مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 13، ص‌ص 86-94

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه عددی تأثیر جسم مانع بر احتراق رقیق پیش‌آمیخته هیدروژن- هوا در محفظه‌های احتراقی در مقیاس میکرو

محمد حسین صابری مقدم[1]، کیومرث مظاهری[2*]، علیرضا علی‌پور[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 14115-111، kiumars@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 07 تیر 1393
پذیرش: 16 مرداد 1393
ارائه در سایت: 12 مهر 1393

کلید واژگان:
احتراق در مقیاس میکرو
شبیه‌سازی عددی
جسم مانع
دمای خارجی دیوار

چکیده

در این مطالعه به بررسی عددی تأثیر جسم مانع بر دمای خارجی دیوار محفظه‌ی احتراق در مقیاس میکرو پرداخته شده است. به منظور شبیه‌سازی پدیده احتراق رقیق هیدروژن و هوا در مقیاس میکرو، از سینتیک شیمیایی جزیی لی و همکاران (شامل 13 گونه و 19 واکنش شیمیایی) و ضرایب نفوذ مولکولی مختلف برای گونه‌ها استفاده شده است. تأثیر جسم مانع از دو دیدگاه شامل شکل جسم مانع و تعداد جسم مانع در کانال بررسی می‌شود. دو جسم مانع مثلثی و مربعی درون محفظه احتراق در نظر گرفته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تفاوت اندکی برای دمای خارجی دیوار در دو جسم مانع مشاهده می‌شود. بطوریکه مقدار بیشینه دمای خارجی دیوار برای کانال با جسم مانع مثلثی اندکی بیشتر از کانال با جسم مانع مربعی می‌باشد. درحالی‌که بازده تشعشعی برای جسم مانع مربعی بیشتر از جسم مانع مثلثی است. در بخش دوم، تعداد اجسام مانع بر روی پدیده احتراق در محفظه‌های در مقیاس میکرو بررسی شده است. با مقایسه دمای خارجی دیوار برای محفظه‌های احتراقی شامل یک، دو و چهار جسم مانع مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد جسم مانع، دمای خارجی دیوار افزایش می‌یابد که این امر ناشی از ایجاد یک میدان حرارتی نسبتاً یکنواخت در محفظه احتراقی است.

Numerical study of bluff body effect in lean premix hydrogen/air combustion in a micro- scale combustor

Mohammad Hossein Saberi Moghaddam[1], Kiumars Mazaheri[2*], Alireza Alipoor[3]

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, kiumars@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 June 2014
Accepted 07 august 2014
Available Online 04 October 2014

Keywords:
Combustion in small scale
Numerical simulation
Bluff body
Outer wall temperature

ABSTRACT

The present numerical study investigates the effect of a bluff body on outer wall temperature in micro scale combustor. Combustion of lean premixed hydrogen-air mixture is simulated in two dimensions domain utilizing the detailed chemistry of Li et al. (13 species with 19 chemical reactions) and different mass diffusivity for each species. The effect of bluff body in combustor is studied in two viewpoints: shape of bluff body and number of bluff bodies. Two shapes of bluff body including square and triangular shape are considered to study the combustion efficiency and outer wall temperature. The results illustrate that the shape of bluff body does not have an obvious effect on outer wall temperature so triangular shape outer wall temperature is slightly higher than square shape. However combustion efficiency of the square bluff body is larger than the triangular one. In the second part, the effect of bluff body number (i.e. one, two and four bluff bodies) in micro scale combustor is examined on combustion characteristics. With the increasing number of bluff bodies, the outer wall temperature increases. This is because of the creation of a uniform temperature field in micro scale combustor.

1 - مقدمه

با توسعه‌ی علم بشری و نیاز روزافزون به انرژی، افزایش تقاضا برای استفاده از وسایل احتراقی در مقیاس‌های کوچک (به دلیل داشتن دانسیته‌ی انرژی بالا) مشاهده می‌شود. توجه به همین موضوع، بررسی اصول احتراقی در مقیاس‌های میکرو و مزو امری ضروری به حساب می‌آید؛ اما با توجه به نرخ بالای اتلاف حرارت از دیواره‌ها به واسطه نسبت سطح به حجم بالا در این مقیاس، مدیریت حرارتی برای ایجاد احتراقی پایدار نیاز است [1،2].

نورتون و ولاکوس پایداری احتراق در کانال‌های میکرو برای مخلوط‌های استوکیومتری متان- هوا [3] و پروپان- هوا [4] را با استفاده از روش‌های عددی بررسی نمودند. ایشان تأثیر پارامترهایی نظیر رسانش دیوار، ضریب انتقال حرارت خارجی و سرعت ورودی مخلوط سوخت و هوا را بر پایداری شعله بررسی کردند. همچنین ایشان مشاهده کردند که شعله در این ابعاد با

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. H. Saberi Moghaddam, K. Mazaheri, A. Alipoor, Numerical study of bluff body effect in lean premix hydrogen/air combustion in a micro- scale combustor, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 13, pp. 86-94, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.19.2]

دو سازوکار اصلی خاموش می‌شود. مکانیزم حرارتی و مکانیزم سینتیکی. مکانیزم‌های بیان شده تأثیر بسزایی در حدود شعله‌وری بالا و پایین برای این نوع از احتراق‌ها ایجاد می‌کنند.

ریماندو و همکاران [5] به صورت عددی تأثیر جنس دیوار را بر احتراق پیش آمیخته‌ی استوکیومتریک متان-هوا در محفظه‌های در مقیاس مزو بررسی کردند. ایشان مشاهده کردند با افزایش ضریب هدایت حرارتی دیوار، حدود شعله‌وری و گرادیان دما در دیوار کاهش می‌یابد.

لی و کان ساختار و مکانیزم پایداری شعله پیش مخلوط متان-هوا در ابعاد میکرو را به منظور کاربردهای تولید توان بررسی نمودند. ایشان با استفاده از تحلیل ابعادی نشان دادند که نرخ اتلاف حرارت از طریق دیواره به کل حرارت تولیدی از احتراق با کاهش ابعاد محفظه احتراق، افزایش می‌یابد. اگر این نرخ خیلی بالا باشد احتراق خود انتشار، غیرممکن می‌شود و می‌تواند منجر به خاموشی حرارتی برای احتراق‌های در مقیاس میکرو شود [6]. هووا و همکاران به شبیه‌سازی عددی احتراق پیش آمیخته‌ی هیدروژن-هوا با استفاده از سینتیک تفضیلی لی و همکاران(با 13گونه و 19 واکنش شیمیایی) به منظور شناسایی تأثیر مرز حرارتی دیوار بر احتراق، پرداختند. ایشان مشاهده کردند شرط مرزی جابجایی در دیوار نسبت به شرط مرزی آدیاباتیک تأثیر بیشتری در پایداری احتراق داشته و همچنین بازده احتراق را افزایش می‌دهد [7].

کو و رونی به صورت دوبعدی به شبیه‌سازی عددی احتراق پیش آمیخته مغشوش هیدروژن-هوا پرداختند ایشان جریان‌هایی با عدد رینولدز بیش از 500 در ابعاد میکرو را مغشوش معرفی کردند. همچنین ایشان مشاهده کردند سهم انتقال حرارت تشعشع بیش از جابجایی در این مقیاس است [8].

