مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۵، ص‌ص ۸۳-۹۰

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی دوبعدی مشعل تشعشعی کاتالیستی نفوذ متقابل

سیدمصطفی حسین‌علی‌پور[۱*]، مسعود مددالهی[۲]، آروین بهروان[۳]، متین پروری[۴]

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۲- دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۳- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۴- دانشیار، مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
*تهران، صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۶۵، alipour@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۲۳ شهریور ۱۳۹۲
پذیرش: ۱۸ آبان ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۳۱ خرداد ۱۳۹۳

کلید واژگان:
مشعل تشعشعی کاتالیستی
شبیه‌سازی عددی
انتقال حرارت
محیط متخلخل

چکیده

در مطالعه حاضر، به بررسی عددی عملکرد مشعل‌های تشعشعی کاتالیستی نفوذ متقابل پرداخته شده است. در این مشعل‌ها سوخت از پشت سیستم وارد شده و پس از عبور از یک یا چند لایه عایق، وارد لایه کاتالیستی می‌شود. اکسیژن نیز از سمت جلوی مشعل نفوذ کرده و روی سطح کاتالیست با سوخت واکنش می‌دهد. برای تحلیل عملکرد پنل، یک مشعل کاتالیستی نفوذ متقابل شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی دوبعدی و پایای مشعل، معادلات بقای مومنتم در محیط متخلخل و غیرمتخلخل، معادله بقای انرژی و معادله بقای گونه‌ها به روش المان محدود در نرم‌افزار کامسول حل شده‌اند. برای استخراج شرایط مرزی مناسب در سطح لایه کاتالیستی مشعل، جریان سیال بر یک سطح متخلخل مدل‌سازی شده و نشان داده شد که می‌توان از روابط تجربی جابه‌جایی طبیعی روی یک سطح عمودی استفاده کرد. مقایسه نتایج عددی حاصل با مطالعات تجربی پیشین منتشر شده در ادبیات فن، بهبود قابل توجه دقت مدل عددی تولید شده (به میزان ۱۰٪) را نشان داد. در این پژوهش نشان داده شده که نفوذ اکسیژن از سمت مقابل مشعل به لایه کاتالیستی به عنوان عامل محدودکننده در فرآیند احتراق کاتالیستی است.

2D Simulation of catalytic radiant counter-diffusive burners

Sayed Mostafa Hosseinalipour[1*], Masoud Madadelahi[2], Arvin Behravan[3], Matin Parvari[4]

1- Department of Mechanical Engineering, Iran University of science and technology, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of science and technology, Tehran, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, Iran University of science and technology, Tehran, Iran
4- Department of chemical Engineering, Iran University of science and technology, Tehran, Iran
*P.O.B. 16765-163 Tehran, Iran, alipour@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 September 2013
Accepted 09 November 2013
Available Online 21 June 2014

Keywords:
Catalytic radiant burner
Numerical simulation
Heat transfer
Porous media

ABSTRACT

A two dimensional numerical study is presented for steady state performance analysis of a catalytic radiant counter-diffusive burner. In these burners, the gaseous fuel enters from the rear of the burner and passes through the insulation and catalyst layers. The oxygen enters the catalyst layer from the burner surface and opposite to the fuel path. The reaction takes place over the catalyst layer. In this paper, the momentum, energy and species conservation equations in porous and non-porous media are solved using the finite element method in the COMSOL software. The simulations are based on proposed corrections on boundary conditions and combustion rate of methane equation. The simulation results compared with experimental measurements published in the literature for the same geometry and conditions which shows a considerable (10%) improvements. It is shown that diffusion of oxygen through the pad limits the catalytic combustion and controls the fuel conversion in the burner.

۱- مقدمه

در احتراق کاتالیستی با استفاده از کاتالیست فلزات نجیب مانند پلاتینیوم و پالادیوم در یک محیط متخلخل، می‌توان با کاهش انرژی فعال‌سازی واکنش، دمای حاصل از فرآیند احتراق را کاهش داد. کاهش دما منجر به عدم تولید آلاینده‌هایی نظیر NOx و کارکرد پاک این مشعل‌ها می‌شود. واکنش‌های شیمیایی در مشعل‌های کاتالیستی، از جمله واکنش‌های سطحی بوده و نرخ واکنش‌های همگن (فاز گازی) به دلیل دمای پایین کارکردی مشعل و محدودیت نفوذ اکسیژن، ناچیز است؛ بنابراین در کارکرد این مشعل‌ها شعله‌ای مشاهده نشده و به دلیل ساختار کاتالیست مورد استفاده و دمای سطح آن، تابش حرارت در محدوده مادون قرمز ایجاد می‌شود. این پدیده برای اولین بار توسط دیوی کشف شد. در آزمایش‌های وی نشان داده شد که رشته‌های پلاتین به عنوان کاتالیست می‌توانند مخلوط قابل اشتعال سوخت-هوا را بدون ایجاد شعله و با ایجاد حرارت به صورت شار تشعشعی صادر شده از سطوح داغ کاتالیست، محترق کند [۱]. در شکل ۱ اجزا مختلف یک مشعل تشعشعی کاتالیستی نفوذ متقابل نمایش داده شده است. گاز طبیعی پس از عبور از یک اوریفیس، از پشت مشعل وارد سیستم شده و بعد از عبور از دو لایه عایق که هم نقش پخش‌کننده سوخت را دارند و هم از اتلاف انرژی از قسمت پشت مشعل جلوگیری می‌کند، به لایه کاتالیستی می‌رسد. اکسیژن نیز از سمت مقابل

Please cite this article using:
S.M. Hosseinalipour, M. Madadelahi, A. Behravan, M. Parvari, 2D Simulation of catalytic radiant counter-diffusive burners, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 83-90, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Archive of SID
www.SID.ir

مشعل بعد از عبور از لایه مرزی ایجاد شده روی کاتالیست، به داخل آن نفوذ کرده و با سوخت واکنش می‌دهد. به دلیل عدم اختلاط سوخت و هوا و نفوذ اکسیژن از سمت مقابل سوخت، به این مشعل‌ها در ادبیات فن، اصطلاحا نفوذ متقابل گفته می‌شود. انرژی فعال‌سازی برای شروع واکنش احتراق روی سطوح کاتالیست در این مشعل‌ها، توسط المنت‌های الکتریکی تامین می‌شود.

