت میکند ، این افزایش سرعت باعث افزایش نرخ جریان ورودی و کاهش زمان اقامت سیال درون میکروبرنر میشود . از طرف دیگر برای سرعت های پایین ، جابجایی سریع ناحیهٔ واکنش به سمت پایین دست مشاهده میشود که آن نیز به علت کاهش نرخ تولید حرارت در میکروبرنر می باشد. با توجه به افزایش نرخ جریان جرمی، میان افزایش گرمای حجمی آزاد شده و کاهش زمان اقامت سیال در میکروبرنر یک نقطه کمینه وجود دارد که شعله در آن نقطه پایدار میباشد . مکان این نقطه به رسانایی دیواره بستگی دارد و در مورد مساله حاضر مابین 0.2 تا 0.4 متر بر ثانیه میباشد . وجود دیواره رسانایی بالا باعث میشود که حرارت بیشتری از پایین دست به بالا دست منتقل شود و در نتیجه شعله پایداری بیشتری در مقابل افزایش سرعت ورودی داشته باشد. نمودار ۱۳ پروفیل نرخ واکنش در مرکز را برای سه سرعت متفاوت نشان میدهد . همانگونه که در این شکل مشاهده میشود، هنگامی که سرعت ورودی بسیار زیاد و یا بسیار کم باشد مکان شعله به دلایلی که در بالا بدان اشاره شد به سمت پایین دست حرکت می کند ولی اگر سرعت ورودی مقداری متعادل داشته باشد مکان شعله در حالت کمینه قرار میگیرد و شعله پایداری به وجود می آید. نکته‌ای که در این قسمت باید بدان اشاره شود آن است که هنگامی که سرعت ورودی زیاد است شعله به سمت پرش پیش میرود و شاخصهٔ پرش شعله خروج گازهای داغ از میکروبرنر میباشد. اما هنگامی که سرعت ورودی کم است شعله به سمت خاموشی می رود و شاخصهٔ این پدیده توزیع نرخ واکنش در درون میکروبرنر میباشد . همانگونه که رسانایی دیوارهٔ میکروبرنر در هنگامی که سرعت ورودی افزایش می‌یابد در پایداری شعله اثر دارد ، دو پارامتر ارتفاع میکروبرنر و ضخامت دیواره نیز در پایداری شعله تاثیر گذارند . همان طور که در نمودار ۱۴ نشان داده شده است ، هنگامی که ارتفاع میکروبرنر کاهش و ضخامت دیوارهٔ آن افزایش می‌یابد ، میکروبرنر در مقابل افزایش سرعت بهتر عمل کرده و شعله در آن پایدارتر است . این پایداری به علت کاهش زمان نفوذ انرژی مابین دیواره‌های داغ و سیال و همچنین افزایش سطح

انتقال حرارت میباید. هنگامی که ارتفاع میکروبرنر افزایش می‌یابد، این زمان افزایش پیدا میکند و سرعت پرش شعله از 1.4 به 0.7 متر بر ثانیه میرسد. اما هنگامی که ضخامت دیواره افزایش می‌یابد به علت افزایش سطح انتقال حرارت، انتقال بهتر و بیشتر حرارت صورت گرفته و سیال ورودی بهتر پیشگرم میشود. در نتیجه شعله پایدارتر شده و سرعت پرش شعله از 1.4 به 2.1 متر بر ثانیه افزایش می‌یابد.