وان و همکاران به صورت تجربی و عددی تأثیر جسم مانع[1]، در احتراق پیش‌آمیخته رقیق هیدورژن هوا را بررسی کردند. در کار تجربی ایشان حد شعله‌وری بالا[2] با حضور جسم مانع، از نسبت هم‌ارزی 0/4 به 0/6 افزایش یافت. همچنین ایشان در کار عددی خود نشان دادند که با افزایش سرعت ورودی، بیشینه دمای خارجی دیوار افزایش می‌یابد [9]. هیوا و همکاران در یک حل عددی و به صورت دوبعدی، احتراق پیش آمیخته هیدروژن- هوا درون محفظه استوانه‌ای شامل پله انبساطی را شبیه‌سازی کردند. ایشان مشاهده نمودند که تغییر سطح ناگهانی به واسطه‌ی وجود پله باعث ایجاد یک گردابه گرمایی شده که این امر باعث افزایش حدود شعله‌وری خواهد شد در نتیجه ایده‌ی استفاده از جسم مانع برای داشتن احتراق پایدار مورد استفاده قرار گرفت [10].

زروندی و همکاران به صورت دو بعدی به بررسی حرارت آزاد شده از واکنش، به دیوار و نیز به بررسی تأثیر انتقال حرارت به دیوار خارجی در صورت افزودن هیدوژن به مخلوط متان-هوا به محفظه‌ی احتراق میکرو پرداختند. ایشان به عوامل موثر بر توزیع دمای خارجی دیوار از قبیل ضریب هدایت حرارت، ضریب انتقال حرارت جابجایی محیط و نیز ضریب تشعشع پرداختند. ایشان مشاهده کردند با افزایش ضریب جابجایی و نیز ضریب صدور تشعشعی، دمای سطح خارجی دیوار کاهش می‌یابد [11]. بیگ محمدی و همکاران به بررسی تأثیر وجود سیم در محفظه‌ی احتراق در دو بعد پرداختند. ایشان مشاهده کردند که استفاده از سیم باعث تغییر مکان شعله در محفظه‌ی احتراق خواهد شد. همچنین ایشان در این مقاله به افزایش دمای خارجی دیوار در صورت استفاده از سیم نیز اشاره کردند [12].

فان و همکاران به بررسی شکل مانع در توزیع دمای خارجی دیوار در دو بعد پرداختند. ایشان مشاهده کردند که استفاده از جسم مانع با شکل نیم‌دایره‌ای باعث افزایش بیشینه‌ی دما در دیوار، در نتیجه افزایش حد شعله‌وری نسبت به جسم مانع مثلثی می‌شود. ایشان مشاهده کردند گرمای اتلافی از طریق جابجایی نسبت به تشعشع در حالت استفاده از مانع مثلثی مقدار بسیار کمی دارد [13].

با توجه به تحقیقات انجام شده، یکی از عوامل موثر بر پایداری احتراق در مقیاس میکرو، وجود جسم مانع می‌باشد که در کارهای مختلف آزمایشگاهی و عددی به آن اشاره شده است. از طرف دیگر تنها در مرجع [13] فقط به تأثیر شکل جسم مانع در حد شعله‌وری و توزیع دمای دیوار خارجی پرداخته شده است. در کار حاضر به بررسی تأثیر جسم مانع با هندسه‌های مثلثی و مربعی و همچنین تعداد آن‌ها در توزیع دمای خارجی دیوار پرداخته شده است. این شبیه‌سازی‌ها به صورت دو بعدی و با در نظر گرفتن سینتیک شیمیایی 13 گونه و 19 واکنش به همراه ضرایب نفوذ مولکولی مختلف برای گونه‌های مختلف و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف بر توزیع دمای خارجی دیوار از قبیل سرعت ورودی، نسبت هم‌ارزی نیز بررسی شده است.

2- معادلات حاکم

با در نظر گرفتن سیال به عنوان محیط پیوسته، معادلات حاکم بر سیال شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم، گونه و انرژی است [14].

رابطه (1) معادله پیوستگی، رابطه (2) معادله بقای مومنتوم و رابطه (3) معادله بقای انرژی را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

در رابطه(1) ρ چگالی و u بردار سرعت است.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T\right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \sum_{i=1}^{N_g} h_i \dot{\omega}_i \quad (3)$$

در این رابطه λ، c_p و h_i به ترتیب ضریب هدایت حرارتی مخلوط، ظرفیت حرارتی و آنتالپی گونه i ام هستند. جمله $\dot{\omega}_i$ مربوط به نرخ تشکیل یا از بین رفتن گونه شیمیایی i ام است که با توجه به سینتیک شیمیایی مشخص می‌شود. رابطه (4) معادله بقای گونه را به‌صورت زیر نشان می‌دهد.

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

در معادله بقای گونه،Y_i و V_i به ترتیب کسر جرمی گونه و سرعت نفوذی گونه i ام هستند.

طبق معادله حالت گاز ایده آل (رابطه (5)) داریم:

$$\rho = \frac{PMW_{mix}}{R_u T} \quad (5)$$

در معادله حالت گاز ایده آل، MW_{mix} و R_u به ترتیب جرم مولکولی مخلوط و ثابت جهانی گازها هستند.

معادله‌ی انتقال حرارت هدایت در دیوار به صورت رابطه (6) در نظر گرفته شده است؛ که در آن k_s ضریب هدایت حرارت جامد در نظر گرفته می‌شود [12،11].

1- Bluff body
2-Blow off

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.19.2]

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_s\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_s\frac{\partial T}{\partial y}\right)=0 \qquad (6)$$

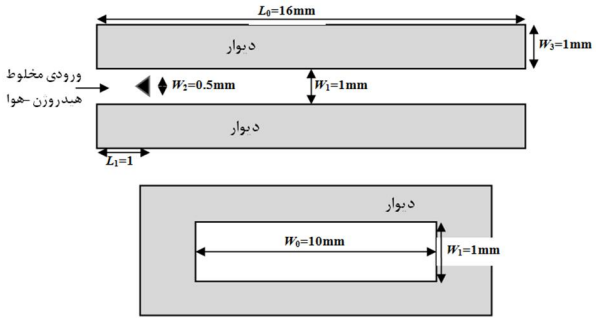
ظرفیت حرارتی[1]مخلوط، ویسکوزیته‌ی مخلوط و ضریب رسانش[2] از روش میانگین وزنی کسر جرمی گونه‌ها[3] محاسبه شده است. سینتیک شیمیایی فاز گازی احتراق مخلوط هیدروژن-هوا استفاده شده مربوط به لی و همکاران [15] با 19 واکنش شیمیایی و 13 گونه می‌باشد.