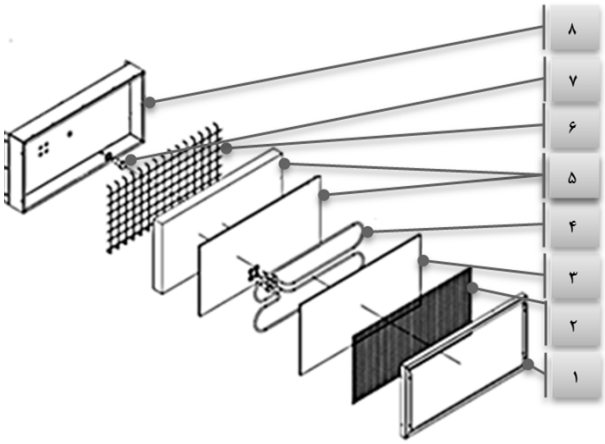
واکنش اکسیداسیون متان روی کاتالیست پلاتینیوم بر پایه فیبر آلومینا در یک مشعل کاتالیستی توسط تریم و لام به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. در مطالعه ایشان، دی‌اکسید کربن و آب تنها محصولات قابل ردیابی واکنش بودند [۲]. ایشان سپس مدل یک‌بعدی مشعل یاد شده را نیز مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند که تولید حرارت به نرخ واکنش شیمیایی وابسته است و افزایش در دبی متان ورودی، ممکن است سبب افزایش نرخ واکنش در اثر افزایش غلظت متان، کاهش نرخ واکنش در اثر محدودیت نفوذ هوا به داخل پد و یا افزایش لغزش متان در اثر کاهش زمان تماس با سطح کاتالیست شود [۳].

ابلو و ساداموری برای مطالعه جریان پایا در یک مشعل احتراق کاتالیستی یک مدل تحلیلی ارائه نکردند. در این تحلیل، ضرایب انتقال حرارت و گونه‌ها تنها وابسته به دما بوده و از تغییرات آن‌ها با غلظت گونه‌ها صرف نظر شده بود. نتایج به‌دست آمده در قسمت پروفیل‌های دمایی تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان داد ولی نتایج مربوط به غلظت گونه‌ها چندان دقیق گزارش نشد [۴]. در مطالعه دیگری که به‌تازگی توسط هیس و جدیری انجام گرفت، یک مشعل تشعشعی کاتالیستی با استفاده از روش المان محدود شبیه‌سازی شد [۵]. مطالعه مذکور اولین شبیه‌سازی دوبعدی مشعل‌های تشعشعی است که با اشکالاتی همراه بوده که در مطالعه حاضر تلاش شده است تا برای اولین بار در ادبیات فن، برخی از آن‌ها اصلاح شده و نتایج تدقیق شود.

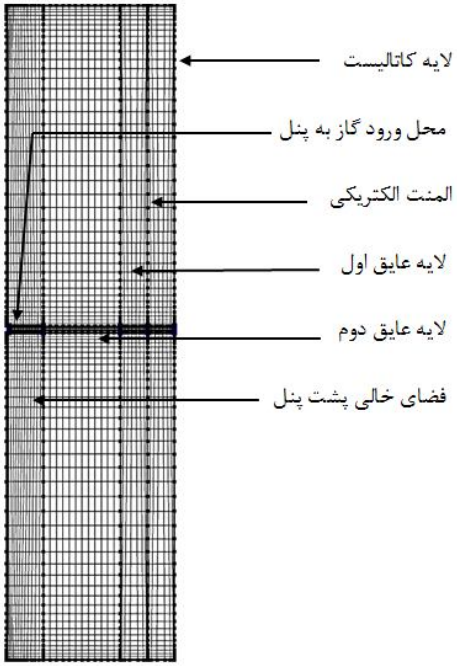
در تحقیق حاضر به بررسی عملکرد مشعل تشعشعی کاتالیستی نفوذ متقابل پرداخته شده است. مدل ایجاد شده به صورت مرحله به مرحله گسترش داده شده است. نخست برای اعمال شرایط مرزی مناسب روی سطح خروجی مشعل، نسبت به انتخاب معادله مناسب برای ضریب انتقال حرارت طبیعی و انتقال جرم اقدام به عمل آمد. بدین منظور جریان و انتقال حرارت هوای عبوری از روی یک صفحه متخلخل با در نظر گرفتن خروج محصولات احتراق به صورت تحمیل سرعت ورودی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه نسبت به تولید مدل نهایی دوبعدیِ مشعل تشعشعی کاتالیستی با استفاده از نرم‌افزار کامسول و حل عددی معادلات انتقال مومنتم، حرارت و بقای گونه‌ها به روش المان محدود اقدام به‌عمل آمد. برای تهیه مدل هندسی مورد استفاده در این پژوهش، یک نمونه تجاری از مشعل‌های تشعشعی کاتالیستی نفوذ متقابل با مشخصات موجود در جدول ۱ خریداری شد. شکل ۲ نشان‌دهنده هندسه و شبکه‌بندی دوبعدی مشعل تشعشعی کاتالیستی است که در مدل‌سازی حاضر از آن استفاده شده است.

جدول ۱ مشخصات مشعل تشعشعی تجاری استفاده شده در این پژوهش

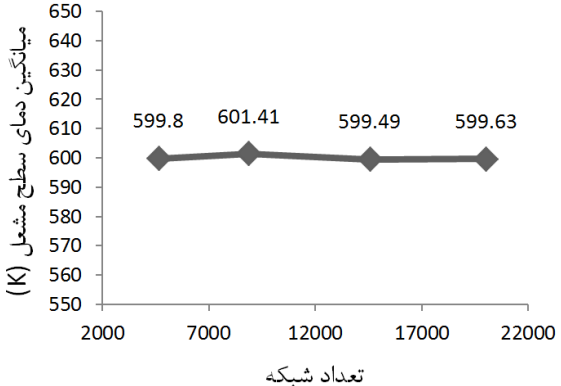
پارامتر	توضیحات
مدل	WX12X24
ظرفیت مشعل	۱۰۰۰۰BTUH
ولتاژ راه‌اندازی	۱۲V
جریان الکتریکی مورد نیاز	۳۰A
سوخت مصرفی	گاز طبیعی
ابعاد کلی مشعل	۰/۳ m ×۰/۶ m×۰/۰۷۸ m
نرخ سوخت ورودی	۴/۹۳ lit/min



شکل ۱ نقشه انفجاری مشعل تشعشعی کاتالیستی شامل ۱- قاب ۲- توری جلوی مشعل ۳- لایه کاتالیست ۴- المنت الکتریکی ۵- لایه‌های عایق ۶- توری پشت مشعل ۷- محل ورود سوخت ۸- بدنه مشعل



شکل ۲ هندسه و شبکه‌بندی مشعل تشعشعی کاتالیستی به صورت دوبعدی



شکل ۳ بررسی استقلال از شبکه در مدل‌سازی مشعل

شایان یاد است که پس از بررسی استقلال از شبکه‌بندی و تخمین میزان اثرات تغییر تعداد نقاط شبکه بر دمای سطح که در شکل ۳ نشان داده شده است، هندسه تولیدی با تعداد ۲۰۰۲۶ المان شبکه‌بندی شود.

www.SID.ir

۲- معادلات حاکم

۲-۱- معادله حاکم بر جریان سیال

با توجه به ساختار مشعل‌های تشعشعی کاتالیستی، سیال در داخل مشعل در دو محیط متخلخل و غیرمتخلخل و به صورت آرام جاری می‌شود. معادله جریان حاکم در محیط غیرمتخلخل معادله ناویر استوکس[1] به صورت (۱) بوده و معادله‌ای که جهت تخمین رفتار سیال در محیط متخلخل به‌کار برده شده است، معادله برینکمن[2] که توسعه‌یافته معادله دارسی در محیط‌های متخلخل است و به صورت (۲) بیان می‌شود.