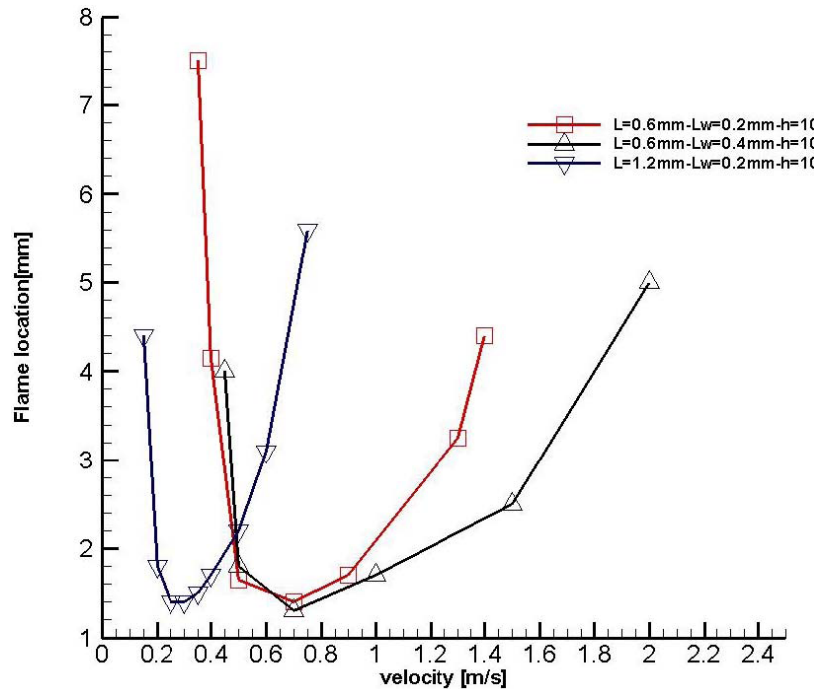
نمودار ۱۲- تغییر مکان شعله بر حسب سرعت ورودی برای در سه ضریب رسانایی دیواره (K_w: 1, 3, 7.5 W/m.K)

$$\left(L = 1.2 \text{ mm}, h_{out} = 10 \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$



نمودار ۱۳- نمایش پروفیل نرخ واکنش در مرکز محفظه احتراق در سه سرعت مختلف (V_{in} : 0.15, 0.4, 0.75 m/s)

$$\left(L = 1.2 \text{ mm}, K_w = 7.5 \frac{W}{m.K}, h_{out} = 10 \frac{W}{m^2.K} \right)$$



نمودار ۱۴- تغییرات مکان شعله بر حسب سرعت ورودی برای (L : 0.6, 1.2 mm; L_w : 0.2, 0.4 mm; h_{out} : 10 W/m².K; K_w : 7.5 W/m.K)

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، پارامترهای موثر بر ایجاد و پایداری احتراق مخلوط پیش اختلاط متان- هوا در یک محفظه احتراق دوبعدی در قالب شبیه‌سازی عددی مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار گرفته‌است. در این بررسی اثرات پیش‌گرمایش مخلوط پیش اختلاط ورودی، سرعت ورودی مواد واکنش دهنده (V_{in})، ضخامت دیواره محفظه احتراق (L_w)، ضریب رسانایی حرارتی هدایتی دیواره محفظه احتراق (K_w) و ضریب انتقال حرارت جابجایی بر روی دیواره خارجی محفظه احتراق میکرو (h_{out}) بر روی توزیع دما و محل شعله در داخل یک محفظه احتراق میکرو دو بعدی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. ضمناً در این مطالعه تمرکز بیشتر بر روی اثر دیواره محفظه احتراق در پایداری و مشخصات شعله می باشد و پارامتری های دیگر مانند تغییر میزان نسبت تعادل و یا افزایش تعداد واکنش های شیمیایی و مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. همچنین در این مطالعه، همگرایی در حل معادلات حاکم به دو علت سختی ذاتی معادلات شیمیایی و اختلاف ضریب رسانایی حرارتی هدایتی میان دیواره و سیال به شدت به تاخیر می افتد که این امر بسته به تعداد واکنش های شیمیایی و اختلاف ضریب رسانایی حرارتی هدایتی میان دیواره محفظه احتراق و سیال داخل محفظه گاه ساعت ها بطول انجامد . البته انتخاب درست شرایط اولیه می تواند دستیابی به همگرایی در حل معادلات را تسریع بخشد. در مجموع، نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می دهند که پایداری شعله در داخل یک محفظه احتراق میکرو به مقدار زیادی به مقادیر به ضخامت L_w و ضریب رسانایی حرارتی دیواره K_w ، عرض محفظه احتراق L ، ضریب انتقال حرارت رسانایی جابجایی دیواره بیرونی محفظه احتراق h_{out} و سرعت ورودی مواد واکنش دهنده پیش مخلوط وابسته می باشد. بطوریکه افزایش ضخامت دیواره و ضریب رسانایی حرارتی دیواره، بدلیل ایجاد تسهیل در مسیر انتقال حرارت از ناحیه پس شعله به ناحیه پیشگرم، موجب بهبود شرایط احتراق در داخل محفظه احتراق



