



آنالیز سه بعدی یک مشعل متخلخل تابشی در شرایط کارکرد مختلف همراه با مدل سازی پدیده احتراق

هدی شهبانی نژاد¹، سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب²، ابراهیم جهانشاهی جواران^{3*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

* کرمان، صندوق پستی 7631818356، e.jahanshahi@kgut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 مرداد 1396

پذیرش: 15 آبان 1396

ارائه در سایت: 10 آذر 1396

کلید واژگان:

مشعل متخلخل تابشی

احتراق

واکنش چند مرحله ای

بازده تابشی

چکیده

در تحقیق حاضر، شبیه سازی فرایند احتراق و انتقال حرارت در یک مشعل متخلخل تابشی سه بعدی به صورت عددی، مطالعه می شود. واکنش چند مرحله ای هوا/متان با جزئیات سینتیک شیمیایی برای مدل سازی فرایند احتراق داخل محیط متخلخل در نظر گرفته می شود. با فرض عدم تعادل حرارتی بین فاز گاز و فاز جامد، معادله های انرژی جداگانه ای برای این دو فاز لحاظ گردید. محیط متخلخل محیطی خاکستری در نظر گرفته شده که قادر به جذب، پخش و صدور انرژی تابشی است ولی فاز گاز نسبت به تابش شفاف در نظر گرفته شده است. معادله های حاکم شامل معادله های انرژی فاز گاز و فاز جامد، معادله بقای ذرات شیمیایی و معادله انتقال حرارت تابشی می باشند که بایستی به صورت همزمان حل عددی گردند. روش جهت های مجزا برای حل معادله انتقال تابشی به منظور محاسبه جمله مربوط به تابش در معادله انرژی فاز جامد استفاده می شود. نتایج شبیه سازی شامل میدان های دما برای فاز گاز و فاز جامد، توزیع نسبت جرمی ذرات و توزیع شارهای تابشی در طول مشعل می باشند. نهایتاً، اثر پارامترهای مختلف مانند ضخامت اپتیکی، نسبت پخش و نسبت هوای اضافی بر عملکرد مشعل مورد بررسی قرار می گیرد.

Three-dimensional analysis of a porous radiant burner under different operating conditions with combustion modeling

Hoda Shabani Nejad¹, Seyed Abdolreza Gandjalikhan Nassab¹, Ebrahim Jahanshahi Javaran^{2*}

1-Department of Mechanical Engineering, ShahidBahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2-Department of Energy, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

* P.O.B. 7631818356, Kerman, Iran, e.jahanshahi@kgut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 21 August 2017

Accepted 06 November 2017

Available Online 01 December 2017

Keywords:

Porous radiant burner

Combustion

Multi-step reaction

Radiant efficiency

ABSTRACT

In the present paper, combustion phenomenon and heat transfer simulation in a 3-D porous radiant burner (PRB) are numerically studied. Multi-step reaction of methane/air with detailed chemical kinetics is considered to model the combustion process inside the porous matrix. Assuming the non-local thermal equilibrium between solid and gas phases, separate energy equations are considered for these two phases. Porous medium is assumed as a gray medium that can absorb, scatter, and emit thermal radiation, whereas the gas phase is considered to be transparent to thermal radiation. The governing equations are gas and porous energy equations, the chemical species transport equation and the radiative transfer equation that should be simultaneously and numerically solved. Discrete ordinates method is used to solve the radiative transfer equation in order to calculate the radiative term in the solid energy equation. The simulation results include temperature fields for the gas and solid phase, species mass fraction distributions, and radiative heat flux distributions along the burner. Finally, the effect of different parameters such as optical thickness, scattering albedo, and excess air ratio (EAR) on the performance of the burner are explored.

1- مقدمه

مزایای متعددی نسبت به مشعل های شعله آزاد دارند. تولید کمتر آلاینده ها، توان حرارتی بالاتر، پایداری شعله بیشتر، توزیع یکنواخت حرارت در محفظه احتراق، دمای محفظه احتراق کمتر و بزرگ بودن چگالی توان را می توان از مهم ترین خصوصیات این مشعل ها بر شمرد. فرایند احتراق در این مشعل ها بر خلاف مشعل های معمولی، با شعله آزاد انجام نمی شود، بلکه به شکل سه بعدی و در داخل منافذ جسم متخلخل صورت می گیرد. در مشعل های متخلخل علاوه بر این که انتقال حرارت به طریق رسانش و جابجایی انجام می شود، به دلیل گداختگی محیط های متخلخل، انتقال حرارت از طریق

در سال های اخیر، با توجه به کاهش سوخت های فسیلی و کنترل انتشار آلاینده ها، پدیده احتراق مورد توجه قرار گرفته است. روش های بسیاری برای بهبود این معضل پیشنهاد شده است. یکی از این روش ها، استفاده از محیط های متخلخل در ترکیب وسایل احتراقی مانند مشعل است. با توجه به خواص ضعیف انتقال گرمای تابشی و هدایت در مخلوط گاز، این ایده پیشنهاد شد که با استفاده از ویژگی های گرمایی مناسب مواد جامد متخلخل می توان نرخ انتقال گرما را افزایش داد. احتراق در مشعل های متخلخل تابشی

Please cite this article using:

H. Shabani Nejad, S. A. Gandjalikhan Nassab, E. Jahanshahi Javaran, Three-dimensional analysis of a porous radiant burner under different operating conditions with combustion modeling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 105-113, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تابشی نیز حائز اهمیت است. در حالی که در مشعل های شعله آزاد، انتقال حرارت جابجایی عامل اصلی انتقال حرارت است. در یک مشعل متخلخل تابشی¹، ماتریس جامد گرما را از محفظه احتراق² به منطقه پیش گرمایش³ بوسیله انتقال حرارت هدایتی و تابشی بر می گرداند. دو ناحیه اصلی در مشعل های متخلخل وجود دارد: منطقه پیش گرمایش و منطقه احتراقی. به دلیل انتقال حرارت هدایتی و تابشی از محفظه احتراق به سمت ناحیه پیش گرمایش، دمای فاز جامد در این ناحیه بیشتر از دمای فاز گاز می باشد، که این اختلاف دما باعث انتقال انرژی حرارتی از ماتریس جامد متخلخل به جریان گاز از طریق انتقال حرارت جابجایی شده که منجر به پیش گرم شدن مخلوط گاز ورودی می شود. در حالی که در محفظه احتراق به دلیل آزاد شدن انرژی حاصل از فرایند احتراق، دمای مخلوط گاز افزایش قابل ملاحظه ای پیدا می کند که با مکانیزم مشابه در منطقه پیش گرمایش انرژی از جریان گاز به فاز جامد منتقل می شود.