$$\nabla.[-pI+\mu(\nabla u+(\nabla u)^T)]-\rho(u.\nabla)u=0 \qquad (۱)$$

$$\nabla.[-pI+\frac{\mu}{\varphi}(\nabla u+(\nabla u)^T)-\frac{2\mu}{3\varphi}(\nabla.u)I]-\frac{\mu}{\varepsilon_{\rm p}}u=0 \qquad (۲)$$

برای محاسبه ویسکوزیته مخلوط‌های چندجزیی از تئوری چپمن-انسکاگ[3] به‌گونه‌ی (۳) استفاده شده است.

$$\mu_{\rm m}=\sum_{i=1}^{N}\frac{w_{{\rm mol}i}\mu_i}{\sum_{j=1}^{N}w_{{\rm mol}j}\varphi_{ij}} \qquad (۳)$$

روش‌های مختلفی برای تخمین پارامتر φ_{ij} وجود دارد. در این‌جا از روش تقریب وایک[4] به‌صورت (۴) استفاده شده است.

$$\varphi_{ij}=\frac{[1+(\frac{\mu_i}{\mu_j})^{\frac{1}{2}}(\frac{M_i}{M_j})^{\frac{1}{4}}]^2}{[8\times(1+\frac{M_i}{M_j})]^{\frac{1}{2}}} \qquad (۴)$$

۲-۲- معادله بقای انرژی

برای بررسی انتقال حرارت در مشعل تشعشعی باید معادله انرژی را در محیط متخلخل و غیرمتخلخل حل کرد. محیط متخلخل در این پژوهش به‌صورت همگن و ایزوتروپ فرض شده و از اثرات تشعشع در آن صرف نظر شده است. همچنین فرض شده است که در محیط متخلخل تعادل حرارتی محلی[5] وجود دارد، به‌گونه‌ای که دمای فازهای جامد و سیال با هم برابر هستند. با توجه به این فرضیات معادله بقای انرژی به صورت (۵) در نظر گرفته شده است.

$$(\rho C_{\rm p})_{\rm eff}\frac{\partial T}{\partial t}+(\rho C_{\rm p})_f u.\nabla T=\nabla.(K_{\rm eff}\nabla T)+Q \qquad (۵)$$

که در آن ظرفیت حرارتی و ضریب رسانش حرارتی محیط متخلخل با استفاده از تخلخل ۰/۹۷ محاسبه شده است. گرمای ویژه در فشار ثابت برای مخلوط گازها به صورت (۶) محاسبه شده است.

$$C_{\rm p}=\omega_1 C_{{\rm p},1}+\omega_2 C_{{\rm p},2}+\omega_3 C_{{\rm p},3}+.....=\sum_i \omega_i C_{{\rm p},i} \qquad (۶)$$

ضریب رسانش مخلوط از رابطه واسیلجوا[6] محاسبه شده است [۶]. همچنین ترم Q در معادله (۵) چشمه حرارتی ناشی از واکنش احتراق سوخت است که در لایه کاتالیستی به صورت (۷) محاسبه می‌شود و در سایر بخش‌ها مقدار آن صفر در نظر گرفته شده است.

$$Q=-r\times\Delta H_{\rm CH_4} \qquad (۷)$$

مقدار $\Delta H_{\rm CH_4}$ نشان‌دهنده آنتالپی احتراق متان است و به صورت (۸) در نظر گرفته می‌شود [۷].

$$\Delta H_{\rm CH_4}=-806.9+1.586e-2\times T-8.485e-6\times T^2 -3.963e-9\times T^3+2.16e-12\times T^4 \qquad (۸)$$

۲-۳- معادله بقای گونه‌ها

رابطه پیوستگی برای گونهi در مشعل به صورت معادله (۹) و (۱۰) در نظر گرفته شده است. این روابط با فرض پایا بودن سیستم و استفاده از مدل نفوذ فیک[7] برای تخمین فلاکس جرمی در مشعل در نظر گرفته شده است.

$$\nabla.j_i+\rho(u.\nabla)w_i=r_i \qquad i=1,2,...,N \qquad (۹)$$

$$j_i=-\rho D_{i,{\rm m}}\nabla w_i \qquad (۱۰)$$

همچنین به دلیل آن‌که فیبرهای موجود در مشعل بسیار نازک هستند و نرخ جریان گاز نیز پایین است، این انتظار وجود دارد که اختلاف غلظت و دما در عبور از مرز مشترک سیال- جامد در ساختار فیبری و متخلخل لایه کاتالیستی ناچیز باشد. در نتیجه لایه کاتالیستی را می‌توان به صورت یک محیط تک‌فاز پیوسته در نظر گرفته و جهت تحلیل واکنش سطحی احتراق، به‌جای استفاده از سینتیک جزیی احتراق متان روی کاتالیست پلاتینیوم بر پایه فیبر آلومینا، از سینتیک کلی استفاده کرد [۳]. برای این منظور از نتایج مطالعه تجربی تریم و لام استفاده شده و رابطه سینتیک کلی به صورت (۱۱) در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که رابطه نرخ واکنش که جهت تحلیل پدیده انتقال گونه‌ها در واکنش‌های کاتالیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد، با بهره‌گیری از مطالعات تجربی استخراج می‌شود. نتایج این گونه تحلیل‌ها شامل ثابت‌های معادله (۱۱) است که به کاتالیست مورد استفاده، سوخت و اکسیدکننده وابسته است [۸].

$$r_{\rm CH4}=-k\times\exp(\frac{-E}{RT})\times {w_{{\rm mol}_{\rm CH_4}}}^{a}\times {w_{{\rm mol}_{\rm O_2}}}^{b} \qquad (۱۱)$$

در این رابطه در دمای بحرانی ۸۱۳ کلوین، ثابت‌های رابطه تغییر می‌کنند؛ بنابراین سینتیک کلی زیر برای احتراق کاتالیستی متان در این مشعل در نظر گرفته شد.

$$T<813K\Rightarrow r_{\rm CH4}=-k_{\rm LT}\times\exp(\frac{-1.87e5}{RT})\times w_{{\rm mol}_{\rm CH_4}}\times w_{{\rm mol}_{\rm O2}}^{0.75} \qquad (۱۲)$$

$$T>813K\Rightarrow r_{\rm CH4}=-k_{\rm HT}\times\exp(\frac{-8.61e4}{RT})\times w_{{\rm mol}_{\rm CH_4}}\times w_{{\rm mol}_{\rm O2}} \qquad (۱۳)$$

ضرایب پیش‌نمایی واکنش در روابط (۱۲) و (۱۳)، به ترتیب برابر با $1.67e12\frac{\rm kgCH4}{\rm m^3R.s}$ و $7.72e5\frac{\rm kgCH4}{\rm m^3R.s}$ در نظر گرفته شدند. در مطالعه جدیری و همکاران، با استفاده از همین مقاله به‌جای ضرایب مولی از ضرایب جرمی استفاده شده و دمای بحرانی نیز ۸۱۷ کلوین در نظر گرفته شده بود که این اشتباهات سبب ایجاد خطا در نتایج مدل‌سازی ایشان گردید [۵].