3- روش حل عددی

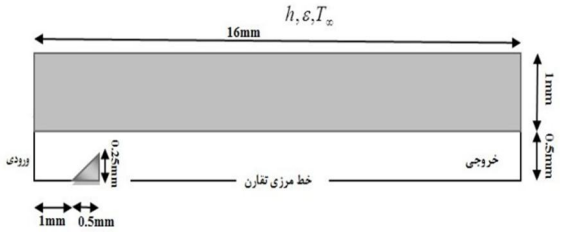
به منظور بررسی پدیده احتراق در محفظه‌های میکرو، هندسه‌ی مربوط به کار وان [9] انتخاب شده است. این هندسه در شکل 1 نشان داده شده است. همان طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود به دلیل نسبت منظری بالا[4] $(W_1/W_0 = 1/10)$ می‌توان محفظه‌ی احتراق را به صورت دو بعدی شبیه‌سازی کرد. از طرف دیگر با فرض متقارن بودن جریان می‌توان نیمی از هندسه را در نظر گرفت بنابراین هندسه در نظر گرفته شده به صورت شکل 2 فرض شد.

برای محاسبه ضرایب نفوذ مولکولی از اطلاعات نرم‌افزار کمکین[5] استفاده شده است. با توجه به مرجع [8] برای سرعت جریان ورودی برابر با 10 متربرثانیه (رینولدز500) می‌توان جریان را مغشوش در نظر گرفت. به دلیل تأثیر دیوار و نیز وجود گردابه‌های پشت مانع از مدل k-ε Realizable استفاده شده است [9]. با توجه به مراجع [7،6]، برای محاسبه‌ی برهم‌کنش توربولانس و احتراق از مدل نرخ محدود[6] استفاده شده است. شرط مرزی ورودی شامل پروفیل سرعت ثابت 10 متر بر ثانیه با دمای 300 کلوین می‌باشد. شرط مرزی تقارن در خط مرکزی و در مرز خروجی، فشار خروجی[7] برابر با فشار مرجع $10^5 \times 1.013$ پاسکال در نظر گرفته شده است.

به دلیل تأثیر تشعشع در توزیع دمای خارجی دیوار باید انتقال حرارت



شکل 1 طرحواره مسئله مورد بررسی



شکل 2 طرحواره مسئله شبیه‌سازی شده به همراه شرایط مرزی

تشعشع نیز در نظر گرفته شود، جهت شبیه‌سازی تشعشع از روش جهت‌های مجزا (DO[8]) استفاده شده است [8]. انتقال حرارت از دیوار به محیط اطراف از دو طریق جابجایی و تشعشع صورت می‌گیرد، رابطه‌ی شرط مرزی خروجی دیوار به صورت رابطه (7) در نظر گرفته می‌شود.

$$q = h(T_{w,o} - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_{w,o}^4 - T_\infty^4) \qquad (7)$$

که در این رابطه h ضریب جابجایی σ ضریب ثابت استفان بولتزمن وε ضریب صدور دیوار می‌باشد. در شرایط مورد بررسی محیط بیرون دارای ضریب جابجایی $20W/m^2K$ و محیط دارای دمای 298K می‌باشد همچنین جنس مانع کوارتز با ضریب هدایت حرارتی 1W/mK در نظر گرفته شده است که دارای ضریب صدور 0/93 می‌باشد.

از الگوریتم سیمپل برای کوپلینگ بین سرعت و فشار استفاده شده است نحوه گسسته سازی مرتبه دو بالا دست[9]، همچنین شرایط حل به صورت پایا در نظر گرفته شده است. مقدار باقی‌مانده برای همگرایی حل معادلات مقدار 1×10^{-6} در نظر گرفته شده است.

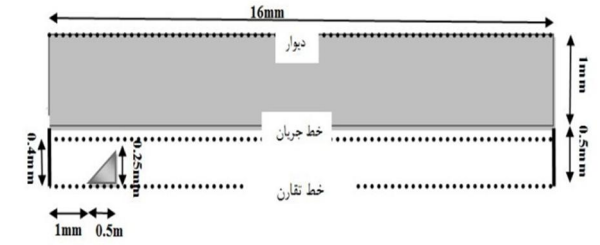
4- نتایج و بحث

در این بخش تأثیر پارامترهای مختلف شامل نوع جسم مانع و تعداد جسم مانع بر روی سه خط بررسی می‌شود این سه خط بر اساس شکل 3 «دیوار خارجی»، «خط جریان» و «خط تقارن» نام‌گذاری شده‌اند.

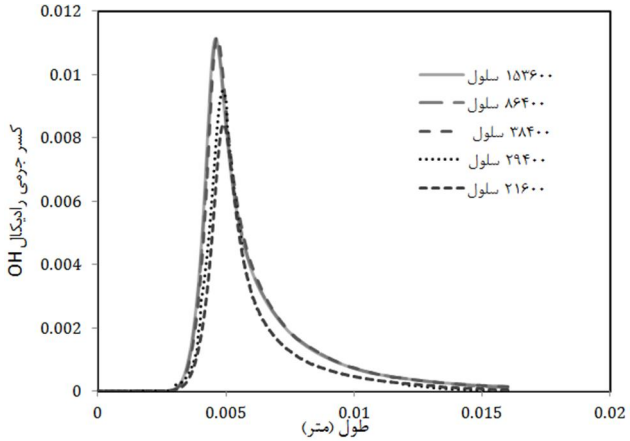
4-1- استقلال حل از شبکه و صحت‌سنجی

در شکل 4 استقلال حل از شبکه برای مسئله مورد نظر نشان داده شده است. تعداد سلول‌های شبکه‌ای منظم که به ازای آن نتایج مستقل از شبکه می‌شود 38400 سلول می‌باشد.

شکل 5 توزیع دمای خارجی دیوار به ازای نسبت هم‌ارزی 0/5 و سرعت ثابت



شکل 3 نمایش خطوط مربوط به داده‌های خروجی



شکل 4 پروفیل کسر جرمی هیدروژن بر روی خط جریان برای احتراق هیدروژن-هوا با نسبت هم ارزی 0/5

1- Specific heat
2- Thermal conductivity
3- Mass fraction weighted averaged of species transport
4- Aspect ratio
5- Chemkin
6 - Finite rate
7- Pressure outlet

8- Discrete Ordinate
9- Second order upwind

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.19.2]

10متربرثانیه برای احتراق هیدروژن با هوا در کار حاضر نشان داده شده است که با نتایج حاصل از مرجع [9] مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مطابقت خوبی بین نتایج حاصل مشاهده می‌شود.

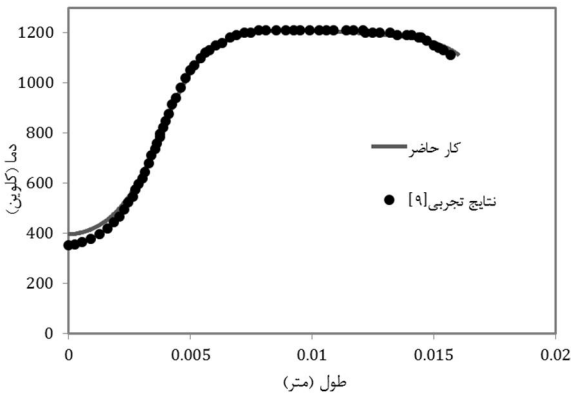
4-2- تأثیر سرعت ورودی و نسبت هم‌ارزی بر توزیع دمای خارجی دیوار

شکل شماره 6 کانتور توزیع دما برای سرعت‌های ورودی مختلف برای احتراق پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا را نشان می‌دهد.