اخیراً مطالعات عددی و تجربی بسیاری در زمینه احتراق در محیط های متخلخل انجام شده است. در سال 1990 ست و همکاران [1]، پدیده احتراق در مشعل های متخلخل را در حالت واقعی بررسی نمودند و دریافتند که برای داشتن بیشترین تابش خروجی بایستی ضخامت اپتیکی بزرگ باشد و اشتعال در نزدیکی مرکز ماتریس جامد رخ دهد. زوا و پریرا [2] مدل یک بعدی احتراق و انتقال حرارت در یک مشعل متخلخل دو قسمتی را مطالعه کردند. برای احتراق متان، از یک واکنش شیمیایی چند مرحله ای با 27 جزء و 73 واکنش شیمیایی در نظر گرفته شد. نتایج تحقیق آن ها شامل بررسی تأثیرات هوای اضافی، توان حرارتی و ضریب هدایت جامد بر روی احتراق و انتشار آلودگی بود. نتایج آن ها نشان دهنده این است که انتشار آلودگی های CO و NO اساساً وابسته به نسبت هوای اضافی و توان حرارتی است. با کاهش ضریب هدایت حرارتی، پیش گرمایش گاز و جامد در بالادست کاهش می یابد و دمای بیشینه شعله کاهش یابد و در نتیجه مقدار NO کم می شود. یکی از کارهای مهم در زمینه انتشار آلودگی ها و مکانیزم های مختلف مورد استفاده در مشعل های متخلخل انجام گرفته است، پژوهش زوا و پریرا [3] می باشد. آن ها محاسبات احتراقی هوا/متان را در یک محیط متخلخل با چهار مکانیزم انجام دادند و نتایج را با هم مقایسه کردند. در مطالعه آن ها مکانیزم انتقال حرارت و احتراق یک بعدی در نظر گرفته شد و معادلات انرژی جداگانه ای برای فازهای جامد و گاز حل کردند. اسموکر و الزی [4] نتایج آزمایشگاهی و عددی را برای یک مشعل دو قسمتی با مخلوط هوا/پروپان بررسی کردند. البته از مخلوط هوا/متان هم برای مقایسه استفاده شده است. اثر عوامل مختلف بر روی دمای محوری، شعاعی، افت فشار و انتشار آلودگی ها به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شد. مدل عددی استفاده شده یک بعدی، در حالت گذرا با مکانیزم کامل برای پروپان با 70 جزء و 463 واکنش شیمیایی بود. اسموکر و الزی با تغییر نسبت های تعادلی برای متان و پروپان، محدوده پایداری شعله را بدست آوردند. آن ها مشاهده کردند که با افزایش نسبت تعادلی محدوده های پایداری شعله برای پروپان و متان افزایش می یابد. در سال 2009 گنجعلیخان نسب و کشتکار [5]، آنالیز حرارتی دوبعدی یک مشعل متخلخل تابشی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، احتراق در محیط متخلخل بوسیله یک ناحیه تولید حرارت غیر یکنواخت مدل شد. نتایج بدست آمده نشان داد که لایه هایی با ضخامت اپتیکی بالا و نسبت پخش کم،

مقدار شار تابشی خروجی بالاتری دارند. خسروی الحسینی و همکاران [6]، به بررسی تقریب مناسب برای تعیین واگرایی شار حرارتی و تأثیر خطای محاسبات بر عملکرد مشعل متخلخل یک بعدی پرداختند. آن ها معادلات انرژی را در حالت عدم تعادل حرارتی بین دو فاز در نظر گرفتند و برای مدل سازی احتراق، از سینتیک کامل گاز متان استفاده کردند. آن ها دریافتند روش جهت های مجزا مشابه روش حجم محدود رفتار می نماید و بهترین شرایط در تقریب هشت جهته بدست می آید و استفاده از جهت های بیشتر، هزینه محاسبات را افزایش می دهد بدون آن که تأثیر قابل توجهی بر افزایش دقت داشته باشد. فرزانه و همکاران [7]، احتراق هوا/متان را در یک مشعل متخلخل مخروطی بررسی کردند. معادله های ناویر استوکس، انرژی و بقای ذرات شیمیایی را در یک مدل دوبعدی متقارن به صورت عددی حل کردند. برای پیش بینی مقادیر NO و CO، از یک مکانیزم 5 مرحله ای و 7 ذره ای استفاده شد. توزیع دمای فاز گاز، دمای فاز جامد و نسبت مولی ذرات در طول لایه متخلخل بدست آمد. تأثیر نسبت هوای اضافی بر توزیع دما و میزان آلاینده ها بررسی شد. گائو و همکاران [8] احتراق هوا-متان را در یک مشعل متخلخل دو لایه به صورت تجربی مطالعه کردند. اثرات مواد سازنده فوم ها و تراکم منافذ بر پایداری شعله، دمای شعله و انتشار آلودگی ها بررسی شد. آن ها نتیجه گرفتند که محدودیت پایداری شعله با افزایش هدایت حرارتی فوم ها و کاهش تراکم منافذ، افزایش می یابد. علاوه بر این، آن ها دریافتند که دمای شعله مهم ترین عامل تأثیرگذار بر تشکیل CO است. معرفت و نوربان [9]، به مقایسه تجربی بین مشعل متخلخل سطحی و مشعل معمولی در مصارف خانگی به عنوان اجاق گاز بر اساس استاندارد ملی ایران پرداختند. نتایج آزمایشگاهی بدست آمده نشان داد که شعله مشعل متخلخل در نسبت هم ارزی های کمتر از یک تشکیل می شود. همچنین، این نتیجه به دست آمد که بازدهی مشعل متخلخل با توان و نسبت هم ارزی به ترتیب رابطه عکس و مستقیم دارد. حسینی و حزباوی [10] احتراق مخلوط پیش آمیخته متان-هوا را با در نظر گرفتن سینتیک چند مرحله ای در یک مشعل متخلخل دوبعدی متقارن مدل سازی کردند. معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، ناویر استوکس، معادله انتقال حرارت و معادله بقای اجزای شیمیایی بودند که با استفاده از روش حجم محدود حل عددی گردیدند. آن ها دریافتند که با اعمال ضریب تخلخل متغیر در ناحیه احتراقی می توان دمای بیشینه و به طبع آن میزان آلاینده های خروجی را نیز کاهش داد. امید و دوازده امامی [11] عملکرد شعله پایدار را در یک مشعل متخلخل دوبعدی به صورت تجربی بررسی کردند. در بالادست مشعل، محیط متخلخل سرامیکی از جنس SiC در نظر گرفته شد و در پایین دست از گلوله های آلومینا سیلیکاتی استفاده شد. یافته های آن ها نشان داد که با افزایش قطر گلوله ها در پایین دست مشعل، دمای سطح و راندمان تابشی کاهش می یابد. هاشمی و هاشمی [12] یک مشعل متخلخل دولایه را به صورت عددی مطالعه کردند. آن ها احتراق هوا/متان را در یک مشعل دوبعدی شبیه سازی کردند. نتایج آن ها نشان دادند که نسبت هم ارزی مخلوط ورودی می تواند محدوده پایداری و دمای شعله را کنترل کند. در این مقاله تلاش برای پیش بینی دقیق رفتار حرارتی مشعل های متخلخل انجام شده است. نظر به اینکه ماهیت فرایند احتراق در مشعل های متخلخل به شکل سه بعدی و در داخل خلل و فرج های محیط متخلخل صورت می گیرد و از آنجایی که در مطالعات قبلی یک مدل سازی واقعی با در نظر گرفتن اثرات سه بعدی پدیده احتراق انجام نپذیرفته است، از این رو در مطالعه حاضر برای حصول نتایج واقعی تر از

¹Porous radiant burner²Combustion zone³Preheat zone

در معادله های فوق، ϕ ضریب تخلخل، T دما، ρ چگالی، c_g ظرفیت حرارتی فشرده، k_g ضریب هدایت حرارتی فاز گاز، H ضریب انتقال حرارت جابجایی، A سطح انتقال حرارت بین دو فاز جامد و گاز در واحد حجم، ω_k نرخ تولید ذره k ام، W_k جرم مولکولی ذره k ام، h_k انتالپی ذره k ام می-باشند. در معادله های فوق، چگالی و گرمای ویژه مربوط به مخلوط گاز است. برای هر ذره واکنشی، گرمای ویژه و انتالپی به عنوان تابعی از درجه حرارت در فرم ضریب های کمترین مربع داده می شوند [13]. معادله های انرژی دو فاز از طریق جمله مربوط به انتقال حرارت جابجایی بهم وابسته می باشند. بنابراین مهم است که رابطه مناسبی برای ضریب انتقال حرارت جابجایی و سطح در واحد حجم در نظر گرفته شود. برای این منظور، از رابطه های (4) استفاده می شود [14]:

$$H = k_g \frac{[2 + 1.1Pr^{1/3}Re_p^{0.6}]}{d_p} \quad (4)$$

$$Re_p = \frac{\rho_g u_g d_p}{\mu_g}, \quad A = 6 \frac{(1 - \phi)}{d_p}$$

به دلیل درصد بالای وجود نیتروژن و اکسیژن در مخلوط ورودی و محصولات احتراق، مقادیر ضریب هدایت حرارتی و لزجت مخلوط گازی با مقادیر مربوط به هوا در همان درجه حرارت تخمین زده می شود. ضریب هدایت حرارتی ماده متخلخل به شدت تابع دماست. پرودکی [15] ضریب هدایت حرارتی مواد جامدی چون SiC در دماهای مختلف را بدست آورد که در این مطالعه استفاده شده است. به دلیل دمای بالای مواد متخلخل در حین احتراق در داخل مشعل متخلخل و همچنین گداختگی این اجسام در این دما، تابش فاز جامد عامل تأثیرگذاری بر عملکرد حرارتی مشعل می باشد. از این رو تعیین خواص تابشی فاز جامد حائز اهمیت است. در مطالعه حاضر برای محاسبه خواص تابشی ماتریس جامد متخلخل از نتیجه مرجع [16] استفاده شده است.