۳- شرایط مرزی

در معادله بقای مومنتوم، شرایط مرزی برای نازل ورودی، با توجه به میزان مصرف سوخت مشعل، شرط سرعت ثابت اعمال شد. همه مرزهای دیگر بدون لغزش فرض شدند، به جز مرز خروجی (سطح کاتالیست) که به‌صورت فشار ثابت (۱۰۱۳۲۵ پاسکال) در نظر گرفته شده است.

برای شرط مرزی در معادله بقای انرژی، مرزهای ورودی که محل ورود سوخت به سیستم هستند، با دمای محیط هم‌دما قرار داده شده و برای دیواره خروجی، شار حرارتی به صورت (۱۴) در نظر گرفته شد.

$$-n.(K\nabla T)=q \qquad (۱۴)$$

در مرز خروجی، فلاکس حرارتی کل خروجی از سطح مشعل (q)، توسط

1- Navier-Stokes equations
2- Brinkman
3- Chapman-Enskog
4- Wilke's Approximation
5- Local thermal equilibrium
6- Wassiljewa
7- Fick's law

Archive of SID
www.SID.ir

رابطه (۲۰) تخمین زده می‌شود. ترم اول در سمت راست معادله، مربوط به انتقال حرارت به دلیل انتقال جرم ناشی از خروج محصولات احتراق است. ترم دوم مربوط به انتقال حرارت ناشی از جابه‌جایی طبیعی روی سطح مشعل است و ترم سوم مربوط به تشعشع خارج شده از سطح مشعل به محیط اطراف است. مقدار فرض شده برای ضریب صدور سطح برابر با ۰/۶ و دمای سیال در فواصل دور از سطح برابر با ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شده است.

$$q=-\rho C_p u(T-T_\infty)-\frac{K\times \mathrm{Nu}_y}{y}(T-T_\infty)-\varepsilon_r\sigma(T^4-T_\infty{}^4) \quad (۱۵)$$

برای تخمین میزان انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی بر سطح پنل، باید عدد ناسلت برای سطح جلویی پنل محاسبه شود. در مراجع، دو رابطه (۱۶) و (۱۷)، برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی بر سطح عمودی ارائه شده است [۹، ۱۰].

$$\mathrm{Nu}_y=0.503\times\left[\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}+0.986\mathrm{Pr}^{0.5}+0.492}\right]^{0.25}\mathrm{Ra}_y{}^{0.25} \quad (۱۶)$$

$$\mathrm{Nu}_y=0.508\times\mathrm{Pr}^{0.5}\times(0.952+\mathrm{Pr})^{-0.25}\mathrm{Gr}_y{}^{0.25} \quad (۱۷)$$

برای انتخاب معادله مناسب برای استفاده به‌عنوان شرط مرزی جابه‌جایی در مرز خروجی مشعل با توجه به متخلخل بودن سطح مورد نظر، یک محیط متخلخل با ابعاد مشابه مشعل موجود (ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر) با دمای ثابت ۸۰۰ کلوین که در محیط با دمای $(T>T_\infty)T_\infty$ قرار گرفته است، مدل‌سازی شد. دمای سطح به‌گونه‌ای انتخاب شده است که در محدوده دمای سطح مشعل در کارکرد پایای باشد. هندسه و شبکه‌بندی مورد استفاده در تحلیل حاضر در شکل ۴ آورده شده است. برای بررسی تأثیرات خروج محصولات احتراق از سطح متخلخل مشعل بر عدد ناسلت بر دیواره، مدل‌سازی در دو حالت با و بدون اعمال سرعت ورودی در پشت محیط متخلخل انجام شده و نتایج حاصله با روابط تجربی موجود برای صفحه عمودی (روابط ۱۶ و ۱۷) مقایسه شد.

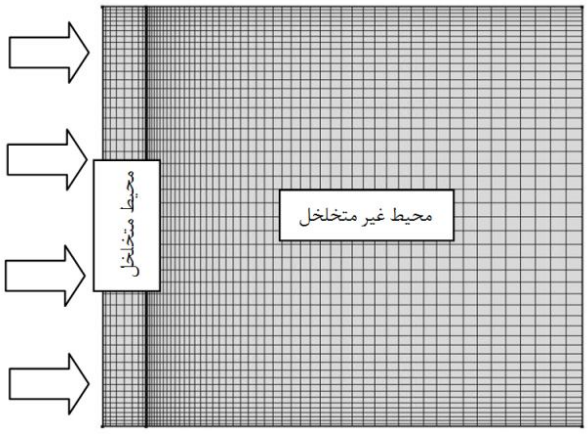
شکل ۵ پروفیل سرعت را در ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متری، با و بدون در نظر گرفتن سرعت ورودی در دمای سطح ۸۰۰ کلوین نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو پروفیل سرعت بسیار شبیه به‌هم هستند؛ بنابراین سرعت ورودی در محیط متخلخل با توجه به دبی کم آن، تأثیر قابل توجهی بر روی توزیع سرعت در جلوی سطح پنل نخواهد داشت. همچنین در شکل ۶ پروفیل‌های دما برای دو حالت با و بدون سرعت ورودی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل عدم‌تغییر قابل توجه پروفیل‌های سرعت با اعمال سرعت ورودی و برابری سایر معادلات و خواص فیزیکی در میدان حل، پروفیل دما نیز تغییر چندانی نمی‌کند.

برای استخراج Nu_y بر سطح مشعل، شار حرارتی عبوری از سطح، طبق رابطه (۱۷) از مدل‌سازی به‌دست آمده و سپس عدد ناسلت از آن استخراج شد.

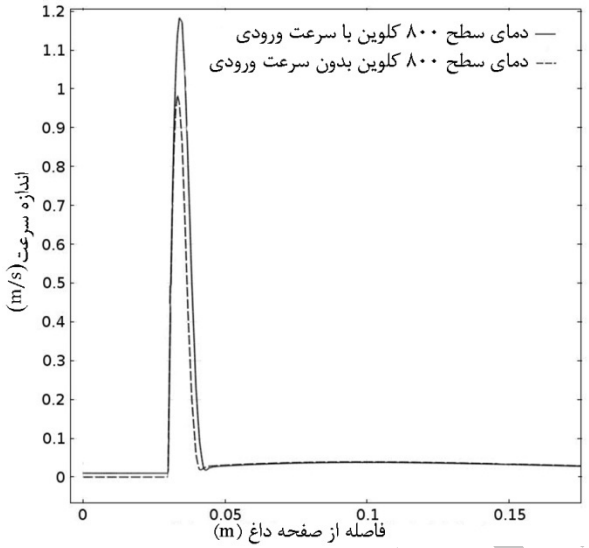
$$q_y=\frac{K\times \mathrm{Nu}_y}{y}(T-T_\infty) \quad (۱۸)$$

مقایسه مقدار عدد Nu_y به‌دست آمده از نتایج مدل‌سازی و روابط (۱۶) و (۱۷) در دمای سطح ۸۰۰ کلوین در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت بدون سرعت ورودی رابطه (۱۶) نتایج دقیق‌تری را به‌دست می‌دهد.