FCCI2010-1107

سومین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

تهران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - اسفند ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی هوافضا

می‌گردند. البته تاثیر مثبت این تغییرات با توجه به کاربرد محفظه احتراق میکرو متغییر خواهد بود، بطوریکه در محفظه های احتراق میکرو ترموفوتوولتائیک بدلیل نیاز به کاهش گرادیان دمایی مابین محفظه احتراق و سطوح خارجی محفظه احتراق و همچنین جلوگیری از خنک شدن سریع دیواره بعثت انتقال حرارت جابجایی مابین دیواره خارجی محفظه احتراق و محیط اطراف، افزایش بیش از حد ضخامت دیواره محفظه احتراق و ضریب رسانایی حرارتی دیواره محفظه احتراق مطلوب نمی‌باشد. از سوی دیگر، افزایش عرض محفظه احتراق و ضریب انتقال حرارت جابجایی مابین دیواره خارجی محفظه احتراق و محیط اطراف سبب کاهش و تضعیف پایداری احتراق در داخل یک محفظه احتراق میکرو می‌گردند.

مراجع

- 1- Chuan chia, Loy, and Feng, Bo, "*The development of a micro power (micro-thermo photovoltaic) device*", Journal of Power Sources, Vol.165, pp.455-480, 2007.
- 2- Hua, Jinsong, Wu, Meng, and Kumar, Kurichi, "*Numerical simulation of the combustion of hydrogen-air mixture in micro-scaled chambers. Part I: Fundamental study*", Chemical Engineering Science, Vol.60, pp. 3497 -3506, 2005.
- 3- Kamali, R., Binesh, A.R. and Hossainpour, S., "*Numerical Simulation of Wall Treatment Effects on the Micro-Scale Combustion*", PWASET, Vol.26,pp.444-451, December 2007.
- 4- Li, Z.W., Chou, S.K., Shu, C., Xue, H. and Yang, W.M., "*Characteristics of premixed flame in micro combustors with different diameters*", Applied Thermal Engineering, Vol.25, pp.271-281, 2005.
- 5- Junwei, Li and Beijing, Zhong, "*Experimental investigation on heat loss and combustion in methane/oxygen micro-tube combustor*", Applied Thermal Engineering, Article in press, 2007.
- 6- Norton, D.G., and Vlachos, D.G., "*Combustion characteristics and flame stability at the micro scale: a CFD study of premixed methane/air mixtures*", Chemical Engineering Science, Vol.58, pp.4871-4882, 2003.
- 7- Pan, J.F., Huang, J., Li, D.T., Yang, W.M., Tang, W.X. and Xue, H., "*Effects of major parameters on micro-combustion for thermo photovoltaic energy conversion*", Applied Thermal Engineering, Vol.27, pp.1089-1095, 2007.
- 8- Yang, W.M., Chou, S.K., Shu, C., Li, Z.W. and Xue, H., "*Experimental study of micro-thermo photovoltaic systems with different combustor configurations*", Energy Conversion and Management, Vol.48, pp.1238-1244, 2007.