

شبیه سازی عددی یک بعدی احتراق در محیط متخلخل برای نسبت های مختلف اختلاط سوخت و هوا

یونس بخشان^۱، مصطفی خسروی الحسینی^۲، بهنام عبدی^{۳*}، مجید اسحق نیموری^۴

دانشگاه هرمزگان

(*نویسنده مخاطب: behnam_bd@yahoo.com)

چکیده

در تحقیق حاضر مدلسازی یک بعدی احتراق پیش آمیخته متان-هوا در یک مشعل متخلخل یک لایه با نسبت های احتراقی مختلف انجام شده است. برای شبیه سازی عددی از زیرروال Premix از کد Chemkin II استفاده شده که معادله انرژی فاز جامد و همچنین معادله تشعشع به آن افزوده شده است. معادلات انرژی فاز جامد و گاز و معادلات انتقال حاکم بر گونه های شیمیایی با استفاده از روش تفاضل محدود حل شده است و اثرات تشعشعی ماتریس جامد نیز با استفاده از روش جهت های مجزا لحاظ شده است. برای شبیه سازی فرایند احتراق از سینتیک کامل GRI3.0 استفاده کرده ایم. نتایج نشان می دهد که بالاترین دما و بالا ترین میزان انتشار آلاینده NO در حالت استوکیومتری اتفاق می افتد و همواره با افزایش نسبت سوخت به هوا میزان انتشار آلاینده CO افزایش می یابد. که این نتایج انطباق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد.

واژه های کلیدی: مشعل متخلخل - احتراق - شبیه سازی عددی - پروفیل دما

۱- مقدمه

در سال های اخیر احتراق در محیط متخلخل مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است زیرا که این سیستم ها دارای مشخصات منحصر به فردی از جمله محدوده توان دینامیکی زیاد، چگالی توان بالا، انتشار کمتر آلاینده هایی مانند CO و NO و سرعت بالای سوختن هستند سطح تماس زیاد ماده متخلخل باعث انتقال گرما بین جامد و گاز می شود. که این انتقال گرما افزایش بازده احتراق را نسبت به شعله آزاد سبب می شود از مزایای گرم شدن ماتریس جامد انتقال این گرما توسط هدایت و تشعشع به بالا دست جریان و پیش گرمایش بیشتر مخلوط نسوخته ورودی می باشد که این سازوکار برگشت به وسیله ماتریس جامد از طرفی موجب افزایش بازده و نرخ احتراق شده و از طرفی با کاهش دمای بیشتر شعله باعث کاهش انتشار آلاینده ها و هیدروکربن های نسوخته می شود توسعه و بهینه سازی مشعل های متخلخل نیازمند انجام مطالعات تجربی و شبیه سازی عددی خواهد بود از آنجا که تحقیقات آزمایشگاهی مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد است استفاده از شبیه سازی عددی و بررسی اثر متغیرهای مختلف بر روی توزیع دما و آلاینده ها و تعیین شرایط بهینه طراحی ضروری به نظر می رسد. بیشتر محققان برای بررسی احتراق و انتقال گرما در چنین سیستم هایی از شبیه سازی عددی استفاده کرده اند.