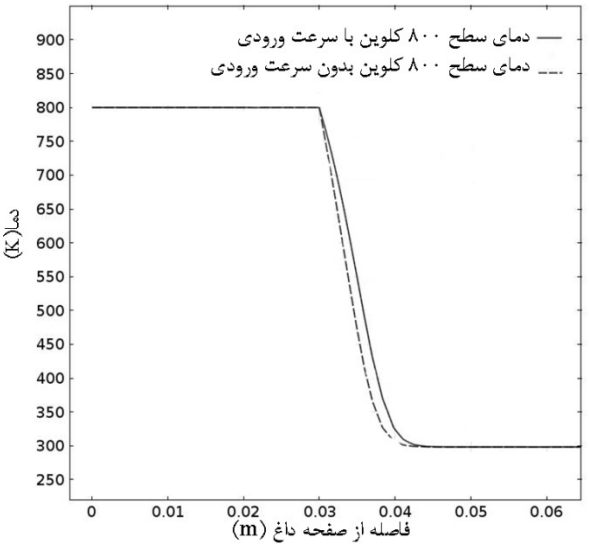
این در حالی است که با اعمال سرعت ورودی، رابطه (۱۶) نتایج دقیق‌تری را در پی خواهد داشت؛ بنابراین در شبیه‌سازی حاضر، برای اعمال شرایط مرزی جابه‌جایی طبیعی بر سطح متخلخل مشعل، از رابطه (۱۷) استفاده شد.



شکل ۴ هندسه مدل شده و شبکه‌بندی ایجاد شده در این مرحله



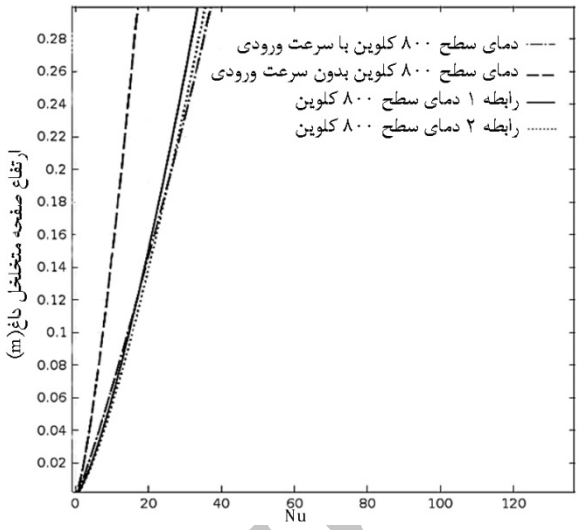
شکل ۵ پروفیل سرعت بر محیط متخلخل با دمای ۸۰۰ کلوین در ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر (بدون و با درنظر گرفتن سرعت تحمیلی ورودی)



شکل ۶ پروفیل دما روی محیط متخلخل با دمای ۸۰۰ کلوین در ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متری (بدون و با درنظر گرفتن سرعت ورودی)

برای شرط مرزی در سطوح داغ افقی رو به بالا و رو به پایین مشعل نیز به‌ترتیب از روابط (۱۸) و (۱۹) استفاده شده است [۱۱].

www.SID.ir



شکل ۷ مقایسه عدد ناسلت برای دمای سطح برابر با ۸۰۰ کلوین از مدلسازی و دو رابطه تجربی

$$\overline{\mathrm{Nu}_L} = 0.15\mathrm{Ra}_L^{\frac{1}{3}} \quad (۱۹)$$

$$\overline{\mathrm{Nu}_L} = 0.27\mathrm{Ra}_L^{0.25} \quad (۲۰)$$

برای اعمال شرط مرزی در معادله بقای گونه‌ها که برای هر جزء از سیستم ($\mathrm{CH_4, O_2, CO_2, H_2O, N_2}$) نوشته شده است، کسر جرمی اجزا در ورودی سیستم ثابت فرض می‌شود و متان تنها جز موجود در ورودی نازل است. شرایط مرزی در خروجی نیز به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$n.N_i = N_o \quad (۲۱)$$

$$N_o = h_{\mathrm{mass},i}(w_\alpha - w_\infty) + \rho u w_\infty \quad (۲۲)$$

که در آن:

$$N_i = -j_i + \rho w_i u \quad (۲۳)$$

ترم اول در معادله (۲۲) فلاکس نفوذی و ترم دوم فلاکس جابه‌جایی گونه‌ها را نشان می‌دهد که در مدل‌سازی‌های انجام شده پیشین در نظر گرفته نشده است. در این رابطه، $h_{\mathrm{mass},i}$ ضریب انتقال جرم گونه i و w_∞ نیز جز جرمی همان گونه در فاصله‌ای دور از مرز خروجی است که برای $\mathrm{CH_4, H_2O, CO_2}$ برابر صفر و برای $\mathrm{O_2, N_2}$ به‌ترتیب برابر ۰/۷۶۷ و ۰/۲۳۳ است. ضریب انتقال جرم برای گونه i، توسط رابطه (۲۴) محاسبه شده است.

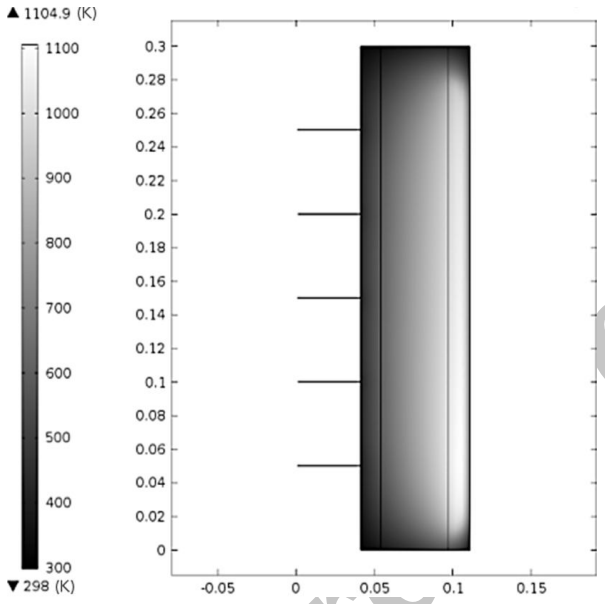
$$h_{\mathrm{mass},i} = \frac{D_{i,m} \times \mathrm{Sh}}{y} \quad (۲۴)$$

که در آن $D_{i,m}$ بیان‌گر ضریب پخش گونه i در مخلوط و y نیز نشان دهنده ارتفاع مشعل است. عدد شروود نیز بر اساس آنالوژی انتقال حرارت و جرم، برابر با عدد ناسلت بر سطح مشعل قرار داده شده است [۱۲].