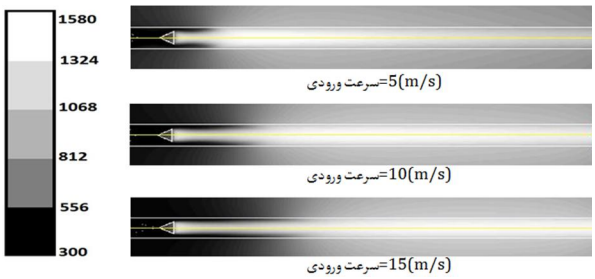
همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود با افزایش سرعت ورودی، ناحیه واکنش[1] کشیده‌تر می‌شود که این رفتار در شکل 8 نیز نشان داده شده است، در نتیجه مکان دمای بیشینه‌ی جریان با افزایش سرعت جریان ورودی به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کند. با حرکت محیط دما بالا به پایین دست جریان طول ناحیه‌ی مربوط به انتقال حرارت تشعشع و جابجایی با محیط بیرون کاهش می‌یابد در نتیجه اتلاف حرارت از دیوار کمتر و در نتیجه دمای بیشینه‌ی دیوار بیشتر می‌شود [9].

شکل 7 پروفیل توزیع دمای خارجی دیوار را به ازای سرعت ورودی مختلف نشان می‌دهد.

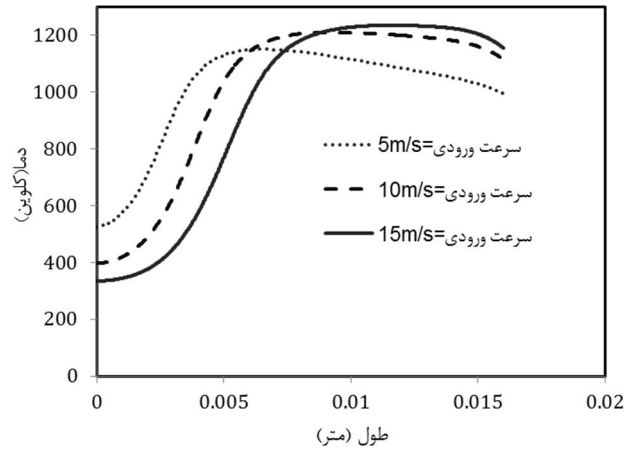
همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود با افزایش سرعت جریان ورودی، بیشینه‌ی دمای خارجی دیوار افزایش می‌یابد این موضوع ناشی از افزایش طول ناحیه پیش گرم شدن سیال است که تحت تأثیر دمای بالای دیوار بالا دست می‌باشد بنابراین احتراق در دمای بالاتری ایجاد خواهد شد [3]. همچنین به دلیل انتقال حرارت کمتر به محیط در ناحیه‌ی پایین دست جریان به دلیل کم شدن طول ناحیه‌ی واکنش، دمای بیشینه‌ی بالاتری حاصل می‌شود.



شکل 5 پروفیل توزیع دما بر روی دیواره برای احتراق هیدروژن-هوا با نسبت هم ارزی 0/5



شکل 6 کانتور توزیع دما (کلوین) برای احتراق هیدروژن-هوا با نسبت هم ارزی 0/5 و به ازای سرعت‌های ورودی مختلف

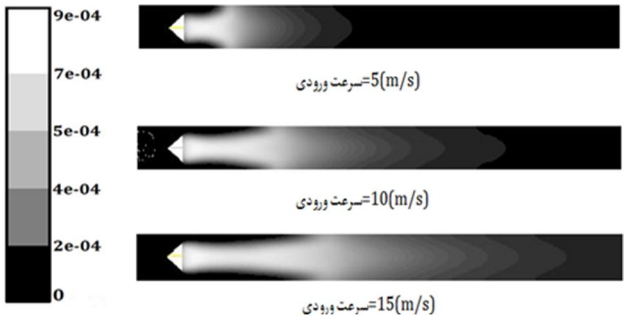


شکل 7 پروفیل توزیع دما بر روی دیوار برای احتراق هیدروژن-هوا با نسبت هم ارزی 0/5 به ازای سرعت‌های ورودی مختلف

شکل 8 کانتور کسر جرمی H برای احتراق هیدروژن-هوا را به ازای سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد.

با افزایش سرعت ورودی ناحیه واکنشی (ناحیه‌ای که در آن رادیکال هیدروژن(H) وجود دارد [9]) کشیده‌تر می‌شود و با بیشتر شدن سرعت، ناحیه واکنش به دو قسمت تقسیم می‌شود (گردابه‌ی پشت مانع و ناحیه جدا شده از گردابه) که پس از افزایش تعداد مراحل حل به ازای کاهش مقدار باقیمانده، علاوه بر خاموشی ناحیه کشیده شده، گردابه‌ی به وجود آمده در پشت مانع نیز کوچک‌تر شده و در نهایت به خاموشی منجر خواهد شد.

شکل 9 تأثیر نسبت هم‌ارزی برای سرعت ورودی ثابت با استفاده از کانتور توزیع دما را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هم‌ارزی و نزدیک شدن به حالت استوکیومتریک به دلیل آزادسازی گرمای بیشتر، توزیع دما برای کل دامنه افزایش می‌یابد.



شکل 8 کانتور کسر جرمی H برای احتراق هیدروژن-هوا با نسبت هم ارزی 0/5 و به‌ازای سرعت‌های ورودی مختلف



شکل 9 کانتور توزیع دما (کلوین) برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و به ازای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

1- Reaction zone

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.19.2]

شکل 10 پروفیل توزیع دمای خارجی دیوار برای احتراق هیدروژن-هوا برای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک سرعت ثابت با افزایش نسبت هم‌ارزی و نزدیک شدن به حالت استوکیومتری دمای جریان و همچنین دمای خارجی دیوار افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر با افزایش نسبت هم‌ارزی گرمای بیشتری آزاد شده در نتیجه دمای خارجی دیوار نیز افزایش می‌یابد [14].

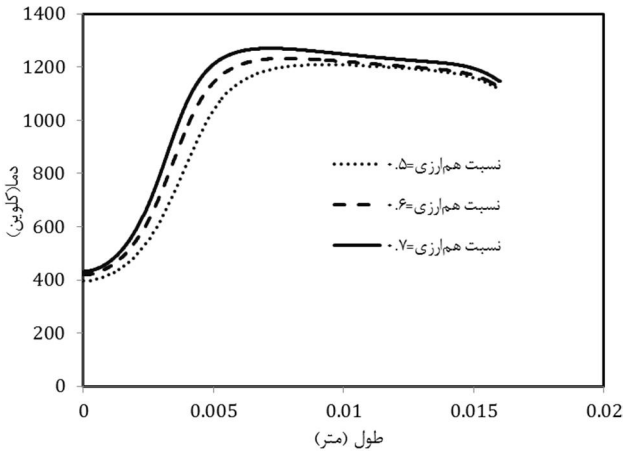
شکل 11 کانتور کسر جرمی رادیکال H را به ازای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف نشان می‌دهد.