۱- استاد یار، دانشگاه هرمزگان

۳- استاد یار، پژوهشگاه صنعت نفت

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه هرمزگان

۴- دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس

FCCI2012-7005

باشیزاوا و همکارانش در سال ۱۹۸۸ یک شبیه سازی عددی یک بعدی با استفاده از سینتیک یک مرحله ای انجام دادند آنها اثرات تغییر ویژگی های انتقال گرما را روی سرعت سوختن و ساختار شعله مطالعه کردند [۱] زو و پریرا در سال ۱۹۹۷ با استفاده از یک سازوکار چند مرحله ای (۲۷ گونه و ۷۳ واکنش) یک مدل سازی عددی انجام دادند آنها نشان دادند که انتشار CO و NO_x به طور قابل ملاحظه ای در محیط متخلخل کاهش می یابد [۲] چانگ جن به وسیله حل عددی یک بعدی اثرات افزودن هیدروژن روی احتراق متان را در کوره های متخلخل مورد بررسی و تحلیل قرار دادند [۳] آماندا جی باررا و همکارانش در سال ۲۰۰۳ یک مطالعه عددی یک بعدی برای مدل کردن یک کوره متخلخل دو قسمتی انجام دادند آنها اثرات ویژگی های مواد متخلخل را روی پایداری شعله بررسی کردند [۴] در تحقیقی که توسط دورس و ترمیس ارائه شده است مقایسه ای بین شعله آزاد آرام و احتراق درون ماده متخلخل به صورت تجربی انجام پذیرفته است [۵] در این پژوهش احتراق در یک مشعل متخلخل را به صورت یک بعدی با در نظر گرفتن اثرات تشعشع فاز جامد و با استفاده از مکانیزم کامل GRI-3.0 به صورت عددی شبیه سازی کرده و نتایج آن را با داده های تجربی کافینگ و کونینگ [۶] مقایسه می کنیم

۲- معادلات حاکم و روش حل عددی

همان گونه که اشاره گردید احتراق در مشعل متخلخل نسبت به شعله آزاد دارای برخی خصوصیات ویژه است از آنجا که در شعله محیط متخلخل علاوه بر فاز گاز، فاز جامد نیز وجود دارد بنابراین این معادله انرژی برای فاز جامد نیز باید به صورت جداگانه در نظر گرفته شود در برخی مدل سازی های اولیه معادله انرژی دو فاز با قرار دادن شرط تعادل محلی دما به یک معادله تبدیل می شود و با استفاده از ظریب هدایت حرارتی معادل، مدل پیشنهاد شده حل می گردید [۷] استفاده از شرط تعادل محلی دما تنها در حالتی که ضریب انتقال حرارت حجمی به اندازه کافی بزرگ باشد تا دمای فاز جامد در هر نقطه را به دمای فاز گاز نزدیک نماید صحیح است از این رو در شبیه سازی های جدید مشعل متخلخل از این فرض استفاده نمی شود از آنجا که توان تشعشعی محیط جامد نسبت به محیط گاز بسیار بیشتر است لذا از شار تشعشعی فاز گاز در مقابل فاز جامد صرفه نظر می گردد برای حل معادلات بقا در محیط متخلخل از تکنیک متوسط گیری حجمی استفاده شده است صحت این روش توسط تحقیقات متعددی به اثبات رسیده است [۸] معادلات حاکم متوسط گیری شده در مشعل متخلخل عبارتند از:

$$\frac{\partial(\rho_g \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g \phi u)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

معادله بقای گونه های شیمیایی :

$$\rho_g \phi \frac{\partial Y_K}{\partial t} + \rho_g \phi u \frac{\partial Y_K}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_g \phi Y_K V_K) - \phi \dot{\omega}_K W_K = 0 \quad (2)$$

معادله بقای انرژی فاز گاز :

$$\rho_g \phi C_{p,g} \frac{\partial T_g}{\partial t} + \rho_g \phi u C_{p,g} \frac{\partial T_g}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\phi \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right] + \phi \sum_{k=1}^N \rho Y_K V_K C_{p,k} \frac{\partial T_g}{\partial x} + \phi \sum_{k=1}^N h_k \dot{\omega}_k + H_v (T_g - T_s) = 0 \quad (3)$$

معادله بقای انرژی فاز جامد:

$$\rho_s \phi C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left((1 - \phi) \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + H_v (T_g - T_s) - \frac{dq_r}{dx} = 0 \quad (4)$$

در این رابطه ϕ نسبت تخلخل است که به صورت نسبت حجم حفره ها به کل حجم محیط متخلخل تعریف می گردد u سرعت جریان، H_v ضریب انتقال حرارت حجمی و λ_s ضریب انتقال حرارت هدایت حرارتی می باشد همچنین $h_k, \dot{\omega}_k, V_k, Y_k$ به ترتیب کسر جرمی، سرعت دیفیوژن، نرخ تولید مولی، جرم مولکولی و آنتالپی مولی گونه شیمیایی k می باشد از اندیس g برای نشان دادن فاز گاز و از اندیس s برای نشان دادن فاز جامد استفاده شده است.