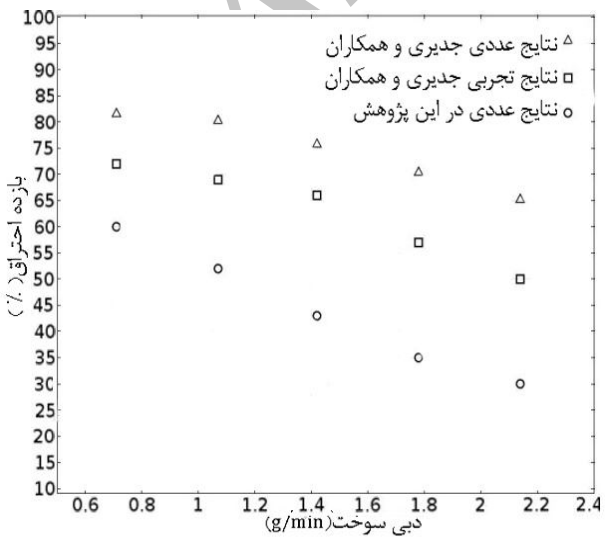
۴- نتایج

با حل معادلات دیفرانسیلی حاکم بر عملکرد سیستم با استفاده از شرایط مرزی مناسب، مدل دوبعدی مشعل تشعشعی کاتالیستی تولید شد. هدف اصلی از این مدل‌سازی دستیابی به نحوه توزیع دمای سطح به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر موجود در عملکرد تابشی این مشعل‌ها و نیز راندمان احتراق برای بررسی میزان کامل بودن احتراق انجام گرفته در مشعل بوده است. برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده در شبیه‌سازی، از نتایج تحلیل‌های تجربی منتشر شده توسط جدیری و همکاران استفاده شده است [۵]. برای این منظور نخست مدل‌سازی با هندسه مشعل مورد استفاده در کار جدیری و همکاران به‌صورت دوبعدی انجام شده و نتایج نیز با نتایج آزمایشگاهی آن‌ها تطبیق داده شده است. شایان ذکر است در شبیه‌سازی حاضر معادله استفاده شده برای نرخ واکنش و همچنین شرایط مرزی، اصلاح شده که این امر سبب نزدیک‌تر شدن نتایج به تحلیل آزمایشگاهی گشته است. شکل ۸ دمای مربوط به هندسه مشعل جدیری و همکاران را نشان می‌دهد. در شکل ۹ مقایسه‌ای میان بازده احتراق در تحلیل حاضر با تحلیل عددی و تجربی مطالعه جدیری و همکاران ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات بازده احتراق مطابق با مقادیر تجربی بوده و با افزایش دبی سوخت ورودی، میزان خطای مدل‌سازی افزایش یافته به‌گونه‌ای که بیشترین خطا در دبی سوخت ۲/۱۴ g/min برابر با مقدار ۳۰٪ به‌دست آمده که با توجه به اصلاح ضرایب نرخ احتراق متان و شرایط مرزی نسبت به مدل‌سازی جدیری و همکاران (خطای ۴۰٪) نتایج دقیق‌تری به‌دست آمده است.

پس از اعتباربخشی به مدل عددی، نسبت به شبیه‌سازی مشعل تشعشعی با هندسه‌ای مشابه با مشعل خریداری شده مطابق با جدول ۱ اقدام به‌عمل آمد.

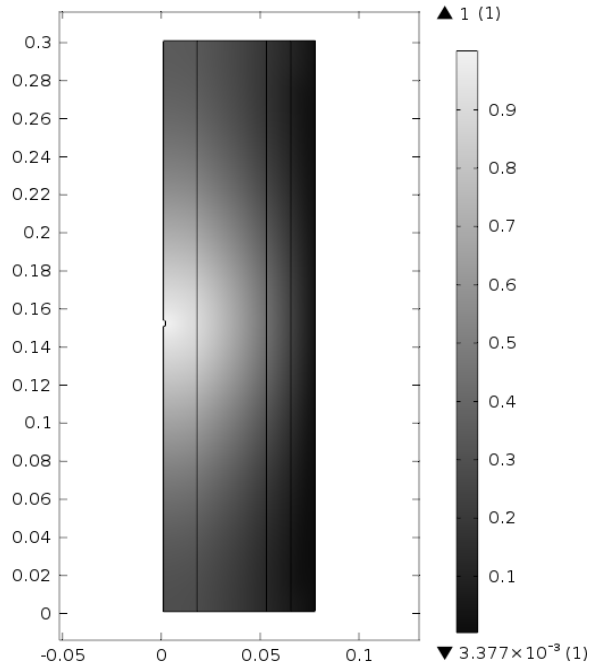


شکل ۸ توزیع دمای به‌دست آمده مطابق با هندسه جدیری و همکاران در دبی گاز ۱/۷۸ g/min

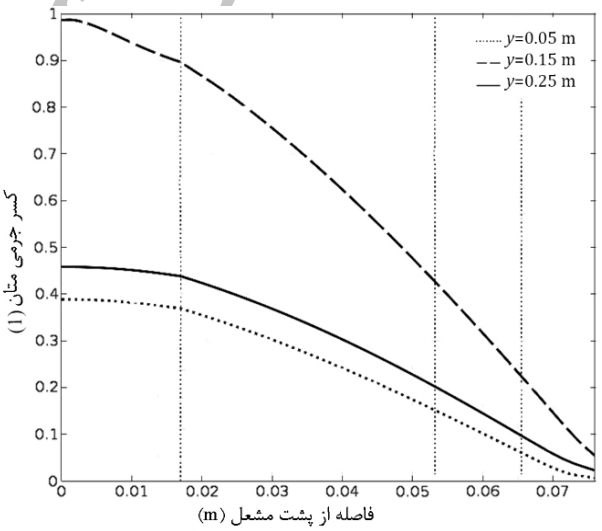


شکل ۹ اعتبارسنجی بازده احتراق به‌دست آمده از مدل‌سازی

www.SID.ir



شکل ۱۰ توزیع کسر جرمی متان در مشعل تشعشعی کاتالیستی با دبی گاز ۴.۹۳ lit/min

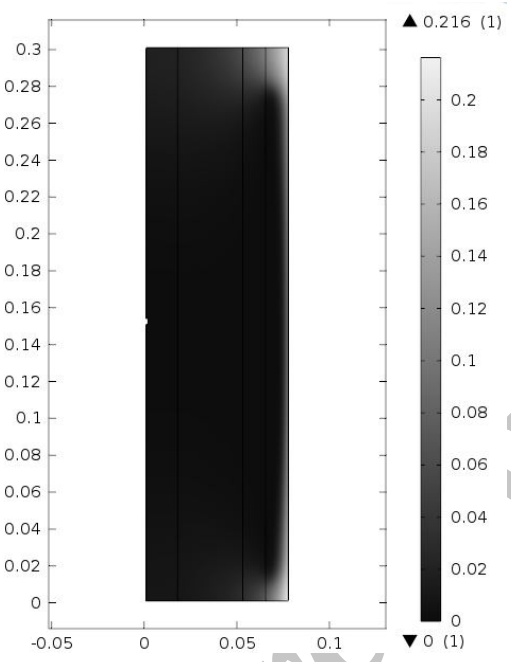


شکل ۱۱ کسر جرمی متان بر حسب فاصله از پشت مشعل تشعشعی کاتالیستی با دبی گاز ۴/۹۳ lit/min