در شکل 11 نشان داده شده است که با افزایش نسبت هم‌ارزی شدت واکنش‌ها در نتیجه کسر جرمی رادیکال فعال H افزایش می‌یابد. برای مقایسه کارایی محفظه احتراق، بازده تشعشعی صدوری[1] تعریف می‌شود [16]. بازده تشعشعی صدوری با استفاده از رابطه (8) محاسبه می‌شود

$$\eta = \frac{\pi d \varepsilon \sigma \sum_{i=1}^{N} T_{WO,i}^{4} L_i}{\dot{m}_{H2} H_c} \quad (8)$$

که در این رابطه $T_{WO,i}^{4}$ دمای دیواره خارجی محفظه، H_c انرژی حرارتی آزاد شده در محفظه احتراق، d قطر $\dot{m}_{H2}$ مقدار جرم ورودی و L_i طول هر مقطع جهت تشعشع می‌باشد.

همان‌طور که در جدول شماره 1 مشاهده می‌شود با افزایش نسبت هم‌ارزی و نزدیک شدن به حالت استوکیومتریک مقدار گرمای آزاد شده افزایش می‌یابد در نتیجه بازده صدوری تشعشعی نیز افزایش می‌یابد.



شکل 10 پروفیل توزیع دمای خارجی دیوار برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ورودی ثابت 10 m/s و نسبت هم‌ارزی‌های مختلف



شکل 11 کانتور کسر جرمی رادیکال H برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و به ازای نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

1- Radiation emmiter efficiency

جدول 1 بازده تشعشعی برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت 10m/s و نسبت هم‌ارزی متغیر

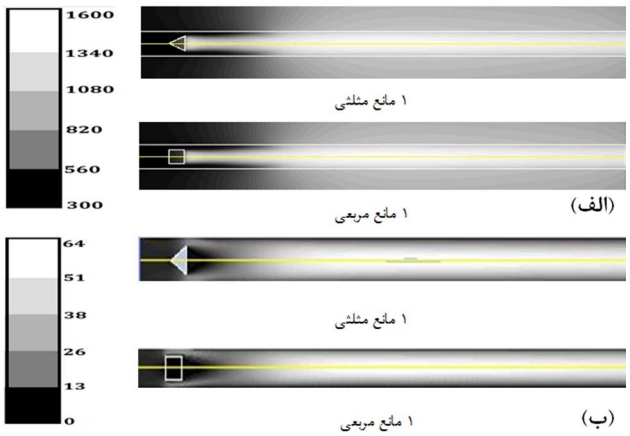
نسبت هم‌ارزی	بازده٪
0/5	50/06
0/6	56/27
0/7	72/26

4-3- تأثیر انواع و تعداد اشکال اجسام مانع بر توزیع دمای خارجی دیواره

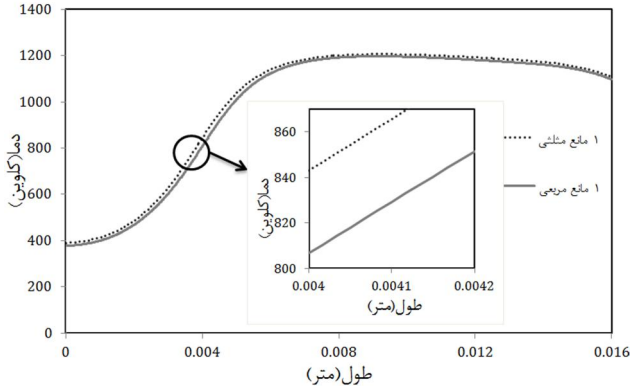
در ابتدا به تأثیر شکل جسم مانع بر دمای خروجی جریان و در ادامه به تأثیر تعداد جسم مانع در ایجاد گردابه‌های تشکیل شده در پشت مانع پرداخته می‌شود در این قسمت لازم به ذکر است که نسبت طول به عرض جسم مانع ثابت در نظر گرفته شده است. شکل 12 کانتور توزیع دما و سرعت برای دو شکل جسم مانع، مربع و مثلث را نشان می‌دهد.

شکل 12 نشان می‌دهد بیش‌ترین دما در دو حالت جسم مانع مربعی و مثلثی به ترتیب برابر 1556کلوین و 1559کلوین است. از طرف دیگر در شکل (ب) به دلیل ثابت بودن ارتفاع موانع، طول گردابه‌ی ایجاد شده در پشت مانع در کانتور سرعت با یکدیگر برابر است.

در شکل 13 پروفیل توزیع دمای خط جریان در دو حالت برای شکل جسم مانع در سرعت جریان ورودی ثابت 10m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 آورده شده است.



شکل 12 کانتور الف)توزیع دما (کلوین) ب)سرعت (متر بر ثانیه) برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 برای اجسام مانع مختلف



شکل13 پروفیل توزیع دمای جریان برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 به منظور بررسی اشکال مختلف مانع

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.19.2]

همان طور که در شکل 13 مشاهده می‌شود، پروفیل توزیع دما مربوط به مانع مثلثی دمای کمی بیشتری را نسبت به مانع مربعی نشان می‌دهد (به عنوان مثال شکل 13 در طول 0/004 متر اختلاف حدوداً 40 درجه‌ای را نشان می‌دهد). از طرفی نرخ انتقال حرارت محسوس حاصل از منبع حرارتی واکنش[1] برای حالتی که دارای مانع مثلثی است نسبت به حالتی که دارای مانع مربعی می‌باشد به ترتیب برابر 8370/37w و 8374/17w به دست آمده است؛ که این اختلاف را می‌توان ناشی از پیش‌گرم شدن بیشتر سوخت و هوا در حالت استفاده از مانع مثلثی در نتیجه بالاتر بودن دما در حالت استفاده از مانع مثلثی نام برد.

شکل 14 کانتور کسر جرمی OH را برای اشکال مختلف مانع نشان می‌دهد.

شکل 14 نشان می‌دهد که بیش‌ترین کسر جرمی گونه OH مربوط به حالتی است که از جسم مانع مربعی استفاده شده است. در این حالت این مقدار برابر 5.79×10^{-3} است درحالی‌که در حالت جسم مانع مثلثی این مقدار 5.63×10^{-3} می‌باشد به همین دلیل طول ناحیه کشیدگی در حالت مربعی بیش از مثلثی است. از طرفی فان [13] گزارش داد که بیشتر بودن طول ناحیه واکنش باعث افزایش حد شعله‌وری بالا می‌شود. با توجه به بیشتر بودن ناحیه واکنش در حالت مانع مربعی نسبت به حالت مانع مثلثی حد شعله‌وری بالا برای جسم مانع مربعی بیش از مانع مثلثی است.

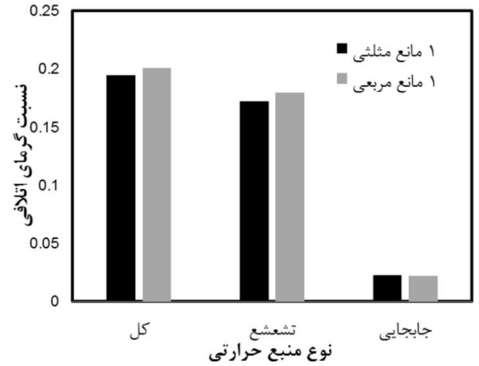
در ادامه برای مقایسه اتلافات حرارتی، ضریب نسبت اتلاف حرارتی به صورت نسبت گرمای عبوری از دیواره خارجی Q' به انتالپی سوخت ورودی Q تعریف می‌گردد [8]. طبق رابطه (9) داریم:

$$\Phi = Q'/Q \qquad (9)$$

گرمای اتلافی از دیوار به صورت گرمای جابجایی، تشعشع و مجموع آن دو محاسبه و در شکل 15 آورده شده است.