برای بدست آوردن جمله تابشی در معادله (2) از رابطه (5) استفاده می-شود:

$$\nabla \cdot q_{rad} = \kappa(4\pi - \int_{4\pi} I d\Omega) \quad (5)$$

برای محاسبه شدت تابش I معادله انتقال حرارت تابشی بایستی حل گردد. معادله انتقال حرارت تابشی در یک محیط صادر کننده، پخش کننده و جذب کننده غیر ایزوتروپیک در حالت کلی به صورت رابطه (6) می باشد [17]:

$$s \cdot \nabla I(\vec{r}, \hat{s}) = -(\kappa(\vec{r}) + \sigma_s(\vec{r}))I(\vec{r}, \hat{s}) + \kappa(\vec{r})I_b(\vec{r}) + \sigma_s/4\pi \int_{\hat{\Omega}=4\pi} I(\vec{r}, \hat{s})\varphi(\vec{r}, \hat{s}, \hat{\Omega})d\hat{\Omega} \quad (6)$$

که در آن $\varphi(\vec{r}, \hat{s}, \hat{\Omega})$ تابع فاز انتقال حرارت، $I(\vec{r}, \hat{s})$ شدت تابش، $I_b(\vec{r})$ شدت تابش جسم سیاه در دمای محیط واسط، $\kappa(\vec{r})$ ضریب جذب و $\sigma_s(\vec{r})$ ضریب پخش می باشند. معادله فوق با شرایط مرزی مناسب برای تعیین شدت تابش حل می شود.

در معادله (3)، D_{km} ضریب نفوذ موثر دوتایی برای جزء k در مخلوط m است. رابطه (7) برای محاسبه D_{km} می تواند مورد استفاده قرار گیرد [18]:

$$D_{km} = \frac{(1 - x_k)}{\sum_{j=1, j \neq k}^{N_s} x_j D_{kj}}, \quad k = 1, \dots, N_s \quad (7)$$

که در رابطه فوق، D_{kj} ضریب نفوذ دوتایی است. در شبیه سازی فرایند احتراق، مکانیزم شیمیایی پنج مرحله ای متان- هوا با هفت جزء شیمیایی در نظر گرفته شده است [19]. اجزای این مکانیزم عبارتند از:

عملکرد مشعل متخلخل تابشی، شبیه سازی این مشعل در حالت سه بعدی با درنظر گرفتن تمامی ساز و کارهای انتقال حرارت اعم از هدایتی، جابجایی و تابشی و همچنین مدل سازی پدیده احتراق انجام می شود. در این پژوهش، فازهای گاز و جامد در تعادل حرارتی محلی قرار ندارند، بنابراین معادله های انرژی جداگانه ای برای آن ها لحاظ شده است. روش جهت های مجزا¹ برای حل معادله انتقال حرارت تابشی² استفاده شده است. در مدل سازی پدیده احتراق، یک سینتیک شیمیایی چند مرحله ای شامل 5 واکنش و 7 ذره درنظر گرفته شده است. هدف از این مطالعه بدست آوردن میدان های دما، توزیع نسبت جرمی ذرات و پروفیل شارهای تابشی در طول مشعل می باشد. همچنین اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد مشعل مورد بررسی قرار گرفته است. قابل ذکر است که با در نظر گرفتن مشعل متخلخل در حالت سه بعدی و حل کردن معادلات مربوط به سینتیک احتراق و استفاده از روش جهت های مجزا می تواند به عنوان کار جدیدی مطرح گردد.

2- هندسه مسئله و معادله های حاکم

مشعل متخلخل تابشی مکعب مستطیل شکل به طول 2 سانتیمتر، عرض 1 سانتیمتر و ارتفاع 1 سانتیمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل 1 نمای سه بعدی این مشعل نشان داده شده است. مشعل مورد نظر از فوم سرامیکی SiC (10ppi) ساخته شده است. مخلوط سوخت و هوا از سمت چپ مشعل با دمای T_{in} و سرعت یکنواخت u_{in} وارد می شود، در اواسط مشعل با ایجاد جرقه، احتراق اتفاق افتاده و محصولات احتراق از انتهای مشعل خارج می-شوند.

فرضیاتی که برای مدل سازی مطالعه حاضر در نظر گرفته شده است عبارتند از:

- 1- هندسه، ساختار شعله و انتقال حرارت سه بعدی در نظر گرفته می-شود.
- 2- جریان آرام، پایا، غیرقابل تراکم و یکنواخت در نظر گرفته شده است و در هر مقطع با استفاده از پیوستگی سرعت جریان اصلاح می شود.
- 3- فاز گاز و فاز جامد در تعادل حرارتی نیستند، بنابراین معادله های انرژی جداگانه ای برای دو فاز لحاظ شده است و دو فاز بواسطه انتقال حرارت جابجایی از هم تأثیر پذیرند.
- 4- از اثرات تابشی فاز گاز در مقایسه با فاز جامد صرف نظر شده است.
- 5- خواص ترمودینامیکی هر دو فاز متغیر با دما در نظر گرفته شده است.

1-2 معادله های حاکم

معادله های بقای انرژی برای فاز گاز و ماتریس جامد به صورت روابط (3-1) می باشند.

معادله انرژی فاز گاز

$$\phi k_g \nabla^2 T_g - \phi \rho_g c_g u_g \frac{\partial T_g}{\partial x} - (1 - \phi) HA(T_g - T_p) - \phi \sum_{k=1}^{N_s} \omega_k W_k h_k = 0 \quad (1)$$

معادله انرژی فاز جامد

$$(1 - \phi) k_p \nabla^2 T_p - \nabla \cdot q_{rad} + (1 - \phi) HA(T_g - T_p) = 0 \quad (2)$$

معادله بقای ذرات شیمیایی

$$\nabla \cdot (\rho_g u_g Y_k) = \nabla \cdot (\rho_g D_{km} \nabla Y_k) + \dot{\omega}_k W_k \quad k \in [1, N_s] \quad (3)$$

¹ Discret ordinates method

² Radiative transfer equation

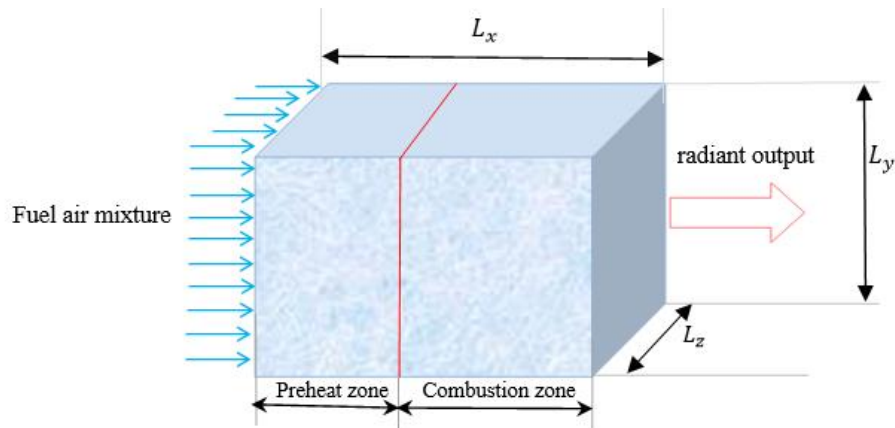


Fig. 1 Schematic representation of the 3-D porous radiant burner under investigation