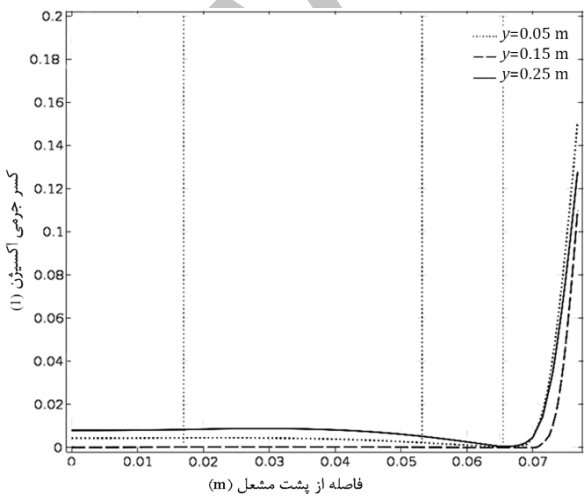
شکل ۱۰، توزیع کسر جرمی متان و شکل ۱۱ روند تغییرات آن را در سه ارتفاع در عمق مشعل نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود کسر جرمی متان در وسط مشعل (محل ورود سوخت به سیستم) بیشینه مقدار خود را داراست و با حرکت به سمت بالا و پایین مشعل، مقدار آن کاهش می‌یابد. شکل ۱۲ توزیع کسر جرمی اکسیژن و شکل ۱۳ روند تغییرات آن را در سه ارتفاع در عمق مشعل نشان می‌دهد. مشاهده می شود که اکسیژن در ناحیه وسط مشعل بیشتر از اکسیژنِ بالا و پایین آن در لایه کاتالیستی مصرف شده است.

با مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۳ مشاهده می‌شود که در نواحی وسط مشعل، کسر جرمی متان به حدی زیاد است که علی‌رغم مصرف تمامی اکسیژنِ نفوذ کرده در وسط مشعل، اکسیژن کافی برای مصرف کل متان وجود ندارد و مقدار اضافی متان، بدون این‌که در واکنش احتراق شرکت کند، از سیستم خارج می‌شود. به این پدیده که به دلیل عدم جذب مولکول‌های سوخت بر سطوح فعال کاتالیست است، اصطلاحاً لغزش متان[1] گفته می‌شود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مهم‌ترین عامل محدودکننده ظرفیت مشعل‌های نفوذ متقابل، محدودیت انتقال جرم اکسیژن به داخل لایه کاتالیستی است. این امر به دلیل مقاومت‌های انتقال جرم موجود در برابر نفوذ اکسیژن از لایه مرزی تشکیل شده روی سطح پنل و حفرات کاتالیستی است.

شکل ۱۴، نرخ احتراق متان را بر حسب عمق در سه ارتفاع مختلف از پایین مشعل نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار نرخ احتراق در وسط مشعل بیشتر بوده و در پایین و بالای مشعل از مقدار آن کاسته می‌شود. دلیل این رفتار وجود متان بیشتر در وسط مشعل و بالا بودن دما به حد کافی برای مصرف تمامی اکسیژن نفوذ کرده در این ناحیه است. این در حالی است که در بالا و پایین مشعل علی‌رغم وجود میزان اکسیژن کافی، با توجه به کاهش دما به دلیل انتقال حرارت با محیط اطراف، نرخ احتراق کاهش یافته است.



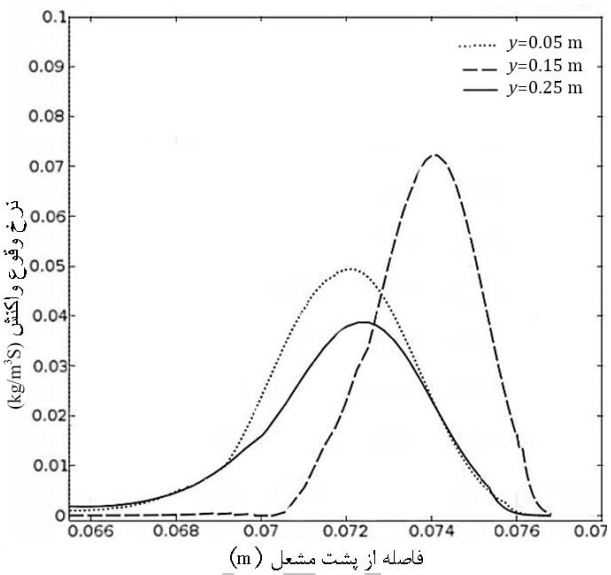
شکل ۱۲ توزیع کسر جرمی اکسیژن در مشعل با دبی گاز ۴/۹۳ lit/min



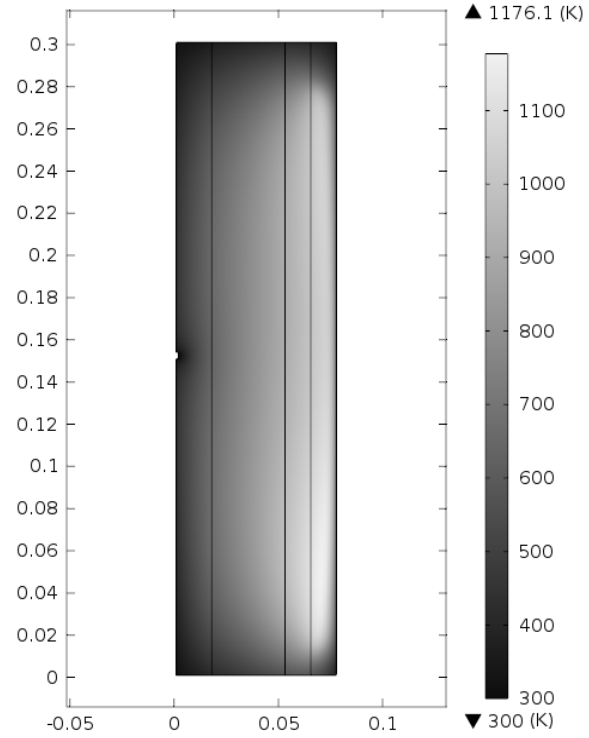
شکل ۱۳ کسر جرمی اکسیژن بر حسب فاصله از پشت مشعل در دبی گاز ورودی ۴/۹۳ lit/min