شکل14 کانتور توزیع کسر جرمی OH برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 به منظور بررسی اشکال مختلف مانع



شکل15 نسبت گرمای اتلافی در محفظه‌ی احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 به منظور بررسی شکل مانع

همان‌طور که مشاهده می‌شود گرمای حاصل از انتقال حرارت جابجایی برای هر دو حالت جسم مانع تقریباً برابر 2/21% به دست آمده است. از طرف دیگر نسبت گرمای تشعشعی اتلافی به گرمای کل انتقالی در دیوار برای جسم مانع مربعی و مثلثی به ترتیب 18/1% و 17/2% به دست آمده است. در نتیجه گرمای اتلافی کل از دیوار برای موانع مربعی و مثلثی به ترتیب 20/3% و 19/4% مشاهده شد. در نتیجه توزیع دمای دیوار خارجی بیشتر برای جسم مانع مثلثی که در شکل 13 نشان داده شده است واضح به نظر می‌رسد.

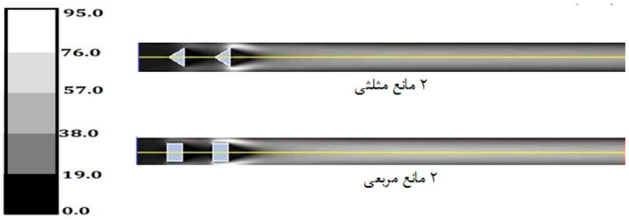
از طرفی همان طور که مشاهده می‌شود انتقال حرارت موثر از دیوار انتقال حرارت تشعشعی است که دلیل این امر را می‌توان علاوه بر ضریب صدور بالای کوارتز(0/93) به بالاتر بودن ضریب انتقال حرارت تشعشعی نسبت به جابجایی نام برد.

در ادامه‌ی بررسی تأثیر تعداد اجسام مانع بر دمای خارجی دیوار در محفظه‌های میکرو، آورده شده است. شکل 16 کانتور توزیع دما و سرعت را برای دو جسم مانع مربعی و مثلثی نشان می‌دهد.

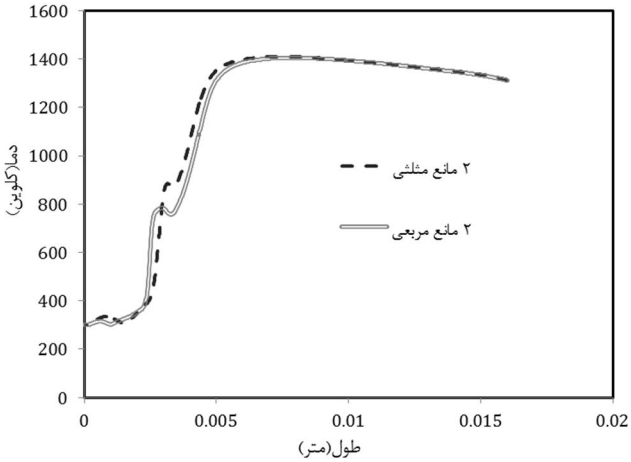
در شکل 16 مشاهده می‌شود مقدار بیشینه‌ی سرعت، برای زمانی که از دو مانع مثلثی استفاده شود بیش از حالتی است که از دو جسم مانع مربعی استفاده می‌شود در این حالت مقدار بیشینه سرعت 91 m/s می‌باشد درحالی‌که هنگامی که از دو مانع مربعی استفاده شود بیشینه‌ی سرعت 84m/s خواهد رسید.

شکل 17 توزیع دمای جریان را برای دو جسم مانع مربعی و مثلثی را نشان می‌دهد.

همان طور که در شکل 17 مشاهده می‌شود توزیع دمای مربوط به استفاده از دو جسم مانع مثلثی کمی بیش از دو جسم مانع مربعی است که دلیل آن را می‌توان بیشتر شدن سرعت جریان در حالت استفاده از دو مانع مثلثی (شکل 16) نام برد.



شکل 16 کانتور توزیع سرعت (متر بر ثانیه)
برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 به منظور بررسی تعداد اجسام مانع مختلف



شکل17 پروفیل توزیع دمای جریان برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 به منظور بررسی تعداد اشکال مختلف مانع

1- Total sensible heat transfer rate

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.19.2]

شکل 18 کانتور توزیع دما و سرعت را برای تعداد مختلف مانع را نشان می‌دهد.

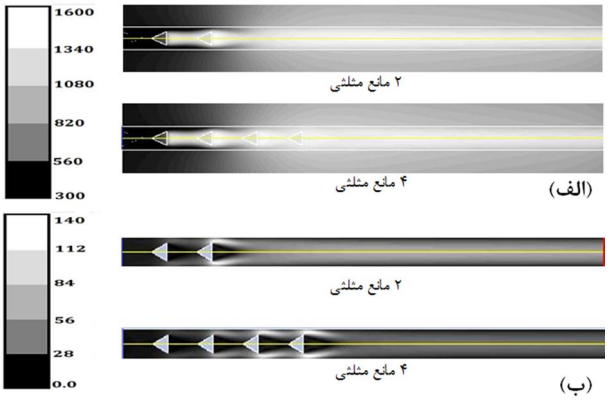
همان طور که مشاهده می‌شود بیش‌ترین سرعت در حالتی است که از 4 مانع استفاده شده است که در حدود 140m/s می‌باشد درحالی‌که در هنگام استفاده از دو جسم مانع بیش‌ترین سرعت 91m/s به دست آمده است.

در ادامه در شکل 19 تأثیر تعداد اجسام مانع در پروفیل توزیع دما خط جریان آورده شده است.

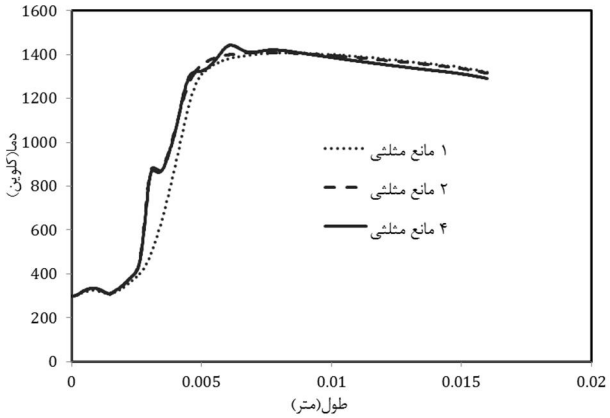
همان‌طور که در توزیع دمای مربوط به خط جریان در شکل 19 نشان داده شده، توزیع دما در حالت استفاده از دو و چهار مانع تقریباً با یکدیگر مطابقت داشته و از حالت استفاده از یک مانع بیشتر است. فقط یک مقدار بیشینه‌ی دمایی به دلیل استفاده از مانع چهارم در توزیع دمای خارجی دیوار مربوط به چهار مانع مثلثی مشاهده می‌شود. دلیل بیشتر بودن دما را نیز می‌توان مربوط به بیشتر بودن سرعت در حالت استفاده از چند مانع نام برد.