FCCI2012-7005

برای تعیین گرادیان تشعشع از تقریب جهت‌های تفکیک شده یا DOM^۱ استفاده شده است ضریب انتقال حرارت حجمی و انتقال حرارت هدایتی برابر مقدار ثابتی در نظر گرفته شده است که در جدول (۱) مورد اشاره قرار گرفته اند همچنین در جدول (۱) دیگر خواص ترموفیزیکی تحقیق حاضر آورده شده است. خواص ماتریس متخلخل از سرامیک زیرکونیای پایدار شده گرفته شده است.

جدول ۱ - خواص ترموفیزیکی ماتریس متخلخل مورد استفاده در مدل [۶]

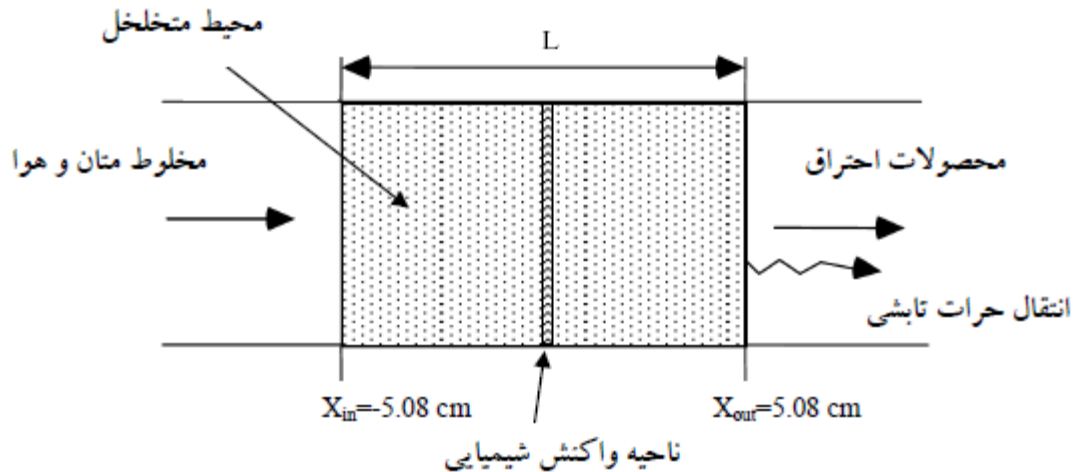
$\beta = 270 \text{ m}^{-1}$	$\sigma_s = 216 \text{ m}^{-1}$
$H_v = 10^7 \text{ W/m}^3 \cdot \text{k}$	$\lambda_s = 1.2 \text{ W/m} \cdot \text{k}$
$\rho_s = 5.56 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$\phi = 0.87 \text{ for } 3.9 \text{ ppc}$
$C_{p,s} = 824 \text{ J/kg} \cdot \text{k}$	

پروسه حل عددی با استفاده از تقریب تفاضل محدود که معادلات دیفرانسیل را به یک سیستم دستگاه معادلات جبری تعدیل می نماید آغاز می گردد تقریب اولیه با استفاده از یک شبکه درشت که دارای پنج یا شش نقطه می باشد بدست می آید سپس نقاط جدید با توجه به جواب بدست آمده و افزایش ناگهانی گرادیان جواب به شبکه محاسباتی اضافه می گردند جوابهای بدست آمده از شبکه درشت با استفاده از میان یابی به شبکه ریز تر برازش می شوند و این پروسه تا حصول به دقت مورد نظر جوابها ادامه می یابد سیستم دستگاه معادلات جبری با استفاده از الگوریتم بهبود یافته نیوتن میراشونده حل می گردد [۹ و ۱۰]. چنان چه این الگوریتم نتواند به سمت جواب همگرا شود، یک نقطه شروع جدید یا حدس اولیه جدید، با استفاده از یک پیشروی زمانی بدست می آید و سپس مراحل الگوریتم تکرار می گردد. به بیان دیگر حدس اولیه کلید همگرایی این روش است.