شکل 1 شماتیکی از مشعل متخلخل سه بعدی مورد مطالعه

جدول 1 مکانیزم واکنش احتراق متان- هوا [19]

Table 1 Reaction mechanism of methane-air combustion [19]

reaction	reaction rate
1 $\text{CH}_4 + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	$R_1 = 10^{15.220} [\text{CH}_4]^{1.460} [\text{O}_2]^{0.5217} \exp(-20643/T)$
2 $\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	$R_2 = 10^{14.902} [\text{CO}]^{1.9604} [\text{O}_2]^{1.570} \exp(-11613/T)$
3 $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 1/2 \text{O}_2$	$R_3 = 10^{14.349} [\text{CO}_2]^{1.0} \exp(-62281/T)$
4 $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}$	$R_4 = 10^{23.949} [\text{CO}]^{10.7211} [\text{O}_2]^{4.0111} \exp(-53369/T)$
5 $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}$	$R_5 = 10^{14.967} T^{-0.5} [\text{N}_2]^{1.460} [\text{O}_2]^{0.5} \exp(-68899/T)$

$$H(T_g - T_p) + \varepsilon_p \sigma (T_p^4 - T_i^4) = -k_p \frac{\partial T_p}{\partial x} \quad x = L_x \quad (16)$$

$$k_p \frac{\partial T_p}{\partial y} = h_{wp}(T_p - T_\infty) \quad y = 0 \quad (17)$$

$$-k_p \frac{\partial T_p}{\partial y} = h_{wp}(T_p - T_\infty) \quad y = L_y \quad (18)$$

$$k_p \frac{\partial T_p}{\partial z} = h_{wp}(T_p - T_\infty) \quad z = 0 \quad (19)$$

$$-k_p \frac{\partial T_p}{\partial z} = h_{wp}(T_p - T_\infty) \quad z = L_z \quad (20)$$

از آنجایی که معادله بقای اجزای شیمیایی، معادله دیفرانسیل مرتبه دوم است، برای حل آن نیاز به دو شرط مرزی در هر جهت می باشد. با توجه به داشتن توان مشعل، میزان نسبت جرمی هر ذره در ورودی مشعل مشخص است. در مقطع خروجی مشعل نیز شرط گرادیان صفر در جهت محوری برای نسبت جرمی هر ذره در نظر گرفته شده است و در دو راستای دیگر نیز تغییری در نسبت جرمی ذره ها در مرزها وجود ندارد. بنابراین شرطهای مرزی طبق روابط (21-26) می باشد:

$$Y_k = Y_{k,i} \quad x = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial Y_k}{\partial x} = 0 \quad x = L_x \quad (22)$$

$$\frac{\partial Y_k}{\partial y} = 0 \quad y = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial Y_k}{\partial y} = 0 \quad y = L_y \quad (24)$$

$$\frac{\partial Y_k}{\partial z} = 0 \quad z = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial Y_k}{\partial z} = 0 \quad z = L_z \quad (26)$$

تمامی سطوح مشعل متخلخل مطالعه شده خاکستری فرض شده اند که می توانند انرژی تابشی را به صورت دیفیوز جذب، پخش و صادر کنند. بنابراین شرطهای مرزی مناسب برای حل معادله انتقال حرارت تابشی به شرح روابط (27-32) می باشد:

$\text{CH}_4, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}, \text{CO}_2, \text{N}_2, \text{NO}$. مراحل این واکنش پنج مرحله ای در جدول 1 نشان داده شده است. $\dot{\omega}_k$ نرخ تولید ذره شیمیایی می باشد که از رابطه (8) بدست می آید:

$$\dot{\omega}_k = \sum_{i=1}^{N_R} (\theta'_{k,i} - \theta_{k,i}) R_i \quad (8)$$

در رابطه ی فوق، $\theta'_{k,i}$ و $\theta_{k,i}$ به ترتیب ضریبهای استوکیومتری محصول ها و واکنش دهنده ها مربوط به ذره k ام در واکنش i ام هستند. R_i هم نرخ پیشرفت واکنش i ام می باشد.

2-2- شرایط مرزی

برای حل معادله های انرژی فازهای گاز و جامد، معادله بقای ذرات شیمیایی و معادله انتقال حرارت تابشی شرطهای مرزی مناسب مورد نیاز است. برای حل معادله انرژی گاز این شرطها طبق روابط (9-14) هستند:

$$T_g = T_{g0} \quad x = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial x} = 0 \quad x = L_x \quad (10)$$

$$k_g \frac{\partial T_g}{\partial y} = h_{wg}(T_g - T_\infty) \quad y = 0 \quad (11)$$

$$-k_g \frac{\partial T_g}{\partial y} = h_{wg}(T_g - T_\infty) \quad y = L_y \quad (12)$$

$$k_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = h_{wg}(T_g - T_\infty) \quad z = 0 \quad (13)$$

$$-k_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = h_{wg}(T_g - T_\infty) \quad z = L_z \quad (14)$$

مرزهای جامد در مقاطع ورودی و خروجی تحت تأثیر توأم انتقال حرارت جابجایی با فاز گاز و همچنین انتقال حرارت تابشی با محیط اطراف قرار دارند. سایر مرزها تحت تأثیر انتقال حرارت جابجایی با هوای بیرون قرار دارند. از این رو شرطهای مرزی (15-20) برای حل معادله انرژی فاز جامد استفاده شده اند:

$$H(T_g - T_p) + \varepsilon_p \sigma (T_i^4 - T_p^4) = -k_p \frac{\partial T_p}{\partial x} \quad x = 0 \quad (15)$$

دمای گاز در طول مشعل در شکل 2 نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود در ناحیه پیش گرمایش دمای فاز جامد به دلیل انتقال حرارت هدایتی و تابشی دریافت شده از ناحیه احتراقی، بیشتر از دمای فاز گاز می باشد. از این رو در این ناحیه مخلوط سوخت و هوای ورودی بواسطه انتقال حرارت جابجایی با ماتریس جامد پیش گرم می شود. در ناحیه احتراقی که در وسط مشعل واقع شده است، دمای مخلوط گاز بواسطه احتراق افزایش قابل ملاحظه ای پیدا می کند و باعث افزایش دمای ماتریس متخلخل می شود. با مقایسه نتایج بدست آمده از کار حاضر و مطالعه انجام شده در مرجع [20]، صحت نتایج کار حاضر تأیید می شود.

برای بررسی درستی حل عددی معادله بقای ذرات شیمیایی، روند توزیع نسبت مولی ذرات در کار حاضر با نتایج بدست آمده توسط مطالعه فرزانه و همکاران [7] مقایسه شده است. آن ها یک مشعل متخلخل متقارن در مختصات دوبعدی به ظرفیت 5 کیلو وات در نظر گرفتند. مدل احتراقی استفاده شده در کار آن ها مشابه مدل در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر است. در شکل 3 توزیع کسرهای مولی CH_4 و O_2 و در شکل 4 تغییرات کسرهای مولی CO_2 و H_2O در جهت جریان، با نتایج گزارش شده در مرجع [7] برای نسبت هوای اضافی¹ 1.5 مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طور که مشاهده می شود در هر دو شکل روند مشابهی وجود دارد، بدین ترتیب که میزان O_2 و CH_4 در ناحیه پیش گرمایش تقریباً ثابت است، اما به محض انجام واکنش های شیمیایی درون محفظه احتراق، از مقدار واکنش دهنده ها کاسته می شود و محصولات CO_2 و H_2O پدیدار می شوند و در راستای جریان به مقدار آن ها افزوده می شود. لازم به ذکر است که مکانیزم شیمیایی یکسان وجه تشابه مطالعه انجام شده و مرجع [7] می باشد، ولی هندسه و ابعاد مورد بررسی، جریان، روش حل معادله انتقال حرارت تابشی، جنس مشعل و ... در کار حاضر با مرجع [7] متفاوت است. از این رو نتایج عددی یکسان برای کسرهای مولی انتظار نمی رود، ولی روند تغییرات مشابهی در این نمودارها مشاهده می شود.