شکل 20 کانتور کسر جرمی گونه OH برای تعداد مختلف مانع مثلثی را نشان می‌دهد.

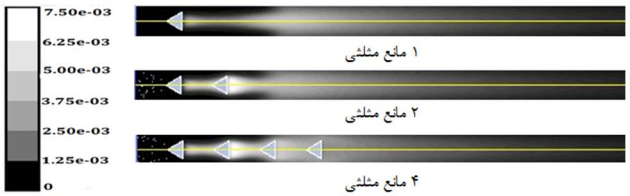
همان‌طور که در توزیع کسر جرمی مربوط به OH مشاهده می‌شود با افزایش تعداد اجسام مانع، کسر جرمی رادیکال OH افزایش می‌یابد در نتیجه پایداری شعله بیشتر و سرعت خاموشی افزایش می‌یابد[13]. با توجه به اینکه موانع به عنوان یک منبع حرارتی در محفظه عمل می‌کنند. افزایش تعداد



شکل 18 کانتور الف) توزیع دما (کلوین) ب)کانتورسرعت (متربرثانیه) برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 به منظور بررسی تعداد اجسام مانع مختلف



شکل19 پروفیل توزیع دمای جریان برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 به منظور بررسی تعداد اشکال مختلف مانع



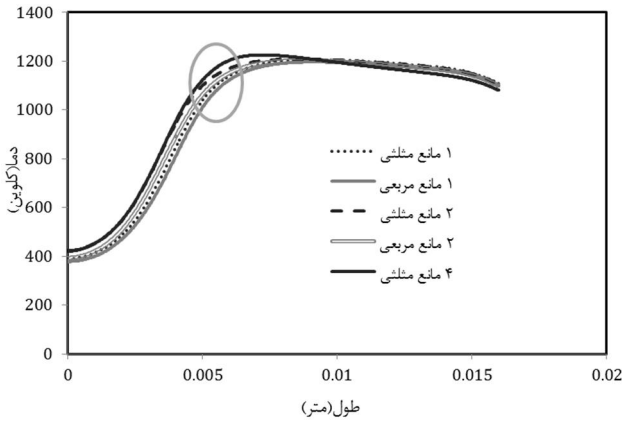
شکل20 کانتور توزیع کسر جرمی OH برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 به منظور بررسی تعداد اشکال مختلف مانع

موانع در محفظه احتراق، باعث می‌شود که انتقال حرارت درون محفظه افزایش یابد و به دنبال آن دمای جریان افزایش می‌یابد. افزایش دمای جریان باعث می‌شود که واکنش‌های مربوط به تولید رادیکال OH فعال‌تر شوند و در نتیجه غلظت گونه OH درون کانال افزایش می‌یابد. در اینجا نیز مشاهده می‌شود که افزایش تعداد موانع از دو عدد به چهار عدد باعث افزایش کسر جرمی رادیکال OH شده، به طوری که بیش‌ترین کسر جرمی رادیکال OH در هنگام استفاده از دو مانع مثلثی 7.22×10^{-3} به مقدار 7.27×10^{-3} در استفاده از 4 مانع مثلثی افزایش یافته است.

در نهایت توزیع دما بر روی دیوار برای احتراق هیدروژن-هوا برای حالت‌های مختلف و تعداد مختلف اجسام مانع در شکل 21 آورده شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود بیش‌ترین پیش گرمایش به ترتیب مربوط به چهار جسم مانع مثلثی، دو جسم مانع مثلثی، دو جسم مانع مربعی، یک جسم مانع مثلثی و در نهایت یک جسم مانع مربعی است که این امر با توجه به توزیع سرعت بیان شده در قسمت قبل کاملاً واضح به نظر می‌رسد.

در جدول 2 بازده تشعشعی هر یک از حالات بیان شده محاسبه شده است. نتایج زیر را می‌توان از جدول بازده تشعشعی صدوری برداشت کرد



شکل21 پروفیل توزیع دمای جریان برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 به منظور بررسی تعداد و اشکال مختلف مانع

جدول 2 بازده تشعشعی صدوری برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت0/5به منظور بررسی تعداد و اشکال مختلف مانع

تعداد و نوع شکل مانع	بازده٪
1 مانع مثلثی	48/20
1 مانع مربعی	50/27
2 مانع مثلثی	51/08
2 مانع مربعی	52/34
4 مانع مثلثی	52/70

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.19.2]

*مانع مربعی دارای بازده تشعشعی بالاتری نسبت به مانع مثلثی است دلیل این امر را می‌توان کشیدگی بیشتر ناحیه‌ی احتراق در حالت استفاده از مانع مربعی دانست.

*درحالی‌که بازده تمام این محفظه‌های احتراق به همراه جسم مانع بسیار بالا می‌باشد، هر چه تعداد موانع افزایش یابد بازده احتراقی نیز افزایش می‌یابد.که این امر می‌تواند ناشی از ایجاد یک میدان حرارتی نسبتاً یکنواخت در محفظه‌ی احتراقی باشد که باعث مصرف بهتر سوخت ورودی به محفظه‌ی احتراق می‌شود.

4-4- تأثیر ضریب هدایت حرارتی بر توزیع دمای خارجی دیوار

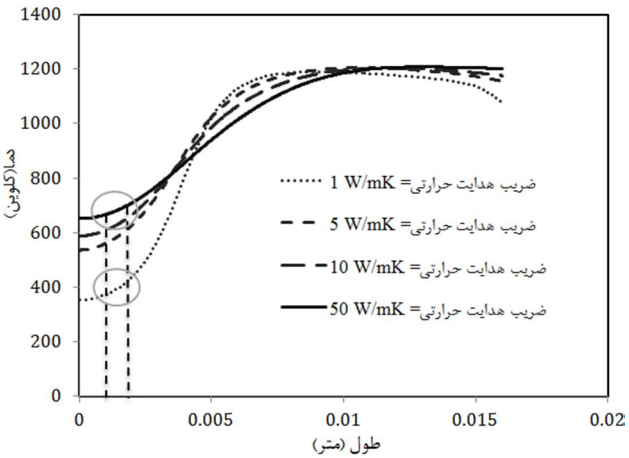
شکل 22 تأثیر ضریب هدایت حرارتی بر روی توزیع دمای خارجی دیوار را نشان می‌دهد.

همان طور که در شکل22 مشاهده می‌شود با افزایش ضریب هدایت حرارتی، انتقال گرما به بالادست جریان افزایش یافته و بنابراین دمای بالا دست جریان افزایش می‌یابد. از طرف دیگر مشاهده می‌شود با افزایش ضریب هدایت حرارت گرادیان دما کاهش می‌یابد و توزیع یکنواخت‌تری از دما در دیوار مشاهده می‌شود. این امر سبب افزایش اتلافات شده در نتیجه باعث کاهش حدود شعله‌وری می‌شود [5]. از نتایج دیگری که از نمودار برداشت می‌شود (در طول1mm تا 1/5mm) اختلاف دمای بسیار زیادی است که در دو طرف جسم مانع، در حالت استفاده از ضریب هدایت‌های مختلف مشاهده شده است(همان‌طور که در شکل 24 نیز برای دو ناحیه مشخص آورده شده است) اختلاف دما در حدود 300 تا 400 کلوین برای ضریب هدایت بالاتر مشاهده می‌شود که این امر باعث پیش‌گرم شدن بیشتر سوخت و هوای ورودی در ضریب هدایت بالاتر، در نتیجه یکنواخت‌تر شدن توزیع دما بر روی دیواره می‌شود.