در این محاسبات دمای نقطه‌ای از ناحیه پیش گرمایش ثابت ($\sim 1075\text{K}$) فرض شده، و با توجه به آن دیگر پارامترها محاسبه می شوند. برای رسیدن به جواب از شبکه تطبیق یابنده استفاده شده است. این برنامه محاسبات را از تعداد ۱۰ نقطه شروع کرده و تا رسیدن به دقت 10^{-5} در خصوص کلیه پارامترهای وابسته مانند غلظت ذرات یا دمای گاز، بین ۸۰۰ تا ۹۰۰ نقطه به شبکه محاسباتی در نقاطی که گرادیان پارامتری شدید است اضافه می کند شماتیک مشعل متخلخل مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده است در تمامی محاسبات انجام شده، از سینتیک احتراقی کامل GRI-3.0 که توسط انستیتو تحقیقات گاز ارائه شده است، استفاده گردیده. [۱۱] این سینتیک برای احتراق متان پیشنهاد شده است. که در مشعل متخلخل مورد نظر نیز از آن برای مدلسازی احتراق مخلوط سوخت و هوا استفاده شده است این نمونه مشعل متخلخل تک لایه ای بوده و طول آن ۱۰.۱۶ سانتیمتر می باشد.

¹ Discrete ordinate Method

شکل ۱ - شماتیک مشعل متخلخل مورد نظر در محاسبات



۳- شرایط مرزی در حل معادلات

شرایط مرزی لازم برای حل معادلات حاکم بر مسئله در جدول ۲ نشان داده شده است

جدول ۲ - شرایط مرزی

گونه ها	انرژی جامد	انرژی گاز	پیوستگی	
$Y = Y_{in}$	$H_v (T_{g,in} - T_g)$ $+ \sigma \epsilon (T_{surround}^4 - T_g^4)$ $= -k_s \frac{dT_s}{dx}$	$\dot{m} c_{pg} (T_{gi} - T_g) =$ $-k_g \frac{dT_g}{dx}$	$u = u_{in}$	ورودی
$\frac{dY}{dx} = 0$	$H_v (T_{g,out} - T_s)$ $+ \sigma \epsilon_{out} (T_{surround}^4 - T_g^4)$ $= -k_s \frac{dT_s}{dx}$	$\frac{dT_g}{dx} = 0$	-	خروجی

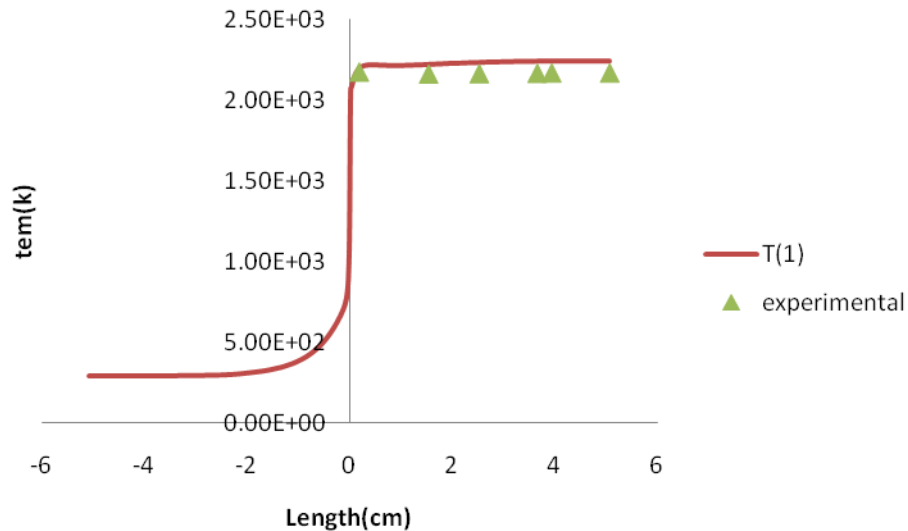
در مدل سازی انجام شده دمای محیط برابر $300^\circ K (T_{surround})$ در نظر گرفته شده است و σ ثابت استفان بولتزمن است که در ورودی و خروجی برابر در نظر گرفته شده است