5- نتایج

نتایج زیر حاصل از شبیه سازی یک مشعل متخلخل تابشی سه بعدی با توان 10 کیلو وات می باشد. در شکل 5 توزیع دماهای فاز گاز (مخلوط سوخت و

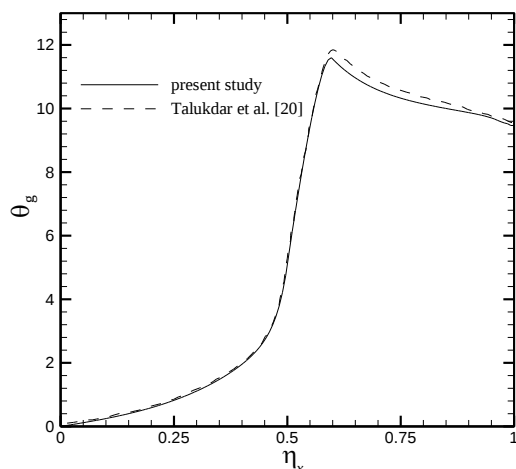


Fig. 2 Gas temperature distribution along the porous radiant burner
شکل 2 توزیع دمای گاز در طول مشعل متخلخل تابشی

¹ Excess air ratio

$$I^m(0, y, z) = \frac{B_1}{\pi} \quad x = 0 \quad (27)$$

$$I^m(L_x, y, z) = \frac{B_2}{\pi} \quad x = L_x \quad (28)$$

$$I^m(x, 0, z) = \varepsilon_B \frac{\sigma T_B^4}{\pi} + \frac{\rho_B}{\pi} \int_{\vec{n} \cdot \hat{s} < 0} |\vec{n} \cdot \hat{s}| I(x, 0, z, \hat{s}) d\Omega \quad y = 0 \quad (29)$$

$$I^m(x, L_y, z) = \varepsilon_T \frac{\sigma T_T^4}{\pi} + \frac{\rho_T}{\pi} \int_{\vec{n} \cdot \hat{s} < 0} |\vec{n} \cdot \hat{s}| I(x, L_y, z, \hat{s}) d\Omega \quad y = L_y \quad (30)$$

$$I^m(x, y, 0) = \varepsilon_s \frac{\sigma T_s^4}{\pi} + \frac{\rho_s}{\pi} \int_{\vec{n} \cdot \hat{s} < 0} |\vec{n} \cdot \hat{s}| I(x, y, 0, \hat{s}) d\Omega \quad z = 0 \quad (31)$$

$$I^m(x, y, L_z) = \varepsilon_N \frac{\sigma T_N^4}{\pi} + \frac{\rho_N}{\pi} \int_{\vec{n} \cdot \hat{s} < 0} |\vec{n} \cdot \hat{s}| I(x, y, L_z, \hat{s}) d\Omega \quad z = L_z \quad (32)$$

که در روابط فوق، B_1 و B_2 به ترتیب شار تابشی ورودی به محیط متخلخل از طریق مقاطع ورودی و خروجی ماتریس جامد می باشند.

3- روش حل

به منظور تعیین رفتار حرارتی مشعل متخلخل، دانستن پروفیل های درجه حرارت گاز و لایه متخلخل، توزیع نسبت جرمی ذرات شیمیایی و همچنین توزیع شارهای تابشی در طول محیط متخلخل ضروری می باشند که این مقادیر از حل معادله های انرژی فاز گاز، فاز جامد، معادله بقای ذرات شیمیایی و معادله انتقال حرارت تابشی بدست می آیند. معادله های دیفرانسیل برای فاز گاز و فاز جامد و همچنین معادله بقای ذرات شیمیایی، از نوع معادله دیفرانسیل جزئی و مرتبه 2 می باشند و معادله انتقال تابش، معادله دیفرانسیلی انتگرالی است. معادله های انرژی فاز جامد و فاز گاز به دلیل جمله انتقال حرارت جابجایی بین دو فاز، کوپل می باشند، معادله انرژی فاز گاز و معادله بقای ذرات شیمیایی به واسطه ی جمله تولید حرارت و همچنین معادله انرژی فاز جامد و معادله انتقال تابش بدلیل جمله مربوط به شار حرارتی تابشی به هم وابسته هستند، بنابراین با یک دستگاه معادله مواجه بوده که باید به طور هم زمان حل عددی گردند. بدین منظور معادله های حاکم و شرط های مرزی مربوط به آن ها بایستی به شکل بی بعد در آیند، که در این جا برای جلوگیری از حجیم شدن مقاله از ذکر آن ها صرف نظر شده است. برای حل معادله های انرژی فاز جامد و فاز گاز و معادله بقای اجزای شیمیایی، ابتدا جمله های این معادله ها با استفاده از تقریب اختلاف محدود مرکزی مجزاسازی شده و سپس با اعمال شرط های مرزی به یک دستگاه معادله 7 قطری رسیده که توسط الگوریتم توماس این دستگاه معادله حل عددی می شوند.

4- اعتبارسنجی محاسبات

برای بررسی صحت روش عددی استفاده شده در کار حاضر، به دلیل نبود مطالعه مشابه برای تصدیق نتایج مربوط به مشعل سه بعدی در نظر گرفته شده، ابتدا برای ارزیابی صحت روش عددی در حل معادله های انرژی و معادله انتقال حرارت تابشی، نتایج برای یک نمونه ساده با نتایج مطالعه تالوکار و همکاران [20] مقایسه گردیده است. آن ها یک مشعل متخلخل تابشی مستطیلی در حالت دوبعدی در نظر گرفتند. در مطالعه آن ها، فاز جامد جذب کننده، پخش کننده و صادرکننده انرژی تابشی در نظر گرفته شد، در حالیکه از اثرات تابشی فاز گاز در مقایسه با فاز جامد صرف نظر شده است. توزیع

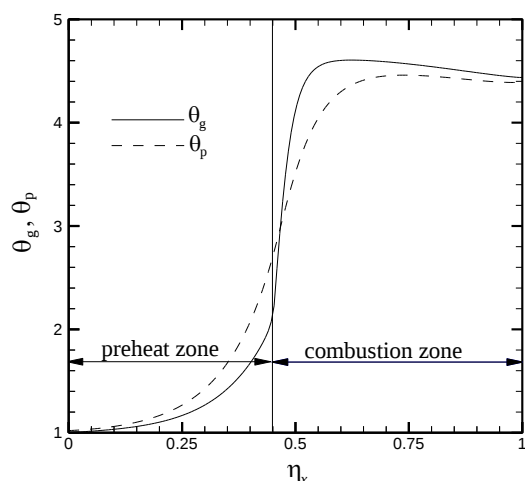


Fig. 5 Gas and solid phases temperature distributions along the burner
 شکل 5 توزیع دمای فازهای جامد و گاز در طول مشعل

احتراق، مقدار این ذرات به سرعت کاهش می یابد و پس از یک فاصله ی کوتاه، سوخت به طور کامل مصرف می شود. در مورد O_2 ، نیز پس از کاهش یافتن مقدار آن در فاصله ی از محفظه احتراق، مقدار آن تا پایان مشعل تقریباً ثابت باقی می ماند.