1- Methane slippage

www.SID.ir

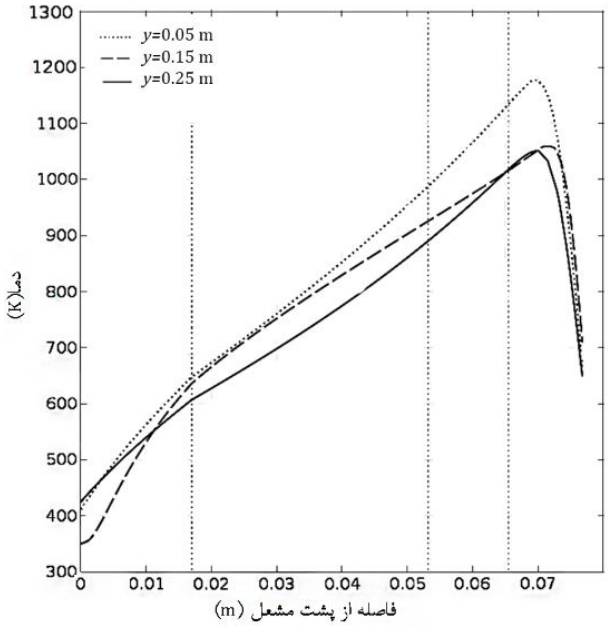


شکل ۱۴ نرخ احتراق متان بر حسب فاصله از پشت مشعل در دبی گاز ورودی ۴/۹۳ lit/min



شکل ۱۵ توزیع دمای مشعل تشعشعی کاتالیستی در دبی گاز ۴/۹۳ lit/min

شکل ۱۵، توزیع دمای مشعل تشعشعی کاتالیستی را به‌ازای دبی گاز ۴/۹۳ lit/min و شکل ۱۶ نیز منحنی تغییرات دما در سه ارتفاع مختلف از پایین مشعل کاتالیستی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که دما در لایه کاتالیستی که در آن احتراق انجام می‌شود، افزایش یافته است و مقدار بیشینه خود را در داخل لایه کاتالیست در قسمت تحتانی مشعل کسب می‌کند. دلیل این امر تغییرات متناظر نرخ وقوع واکنش است. همچنین محل ایجاد نقطه بیشینه دما، نیز متناظر با نرخ واکنش در وسط مشعل به سطح نزدیک‌تر بوده و در پایین و بالا از سطح فاصله بیشتری می‌گیرد. در نزدیکی سطح خروجی مشعل نیز به دلیل وجود انتقال حرارت جابه‌جایی، تشعشعی و نیز انتقال حرارت ناشی از انتقال جرم، دمای سطح مشعل کاهش می‌یابد.



شکل ۱۶ تغییرات دما بر حسب فاصله از پشت مشعل در دبی گاز ۴/۹۳ lit/min

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی عملکرد مشعل تشعشعی کاتالیستی جریان متقابل پرداخته شد. برای این منظور شبیه‌سازی عددی دوبعدی به روش المان محدود از یک مشعل تجاری انجام شده و نتایج با مقادیر تجربی و عددی منتشر شده در ادبیات فن مقایسه شد. برای اولین بار در ادبیات فن، با اعمال شرایط مرزی معادلات انرژی و انتقال گونه‌ها به‌صورت دقیق‌تر، دقت مدل عددی از مشعل تشعشعی نفوذ متقابل به میزان ۱۰٪، بهبود داده شد. در این مدل‌سازی مشاهده شد که به دلیل محدود بودن نفوذ اکسیژن به داخل مشعل، اکسیژن در داخل مشعل سریعاً در احتراق مصرف شده و موجب ایجاد محدودیت در نرخ احتراق و ظرفیت تولید حرارت مشعل می‌شود. همچنین نشان داده شد که به دلیل وجود انتقال حرارت در دیواره بالایی و پایینی مشعل و کاهش دما در این نواحی، نرخ احتراق در مناطق مذکور کاهش یافته که این امر منجر به عدم واکنش کامل سوخت و مصرف اکسیژن در این نواحی می‌شود.

۶- فهرست علائم

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت($Jkg^{-1}K^{-1}$)
D	ضریب پخش گونه ها(m^2s^{-1})
E	انرژی فعال‌سازی($Jmol^{-1}$)
Gr	عدد گراشف (۱)
h_{mass}	ضریب انتقال جرم(kgm^{-3})
j	فلاکس جرمی نسبی($kgm^{-3}s^{-1}$)
k	ضریب پیش نمایی(kgm^3s^{-1})
K	رسانش حرارتی($Wm^{-1}K^{-1}$)
M	کسر مولی گونه ها($kgmol^{-1}$)
Nu	عدد ناسلت(۱)
p	فشار($kgm^{-1}s^{-2}$)
pr	عدد پرانتل(۱)
Q	چشمه حرارتی(Wm^{-3})

www.SID.ir
Archive of SID

r	نرخ تولید گونه($kgm^{-3}s^{-1}$)	
R	ثابت جهانی گازها($Jkmol^{-1}K^{-1}$)	
Ra	عدد رایلی(۱)	
Sh	عدد شروود(۱)	
T	دمای مطلق(K)	
u	سرعت(ms^{-1})	
w	کسر جرمی گونه ها(۱)	
w_{mol}	کسر مولی گونه ها(۱)	
y	ارتفاع(m)	

علایم یونانی

ε_p	نفوذپذیری(m^{-2})	
ε_r	ضریب صدور	
μ	لزجت دینامیکی($kgm^{-1}s^{-1}$)	
ρ	چگالی(kgm^{-3})	
σ	ثابت استفان بولتزمن($Js^{-1}m^{-2}K^{-4}$)	
φ	ضریب تخلخل	

زیرنویس‌ها

i	اندیس گونه‌های موجود در سیستم	
L	طول دیواره(m)	
m	مخلوط گاز	

۷- مراجع

[1] L.D. Pfefferle, W.C. Pfefferle, Catalysis in Combustion, *Catal.Rev0-SCI.ENG*, No. 29, pp. 219-267, 1987.

[2] D.L.Trimm, Chi-Wai Lam, The combustion of methane on platinum-alumina fiber ctalysts-I, *chemical engineering science*, No. 35, pp. 1405-1413, 1980.

[3] D.L.Trimm, Chi-Wai Lam, The combustion of methane on platinum-alumina fiber ctalysts-II, *chemical engineering science*, No. 35, pp. 1731-1739, 1980.

[4] C.M. Ablow, Hiroki Sadamori, Analytical model of combustion in a catalytic fiber-mat burner, *combustion science and technology*, No. 5, pp. 1-21, 1987.

[5] N. Jodeiri, J.P.Mmbaga, L.Wu, S.E.Wanke, R.E. Hayes, modeling a counter-diffusive reactor for methane combustion, *Computers and chemical engineering*, No. 39, pp. 47-56, 2012.

[6] Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O'Connell, *The properties of gases and liquids*, 5th Ed. pp.10.30-10.35, McGRAW-HILL, 2001.

[7] Hayes, R.E.& Kolaczkowski, *Introduction to catalytic combustion*, pp. 120-155, Gordon and Breach Science, Amsterdam, 1997.

[8] Seyed Ali Shahamiri, Ida Wierzba, Modeling the reactive processes within a catalytic porous medium, *Applied mathematical modeling*, No. 35, pp. 1915-1925, 2011.

[9] D.A. Nield, A. Bejan, *Convection in Porous Media*, 3rd Ed. pp. 110-154, Springer, New York, 2006.

[10] Kreith, F. Bohn, A.S. *principals of heat transfer*, 5th Ed. pp. 80-121, Pacific grove Brooks, 1993.

[11] F.P. Incropera and D.P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th Ed. John Wiley & Sons, 2002

[12] R.Byron Bird, Warren E.Stewart, Edwin N.Lightfoot, *Transport Phenomena*, 2nd Ed. pp. 679-687, John Wiley & Sons, 2006.

Archive of SID

www.SID.ir