۴- نتایج

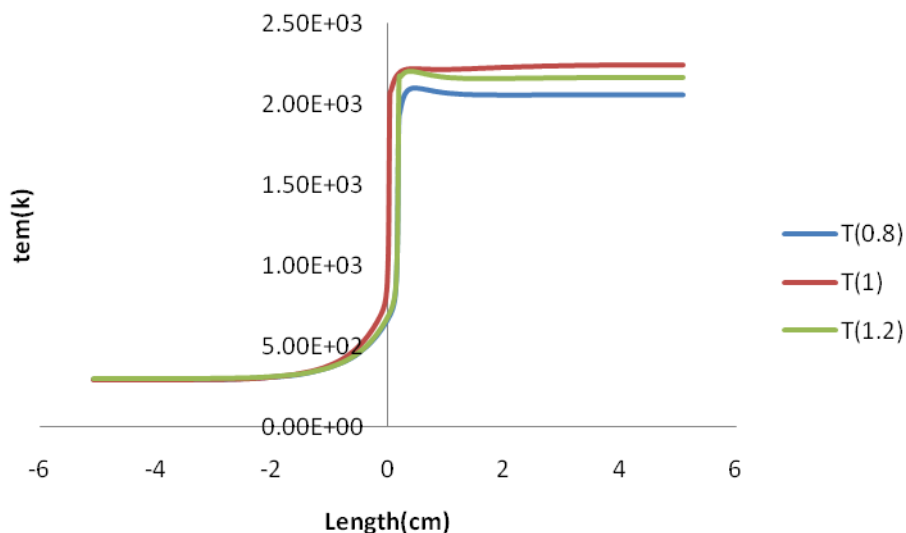
یکی از مهم ترین مباحث در خصوص مشعل متخلخل بررسی پروفیل دما و آلاینده های خروجی از آن است که تحقیقات آزمایشگاهی متعددی در این رابطه انجام شده است برای اطمینان از صحت نتایج بدست آمده از مدل سازی انجام شده پروفیل دما با نتایج آزمایشگاهی منبع [۶] مورد مقایسه قرار گرفته است و نتایج حاصل با دقت قابل قبولی یکسان می باشند . همان گونه که در نمودار (۱) مشاهده می شود احتراق تقریباً در مختصات صفر اتفاق می افتد با توجه به پروفیل دمای جامد و گاز مشاهده می شود که قبل از رسیدن به ناحیه احتراق دمای آنها تا اندازه زیادی نسبت به دمای زمان ورودی گاز بالا

FCCI2012-7005

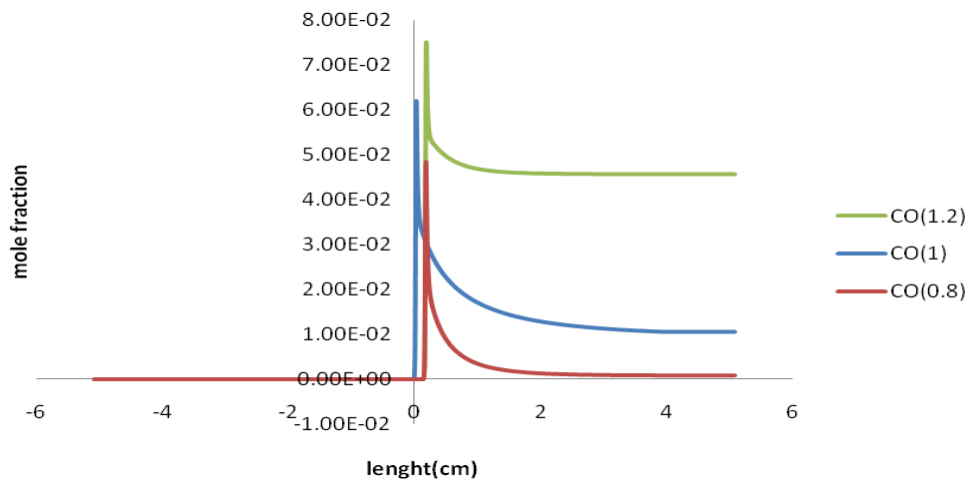
می رود همچنین این افزایش دما در ماتریس جامد کمی بیشتر از گاز می باشد که علت آن انتقال گرمای ناحیه احتراق به وسیله تشعشع و هدایت به بالا دست جریان و گرم شدن ماتریس جامد و به تبع آن انتقال این گرما به مخلوط هوا و سوخت ورودی می باشد که این موضوع از مهم ترین دلایل استفاده از محیط متخلخل در احتراق می باشد یعنی پیش گرمایش مخلوط قبل از رسیدن به ناحیه احتراق که این پیش گرمایش مخلوط هوا و سوخت قبل از احتراق سبب کاهش تولید آلاینده ها در زمان احتراق می شود .