علاوه بر این به دلیل پدیده احتراق، CO_2 و H_2O به عنوان محصول های واکنش تولید می شوند و کسر جرمی آن ها در طول واکنش شیمیایی افزایش می یابد. مونوکسید کربن (CO)، یک گاز بی رنگ، بی بو، بی مزه و بسیار سمی است. مسمومیت با این گاز، رایج ترین نوع مسمومیت می باشد که منجر به مرگ در بسیاری از کشورها است. اکسیدنیتریک (NO) یک گاز سمی بی رنگ است که توسط اکسیداسیون نیتروژن تشکیل شده است. NO فرم غالب NO_x تولید شده در فرایند احتراق صنعتی است. قرار گرفتن در معرض طولانی مدت NO می تواند باعث سرفه بنفش، مشکل در تنفس، و غیره شود. از این رو مقدار این آلاینده ها در واکنش های احتراقی بسیار مهم است. در شکل 7 توزیع آلاینده های یاد شده در طول مشعل نشان داده شده است. از آنجایی که متان به طور کامل بر روی جبهه شعله مصرف می شود، غلظت CO به بالاترین مقدار خود می رسد و به تدریج با کامل شدن احتراق تبدیل به CO_2

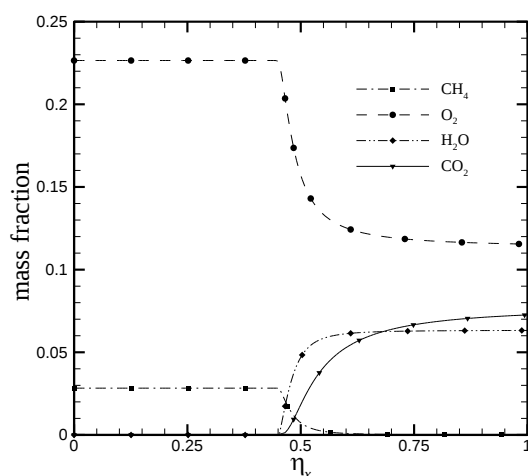


Fig. 6 Variation of species mass fraction along the mid-plane of the porous burner

شکل 6 تغییر نسبت جرمی ذرات در امتداد صفحه وسط مشعل

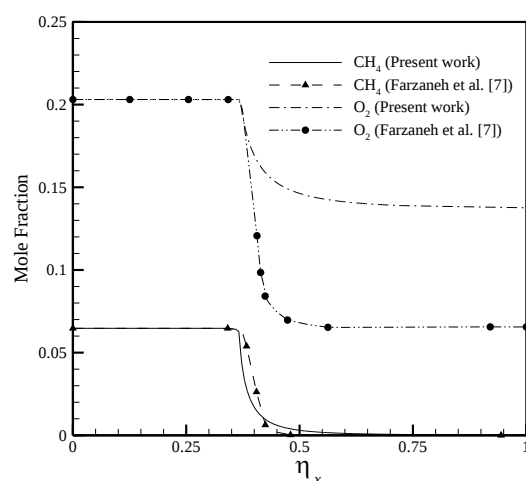


Fig. 3 Variations of CH_4 and O_2 mole fraction along a 5 kW PRB with $EAR=1.5$

شکل 3 تغییرات کسر مولی متان و اکسیژن در طول مشعل متخلخل تابشی به ظرفیت 5 kW و نسبت هوای اضافی 1.5

هوا) و فاز جامد (ماتریس متخلخل) در طول صفحه میانی مشعل نشان داده شده است. در ناحیه ورودی مشعل که ناحیه پیش گرمایش نیز نامیده می شود، به دلیل پدیده تابش و هدایت فاز جامد، دمای ماتریس متخلخل بیشتر از دمای فاز گاز است. بنابراین انتقال حرارت از فاز جامد به فاز گاز باعث افزایش دمای آن و به عبارت دیگر پیش گرمایش مخلوط سوخت و هوا می شود. در ناحیه احتراقی، به دلیل گرمای تولید شده بواسطه فرایند احتراق متان، دمای مخلوط سوخت و هوا افزایش پیدا می کند و از دمای فاز جامد فراتر می رود. از این رو در این ناحیه، دمای ماتریس جامد هم از طریق انتقال حرارت جابجایی با فاز گاز، افزایش قابل توجهی دارد. همان طور که در این شکل دیده می شود، بیشترین دمای دو فاز به دلیل انرژی آزاد شده در منطقه احتراق، در این ناحیه رخ می دهد.

در شکل 6 تغییرات نسبت جرمی 4 جزء از واکنش دهنده ها و محصول های احتراق در طول مشعل ترسیم شده است. قبل از آنکه احتراق انجام شود، نسبت جرمی CH_4 و O_2 ثابت می باشد. سپس به محض وقوع

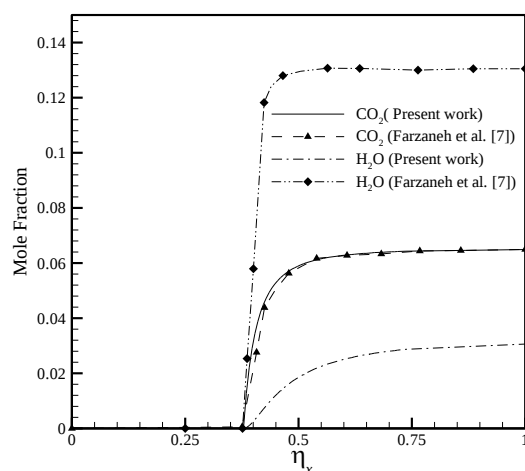


Fig. 3 Variations of CO_2 and H_2O mole fraction along a 5 kW PRB with $EAR=1.5$

شکل 4 تغییرات کسر مولی دی اکسید کربن و آب در طول مشعل متخلخل تابشی به ظرفیت 5 kW و نسبت هوای اضافی 1.5

پایین دست منتقل می شود و دمای بیشینه کاهش می یابد. از آنجایی که فاز جامد نیز رفتاری مشابه فاز گاز دارد، در این جا از نمایش تغییرات دمای ماتریس جامد امتناع شده است. میزان انتشار CO و NO به شدت به تغییر هوای اضافی حساس است. با احتراق رقیق مقدار این آلودگی ها در سطح پایین باقی می ماند. شکل های 10 و 11 تأثیر هوای اضافی را بر میزان تولید CO و NO نشان می دهند. با افزایش نسبت هوای اضافی و رقیق شدن مخلوط سوخت و هوا، احتراق کامل تر اتفاق می افتد و به همین دلیل میزان CO در محصولات کاهش می یابد. همچنین از آنجایی که با افزایش هوای اضافی، دمای بیشینه مخلوط کاهش می یابد، از تجزیه CO₂ به CO و O₂ جلوگیری می شود. اثر نسبت هوای اضافی بر میزان تولید NO در شکل 11 مورد مطالعه قرار گرفته است. دیده می شود که میزان تولید NO با افزایش نسبت هوای اضافی کاهش می یابد. همان طور که قبلاً گفته شد با افزایش هوای اضافی، دمای بیشینه شعله کم شده و از آنجایی که تولید NO به شدت وابسته به مقدار دمای بیشینه شعله است، لذا میزان تولید NO کاهش می یابد.