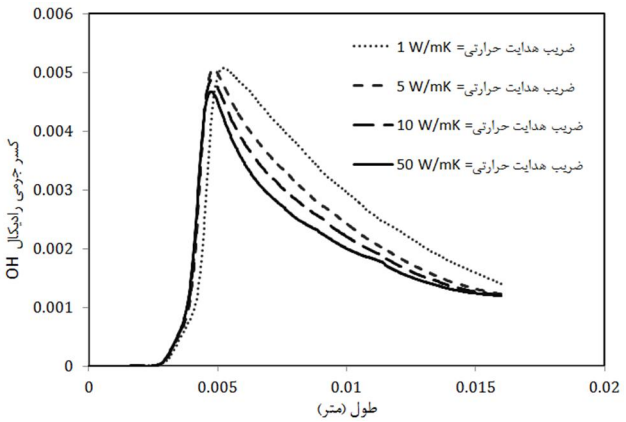
شکل 23 توزیع کسرجرمی گونه‌ی OH را بر روی خط جریان نشان می‌دهد.

با توجه به شکل 23 مشاهده می‌شود که با کاهش ضریب هدایت نقطه‌ی بیشینه‌ی نمودار به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کند در نتیجه گونه‌ی فعال کمتر و به تبع آن توزیع یکنواخت‌تری از دما مشاهده می‌شود.

شکل 24 کانتور کسر جرمی رادیکال OH به ازای ضرایب هدایت مختلف را نشان می‌دهد.



شکل 22 پروفیل توزیع دما بر روی دیوار برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 به همراه ضریب هدایت حرارتی متفاوت



شکل23 پروفیل کسرجرمیOH بر روی خط جریان برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 به همراه ضریب هدایت حرارتی متفاوت



شکل 24 کانتور کسر جرمی رادیکال OH برای احتراق هیدروژن-هوا با سرعت ثابت ورودی 10 m/s و نسبت هم‌ارزی ثابت 0/5 و به ازای ضریب هدایت حرارتی‌های مختلف

شکل 24 کسر جرمی OH بر روی خط جریان را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود افزایش ضریب هدایت باعث کشیده‌تر شدن ناحیه واکنش شده در نتیجه تمایل به جدا شدن و تقسیم شدن به دو ناحیه را افزایش می‌دهد در ادامه در سرعت‌های بالا باعث خاموشی سریع‌تر خواهد شد[7]. به عنوان یک نتیجه‌ی کلی می‌توان بیان نمود که وقتی دیوار رسانش حرارتی کمتری دارد گرادیان دمای بالا در دیوار ایجاد می‌شود. این موضوع توجه به مواد مناسب برای دیوار را مهم می‌سازد. اگر در عمل دیوار رسانش حرارتی بالاتری داشته باشد دمای خارجی دیوار توزیع یکنواخت تری خواهد داشت. گرادیان دما و همچنین تنش‌های حرارتی کاهش می‌یابد.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی احتراق پیش‌آمیخته رقیق هیدروژن-هوا در یک محفظه با مقیاس میکرو به همراه جسم مانع بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد مقدار بیشینه دمای خارجی دیوار برای کانال با جسم مانع مثلثی اندکی بیشتر از کانال با جسم مانع مربعی است. درحالی‌که بازده تشعشعی و نیز حد شعله‌وری برای جسم مانع مربعی بیشتر از جسم مانع مثلثی است. از طرفی، با بررسی تعداد اجسام مانع بر روی پدیده احتراق در محفظه‌های احتراقی در مقیاس میکرو مشاهده گردید، افزایش تعداد جسم مانع، منجر به افزایش دمای خارجی دیوار می‌شود.

6- مراجع

[1] A. C. Fernandez-Pello, “Micropower generation using combustion: Issues and approaches,” *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol. 29, No. 1, pp. 883–899, 2002.

[2] J. Vican, B. F. Gajdeczko, F. L. Dryer, D. L. Milius, I. a. Aksay, R. a. Yetter, “Development of a microreactor as a thermal source for microelectromechanical systems power generation,”

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.19.2]

Proceeding of the Combustion Institute, Vol. 29, No. 1, pp. 909–916, 2002.

[3] D. G. Norton, D. G. Vlachos, "Combustion characteristics and flame stability at the microscale: a CFD study of premixed methane/air mixtures," *Chemical Engineering Science,* Vol. 58, No. 21, pp. 4871–4882, 2003.

[4] D. G. Norton, D. G. Vlachos, "A CFD study of propane / air microflame stability," *Combustion and Flame,* Vol. 138, pp. 97–107, 2004.

[5] S. Raimondeau, D. G. Norton, D. G. Vlachos, R. I. Masel, "Modeling of hightemperature micro burners" *Proceeding of the Combustion Institute,* Vol. 29, pp. 901-907, 2002.

[6] K.H. Lee, O.C. Kwon, "A numerical study on structure of premixed methane – air microflames for micropower generation"*Chemical Engineering Science,* Vol. 62, pp. 3710 – 3719, 2007.

[7] J. Hua, M. Wu, and K. Kumar, "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.

[8] C. H. Kuo, P. D. Ronney, "Numerical modeling of non-adiabatic heat recirculating combustors, "*Proceeding of the Combustion Institute,* Vol. 31, pp. 3277-3284, 2007.

[9] J. Wan, A. Fan, K. Maruta, H. Yao, 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,* Vol. 37, No. 24, pp. 19190-19197, 2012.

[10] J. Hua, M. Wu, K. Kumar, "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.

[11] J. Zarvandi, S. Tabejamaat, M. Baigmohammadi," Numerical study of the effects of heat transfer methods on (CH_4+ H)-AIR pre-mixed flames in a micro-stepped tube". *Energy,* Vol. 44, No. 1, pp. 396-409, 2012.

[12] M. Baigmohammadi, S. Sarrafan, S. Tabejamat, " Numerical study of the effects of wire insertion on CH_4(methane)/AIR pre-mixed flame in a micro combustor, " *Energy,* Vol. 54, pp. 271-284, 2013.

[13] A. Fan, " Effect of bluff body shape on the blow-off limit of hydrogen/air flame in a planar micro-combustor, "*Applied Thermal Engineering,* Vol. 62, No. 1, pp. 13-19, 2014.

[14] S. R. Turns, An introduction to combustion. *Second Eddition, NewYork:McGRAW-Hill,* 2000

[15] J. Li, Z. W. Zhao, A. Kazakov, F. L. Dryer, " An updated comprehensive kinetic model of hydrogen combustion, " *International Journal of Chemical Kinetics* ,Vol. 36, pp. 566-575, 2004.

[16] J. Li, S. K. J. Li, S.K. Chou, Z.W. Li, W.M. Yang, "Characterization of Wall Temperature and Radiation Power Through Cylindrical Dump Micro-Combustors," *Combustion and Flame,* Vol. 156, pp. 1587-1593, 2009.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.19.2]