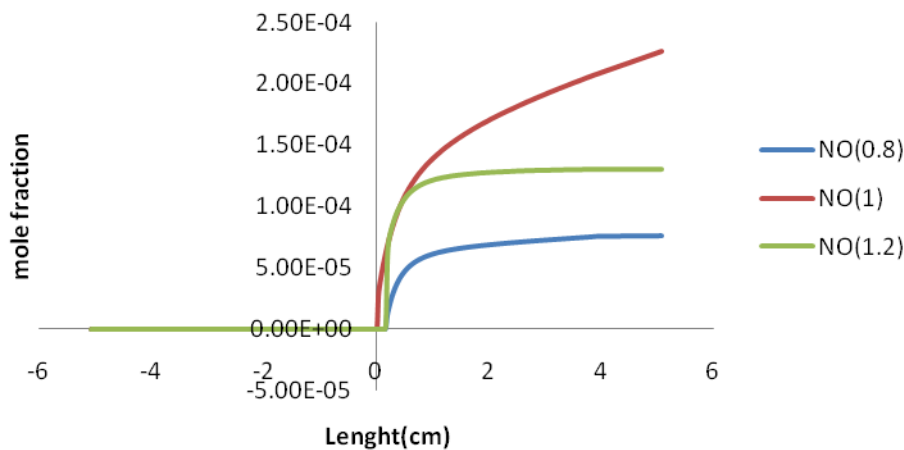
نمودار ۱- مقایسه پروفیل دمایی مشعل متخلخل در حالت استوکیومتری با نتیجه آزمایشی [۶]



نمودار ۲- مقایسه پروفیل دمایی مشعل متخلخل در نسبت های مختلف اختلاط سوخت و هوا



نمودار ۳ - مقایسه میزان انتشار مونوکسید کربن در نسبت‌های مختلف اختلاط سوخت و هوا



نمودار ۴ - مقایسه میزان انتشار مونوکسید نیتروژن در نسبت‌های مختلف اختلاط سوخت و هوا

پس از اطمینان از صحت محاسبات انجام شده، برای سه نسبت سوخت به هوای متفاوت که عبارتند از حالت فقیر با نسبت سوخت به هوای (۰/۸) حالت استوکیومتری و حالت غنی با نسبت سوخت به هوای (۱/۲) برنامه را اجرا کرده، و برای پروفیل دما نمودار (۲)، و میزان انتشار آلاینده‌های CO و NO به ترتیب نمودارهای (۳) و (۴) حاصل گردید. در نمودار (۲) مشاهده می‌شود که مشعل متخلخل در حالت استوکیومتری به بیشترین دما می‌رسد و یا به عبارتی بیشترین توان حرارتی در حالت استوکیومتری بدست می‌آید. در نمودار (۳) مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت سوخت به هوا میزان انتشار گاز مونوکسید کربن در فرایند احتراق در مشعل افزایش می‌یابد و هرچه این نسبت بیشتر شود میزان انتشار مونوکسید کربن نیز بیشتر می‌شود که این موضوع با نتایج تجربی مطابقت دارد [۶]. در نمودار (۴) مشاهده می‌شود که افزایش نسبت سوخت به

FCCI2012-7005

هوا در فرایند احتراق تا رسیدن به نسبت استوکیومتری ، باعث افزایش تولید مونوکسید نیتروژن می شود پس از گذر از حالت استوکیومتری افزایش نسبت سوخت به هوا باعث کاهش تولید مونوکسید نیتروژن شده به عبارتی بیشترین میزان تولید NO در حالتی است که مخلوط سوخت و هوا نسبت استوکیومتریک داشته باشند. که این موضوع با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد [۶].