عملکرد مشعل متخلخل تابشی معمولاً بوسیله بازده تابشی مشخص می شود. بازده تابشی بصورت نسبت شار حرارتی تابیده شده در خروجی مشعل به انرژی آزاد شده در فرایند احتراق، به صورت رابطه (33) تعریف می شود [21]:

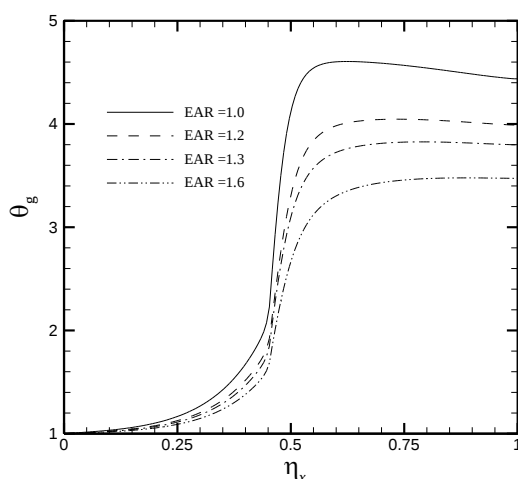


Fig. 9 The effect of EAR on the gas temperature distribution

شکل 9 تأثیر نسبت هوای اضافی بر توزیع دمای گاز

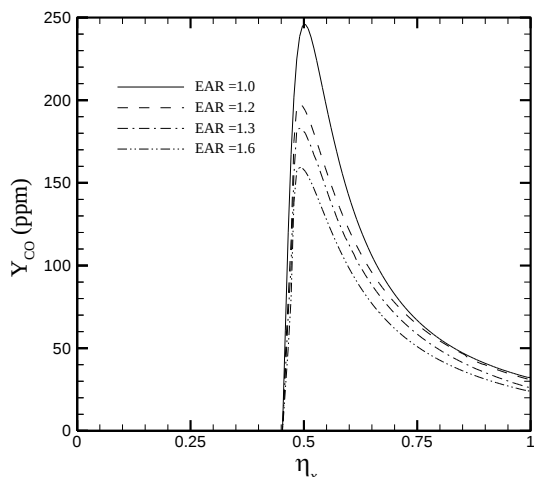


Fig. 10 Variation of CO mass fraction for different EAR

شکل 10 تغییرات نسبت جرمی CO به ازای نسبت های هوای اضافی مختلف

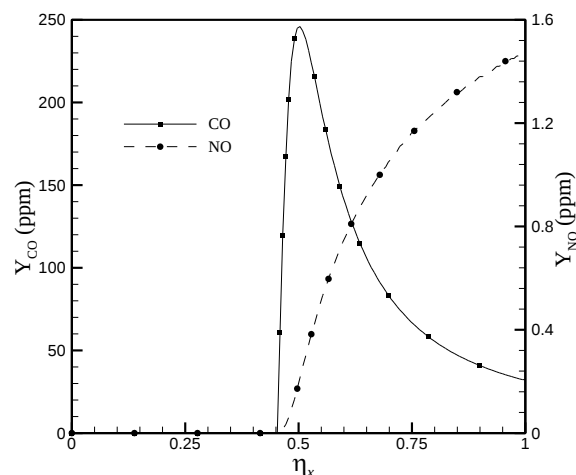


Fig. 7 CO and NO mass fraction distribution through mid-plane of the burner

شکل 7 توزیع نسبت جرمی CO و NO در طول صفحه وسط مشعل

شده و از مقدار آن کاسته می شود. مقدار NO در ابتدای واکنش ناچیز است ولی با افزایش دما و فعال شدن واکنش های تولید NO مقدار آن افزایش می یابد. بیشترین مقدار NO در انتهای محفظه احتراق رخ می دهد.

تغییرات شارهای تابیده شده به سمت بالادست (Q_{rad}^+) و پایین دست (Q_{rad}^-) جریان در طول لایه متخلخل در شکل 8 نشان داده شده است.

همان طور که دیده می شود در ابتدای محفظه احتراق که افزایش زیادی در دمای گاز مشاهده می شود، به دلیل زیاد بودن انتالپی گاز و تبدیل این انتالپی به تابش حرارتی، در مقادیر شارهای تابشی افزایش چشمگیری دیده می شود. برای اینکه عملکرد مشعل بهتر باشد، بایستی مقدار شار حرارتی تابیده شده به بالادست جریان در ورودی مشعل حداقل مقدار را داشته باشد و مقدار شار حرارتی تابیده شده به پایین دست جریان در خروجی مشعل که شار تابشی خروجی¹ نامیده می شود، حداکثر مقدار را به خود اختصاص دهد. در شکل 9، تأثیر نسبت هوای اضافی بر توزیع دمای گاز نشان داده شده است. با افزایش نسبت هوای اضافی، سرعت مخلوط ورودی افزایش می یابد. در پی آن میزان پیش گرمایش کاهش می یابد. در نتیجه جبهه شعله به

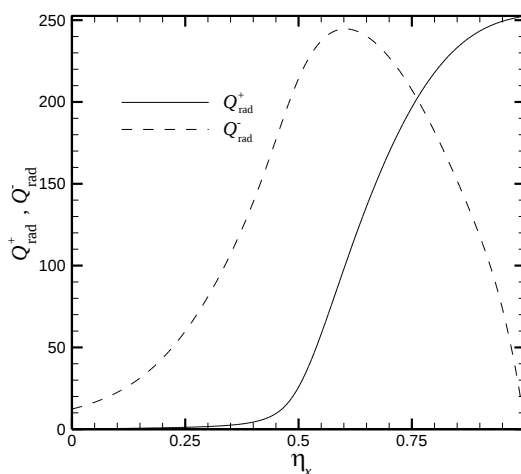


Fig. 8 Radiative heat flux distributions along the burner

شکل 8 توزیع شارهای تابشی حرارتی در طول مشعل

¹Radiant output

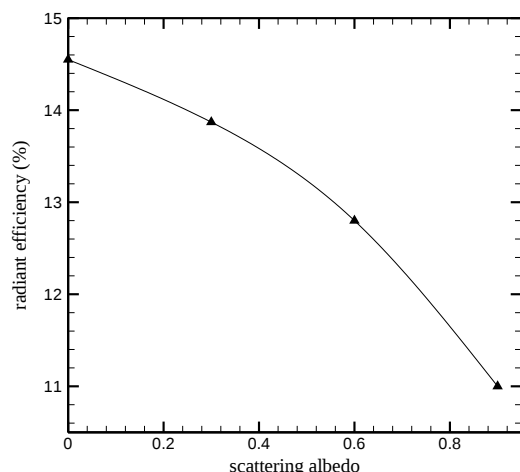


Fig. 13 Variation of radiant efficiency with scattering albedo

شکل 13 تغییرات بازده تابشی با نسبت پخش

6- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، رفتار حرارتی مشعل متخلخل تابشی سه بعدی در حالت دائمی مورد بررسی قرار گرفته است. برای نیل به این هدف، احتراق مخلوط پیش آمیخته هوا/متان با مکانیزم احتراقی 5 مرحله‌ای که شامل 7 ذره واکنشی است، در نظر گرفته شده است. از آنجایی که فازهای جامد و گاز در حالت تعادل حرارتی قرار ندارند، لذا معادله‌های انرژی جداگانه‌ای برای آن‌ها لحاظ شده است. برای محاسبه نسبت جرمی ذرات، از معادله بقای انرژی ذرات استفاده شده است. همچنین، معادله انتقال حرارت تابشی برای محاسبه جمله مربوط به تابش در معادله انرژی فاز جامد مورد استفاده قرار گرفته است. معادلات حاکم به صورت عددی و همزمان برای بدست آوردن پروفیل‌های دمای دو فاز موجود، میدان شارهای حرارتی و توزیع نسبت جرمی ذرات حل شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش هوای اضافی، دمای بیشینه و همچنین مقدار CO و NO در محصولات احتراق کاهش می‌یابد. اثر پارامترهای تابشی نیز بر عملکرد مشعل مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بدست آمده نشان‌دهنده این است که افزایش ضخامت اپتیکی و کاهش نسبت پخش باعث افزایش بازده تابشی می‌شود.

7- فهرست علائم

d_p	قطر ذرات (m)
N_R	تعداد واکنش‌های شیمیایی
N_S	تعداد ذرات شیمیایی
Q_{rad}	شار حرارتی بی بعد $(q_{rad}/\sigma T_{g0}^4)$
علائم یونانی	
ε	ضریب صدور
η_x	مختصه بی بعد در راستای x (x/L_x)
$\theta_{g,p}$	دمای بی بعد (T_g/T_{g0})
ρ_w	ضریب انعکاس دیواره
زیرنویس‌ها	
B	پایین
s	فاز جامد
T	بالا

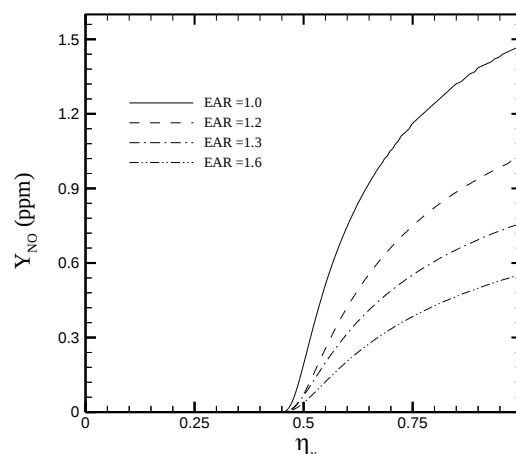


Fig. 11 The effect of EAR on the NO production

شکل 11 اثر نسبت هوای اضافی بر میزان تولید NO

$$\text{انرژی تابشی آزاد شده در خروجی} = \frac{\text{انرژی آزاد شده در احتراق کامل}}{\text{بازده تابشی}} \times 100 \quad (33)$$

در شکل 12 اثر ضخامت اپتیکی بر مقدار بازده تابشی نشان داده شده است. ضخامت اپتیکی اثر مستقیم بر میزان شار حرارتی خروجی دارد. که دلیل این رفتار، انتقال انتالپی گاز به ماتریس جامد و در پی آن صدور انرژی تابشی توسط محیط متخلخل بوده که با افزایش ضخامت اپتیکی این مقدار افزایش می‌یابد. بدین ترتیب با افزایش ضخامت اپتیکی بازده تابشی افزایش می‌یابد. یکی دیگر از خواص مهم مواد متخلخل که رفتار حرارتی مشعل‌های تابشی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، نسبت پخش تابشی¹ می‌باشد. برای نشان دادن اثر نسبت پخش بر عملکرد تابشی مشعل، مقادیر بازده تابشی به‌زای تغییرات در نسبت پخش در شکل 13 نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، نسبت پخش بر بازده تابشی اثر معکوس دارد، بدین‌صورت که با افزایش نسبت پخش و به‌طبع آن کاهش شار تابشی خروجی، مقدار بازده تابشی کم می‌شود. پس به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از محیط‌های متخلخل با ضخامت اپتیکی بالا و نسبت پخش کم در ساختمان مشعل‌های متخلخل به دلیل تبدیل بیشتر انرژی حرارتی فاز گاز به تابش حرارتی فاز جامد، سبب افزایش عملکرد مشعل‌های متخلخل می‌شود.

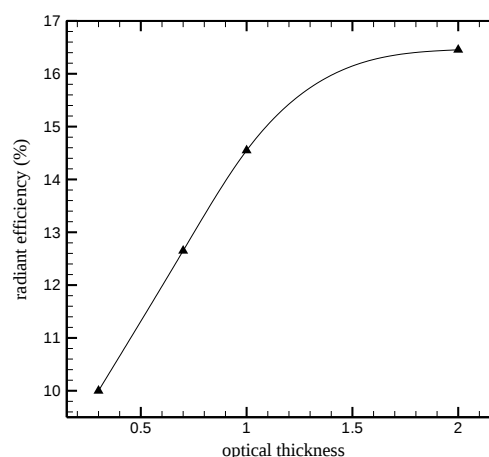


Fig. 12 Variation of radiant efficiency versus optical thickness

شکل 12 تغییرات بازده تابشی بر حسب ضخامت اپتیکی

¹ Scattering albedo

8- مراجع

- Engineering Sciences in Iran*, Anzali, Iran, September 9, 2016. (in Persian فارسی)
- [11] M. Omid, M. Davazdah Emami, Experimental study of radiative efficiency and emissions of carbon monoxide of a two-layer porous burner, *25th Annual International Mechanical Engineering Conference*, Tehran, Iran, May 2-4, 2017. (in Persian فارسی)
- [12] S. M. Hashemi, S. A. Hashami, Flame stability analysis of the premixed methane- air combustion in a two- layer porous media burner by numerical simulation, *International Journal of Fuel*, Vol. 202, pp. 56-65, 2017.
- [13] S. Gordon, B. J. Mc Bride, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium compositions, *NASA RP- 1311*, 1996.
- [14] B. Alazmi, K. Vafai, Constant wall heat flux boundary conditions in porous media under local thermal non-equilibrium conditions, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 45, No. 15, pp. 3071-3087, 2002.
- [15] R. S. Brodkey, H. C. Hershey, *Transport Phenomena: A Unified Approach*, pp. 30-59, New York: McGraw- Hill, 1988.
- [16] T. J. Hendricks, J. Howell, Absorption/Scattering coefficients and scattering phase functions in reticulated porous ceramics, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 118, No. 1, pp. 79-87, 1996.
- [17] M. F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, Second Edition, pp. 263-284, New York: McGraw- Hill, 2003.
- [18] R. S. Turns, *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*, Third Edition, pp. 223-227, New York: McGraw- Hill, 2012.
- [19] D. G. Nicol, P. C. Malte, Development of a five step global methane oxidation-no formation mechanism for lean premixed gas turbine combustion, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 121, No. 2, pp. 272-280, 1999.
- [20] P. Talukdar, S. C. Mishra, D. Trimis, F. Durst, Heat transfer characteristics of a porous radiant burner under the influence of a 2-D radiation field, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 84, No. 4, pp. 527 - 537, 2004.
- [21] F. Escobedo, H. J. Viljoen, Modeling of porous radiant burners with large extinction coefficients, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 72, No. 5, pp. 805-814, 1994.
- [1] S. B. Sathe, R. E. Peck, T. W. Tong, A numerical analysis of heat transfer and combustion in porous radiant burners, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No. 6, pp. 1331 - 38, 1990.
- [2] X. Y. Zhou, J. C. F. Pereira, Numerical study of combustion and pollutant formation in inert non homogenous porous media, *Combustion Science Technology*, Vol. 130(1-6), pp. 335-364, 1997.
- [3] X. Y. Zhou, J. C. F. Pereira, Comparison of four combustion models for simulating the premixed combustion in inert porous media, *Fire and Materials*, Vol. 22, No. 5, pp. 187-197, 1998.
- [4] M. T. Smucker, J. L. Ellzey, Computational experimental study of a two-section porous burner, *Combustion Science Technology*, Vol. 176, No. 8, pp. 1171- 1189, 2004.
- [5] M. M. Keshtkar, S. A. Gandjalikhan Nassab, Theoretical analysis of porous radiant burners under 2-D radiation field using discrete ordinates method, *International Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 110, No. 17, pp. 1894-1907, 2009.
- [6] M. Khosravy el_Hossaini, D. Rahimyar Heris, Q. Dorosti, Comparison of different radiative transfer equation approximation in modeling porous radiant burner, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 30-41, 2012. (in Persian فارسی)
- [7] M. Farzaneh, M. Shafiey, R. Ebrahimi, M. Shams, M. Shafiey, Numerical simulation of premixed combustion in a porous burner with integrated heat exchanger, *Heat Mass Transfer*, Vol. 48, No. 7 pp. 1273-1283, 2012.
- [8] H. B. Gao, Z. G. Qu, X. B. Feng, W. Q. Tao, Methane/air premixed in a two-layer porous burner with different foam materials, *International Journal of Fuel*, Vol. 115, pp. 154-161, 2014.
- [9] M. Maerefat, S. Noorian, Experimental comparison of efficiency and pollution of conventional and porous burners in appropriate power for domestic use, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 657-664, 2016. (in Persian فارسی)
- [10] S. A. Hosseini, A. Hazbavi, The effects of various parameters in porous media burners and comparison of combustion in both alumina and silicon carbide, *First International Comprehensive Competition Conference of*