۵- نتیجه گیری :

در این تحقیق احتراق در یک محیط متخلخل به صورت یک بعدی شبیه سازی شده است در این شبیه سازی از دو معادله انرژی برای فاز گاز و فاز جامد استفاده شده است و مکانیزم احتراقی متان هوا با استفاده از سینتیک کامل GRI-3.0 در مدل سازی احتراق به کار رفته است همچنین اثرات تشعشع ماتریس جامد با استفاده از خواص فیزیکی بر مبنای داده های تجربی لحاظ شده است و نتایج نشان می دهد که مشعل متخلخل با پیش گرمایش مخلوط هوا-متان سبب پیش گرمایش بهتر و تولید آلاینده کمتر می شود . بیشترین توان حرارتی در حالت استوکیومتری بدست می آید . همچنین افزایش نسبت سوخت به هوا سبب افزایش تولید مونوکسید کربن می شود ولی در مورد مونوکسید نیتروژن این افزایش تا رسیدن به نسبت استوکیومتری یک باعث افزایش انتشار مونوکسید نیتروژن می شود پس از آن با افزایش این نسبت انتشار مونوکسید نیتروژن کاهش می یابد. وبا دقت در نمودارهای (۴و۲) می توان نتیجه گرفت که بین دمای مشعل و انتشار آلاینده مونوکسید نیتروژن نسبت مستقیم برقرار است یعنی هرچه دمای مشعل بالاتر باشد آلاینده مونوکسید نیتروژن بیشتر تولید می شود پس چنان چه بخواهیم مونوکسید نیتروژن کمتری تولید شود باید کاری کنیم که دمای شعله کاهش پیدا کند که این نتایج با مقایسه کردن با داده های تجربی [۶] تایید می شود .

مراجع

- 1- Yoshizawa, Y., Sasaki,K., and Echigo,R, “Analytical Study the structure of radiation controlled flame ,” Int.J. Heat and Mass Transfer.31.pp.311-319.1988.
- 2- Zhou,X.Y.,and Pereira,J.C.F.,“Numerical Study of Combustion and Pollution in Inert Non Homogenous Porous Media ,”Combustion Science technology,130,pp.335-364,1997.
- 3- Tseng,C.,“Effects of Hydrogen Addition on Methane Combustion in a Porous Medium Burner,” Int .J. Hydrogen Energy ,27,pp,699-707,2002
- 4- Barra,A.J., Diepvens, G.,Ellzey,J,L, and Henneke, M,R., “Numerical of the Effect of Material Properties on flame Stabilization in a Porous Burner,” combustion and Flame , 134,pp.369-397, 2003
- 5- D.Trimis, F.Drust, O.Pickenacker and K.Pickenaker,“Porous Medium Combustor versus Combustion Systems with Free Flames”, Clean Air,Vol.3,PP,1-20,2002
- 6- C.Chaffin, M.koenig, M.Koeroghlian, R.Matthews, M.Hall, S.Nichols, and I.Lim, “Experimental Investigation of Premixed Combustion within Highly Porous Media” Proceeding of the ASME/JSME Thermal EnGineering Joint Conference, 4,219-224,1991
- 7- A.A.M.Oliveira and M. Kaviany, “Nonequilibrium in the Transport of Heat and Reactants in Combustion in Porous Media.”, Prog, Energy Combust. Sci., 27, 523-545, 2001
- 8- M. Sahraoui and .Kaviany, “Direct Simulation Vs Volume – Averaged Treatment of Adiabatic Premixed Flame in a Porous Media”, Int.J. Heat Mass Transfer, Vol.37, No.18, PP. 2817-2834, 1994
- 9- R, Kee , , J.Grcar, M.Smooke, and J.Miller, “A FORTRAN program for modeling steady laminar one dimensional premixed flames” Technical Repot SAND85-8240, Sandia National Laboratories, 1985
- 10- J.Grcar.The Twopnt program for boundary value problems . Technical Report SAND91-8230, Sandia National Laboratories, April1992
- 11- http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/