

شبیه‌سازی سه بعدی پنل تشعشعی کاتالیستی با فرض برابری شروود و ناسلت روی سطح پنل

سید مصطفی حسینعلی پور^{۱*}، مسعود مددالهی^۲، آروین بهروان^۳، محمدمهدی نمازی^۴
تهران، خیابان هنگام، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، مرکز CAE و آزمایشگاه CFD
(* نویسنده مخاطب: alipour@iust.ac.ir)

چکیده

در تحقیق حاضر به منظور مطالعه عملکرد پنل‌های تشعشعی کاتالیستی، یک مدل عددی سه بعدی از یک پنل تجاری تولید شده است. در شبیه‌سازی سه بعدی و پایای پنل، معادلات بقای مومنتم در محیط متخلخل و غیر متخلخل، معادله بقای انرژی و معادله بقای گونه‌ها به روش المان محدود حل شده‌اند. به منظور استخراج شرایط مرزی مناسب برای معادله انرژی در سطح جلویی پنل، جریان سیال عبوری روی یک سطح متخلخل مدل‌سازی شده و نشان داده شد که می‌توان از روابط تجربی جابجایی طبیعی روی یک سطح عمودی استفاده نمود. همچنین به منظور تعیین شرط مرزی معادله بقای گونه‌ها بر روی سطح کاتالیست، از فرض برابری عدد ناسلت و شروود استفاده شده است. در این پژوهش نشان داده شد که نفوذ اکسیژن از سمت مقابل پنل به لایه کاتالیستی به عنوان عامل محدودکننده در فرآیند احتراق کاتالیستی می‌باشد. همچنین شرایط مرزی روی سطح پنل و نیز ضرایب نرخ احتراق نسبت به مطالعات پیشین موجود در ادبیات فن تصحیح گردید. جهت اعتبارسنجی مدل عددی از مقادیر اندازه‌گیری شده دمای سطح و بازده احتراق یک نمونه تجاری از مشعل‌های تشعشعی کاتالیستی استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی سازگاری خوبی با نتایج اندازه‌گیری شده نشان داد، به گونه‌ای که دما حاصل از مدل‌سازی در خط عمودی وسط پنل با خطایی برابر با ۱۰٪ محاسبه شده است. جنبه دیگر اعتبار سنجی نتایج، بازده احتراق به دست آمده از مدل‌سازی بوده که خطایی برابر با ۲۰٪ اندازه‌گیری گردید.

واژه‌های کلیدی: مشعل تشعشعی کاتالیستی- شبیه‌سازی عددی- انتقال حرارت- محیط متخلخل- نفوذ اکسیژن

۱- مقدمه

در احتراق کاتالیستی با استفاده از کاتالیست فلزات نجیب مانند پلاتینوم 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. واکنش احتراق کاتالیستی بدون شعله در مشعل‌های تشعشعی باعث تولید انرژی تابشی از سطح مشعل می‌گردد. در شکل ۱ اجزاء مختلف یک مشعل تشعشعی کاتالیستی 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 می‌نماید، به لایه کاتالیستی می‌رسد. اکسیژن نیز از سمت مقابل مشعل بعد از عبور از لایه مرزی ایجاد شده روی کاتالیست، به داخل آن نفوذ کرده و با سوخت واکنش می‌دهد. المنت الکتریکی نقش تامین‌کننده انرژی فعال‌سازی را دارد و بعد از شروع واکنش از مدار خارج می‌گردد.

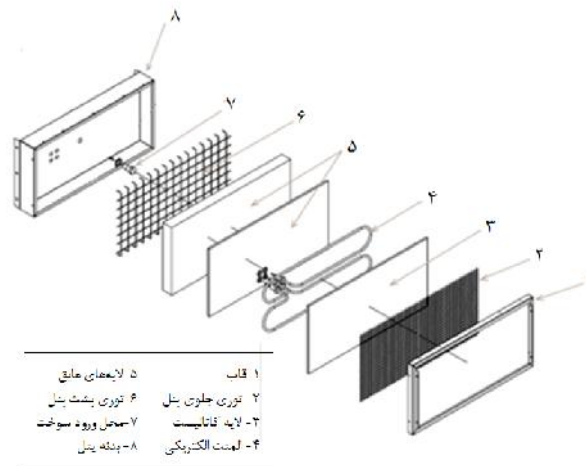
۱- دانشیار، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

احتراق کاتالیستی برای اولین بار توسط آزمایشات دیوی (Davy) کشف شد. در آزمایش وی نشان داده شد که رشته‌های پلاتین می‌توانند مخلوط قابل اشتعال سوخت و هوا را بدون شعله و با مقدار قابل توجهی شار تشعشی از سطوح داغ کاتالیست محترق نمایند [۱]. در مطالعه بعدی واکنش اکسیداسیون متان روی کاتالیست پلاتینیوم بر پایه فیبر آلومینا در یک مشعل کاتالیستی توسط تریم (Trim) و لام (Lam) به صورت تجربی ارزیابی گردید. در مطالعه آن‌ها، دی‌اکسید کربن و آب تنها محصولات قابل ردیابی واکنش بودند [۲]. ایشان سپس مدل یک‌بعدی مشعل مذکور را نیز مورد بررسی قرار داده و مشاهده نمودند که تولید حرارت به نرخ واکنش شیمیایی وابسته است و افزایش در نرخ متان ورودی ممکن است موجب 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 گردد [۳].



شکل ۱- اجزای مختلف یک مشعل تشعشی کاتالیستی

ابلو (Ablow) و ساداموری (Sadamori) به منظور مطالعه جریان پایا در یک مشعل احتراق کاتالیستی یک مدل تحلیلی ارائه نمودند. مدل به دست آمده، تنها وابستگی ضرایب انتقال به دما را در نظر گرفته و از وابستگی آن‌ها به غلظت گونه‌ها صرف نظر کرده بود. همچنین در این مدل‌سازی، جابجایی طبیعی روی سطح مشعل با روش اختلاف محدود پیاده‌سازی شد. نتایج به دست آمده در قسمت پروفیل‌های دمایی تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان داده ولی نتایج مربوط به غلظت گونه‌ها چندان دقیق گزارش نشد [۴]. در مطالعه دیگری که توسط هیس (Hayes) و جدیری (Jodeiri) انجام گرفت، یک مشعل تشعشی کاتالیستی با استفاده از روش المان محدود شبیه‌سازی شد. در مطالعه ایشان، برای بررسی احتراق در مشعل، از سینتیک کلی استخراج شده توسط تریم و لام استفاده شد [۵]. مطالعه مذکور اولین شبیه‌سازی دوبعدی مشعل‌های تشعشی می‌باشد که با اشکالاتی همراه بوده که در مطالعه حاضر تلاش شده است، تا برخی از آن‌ها اصلاح گردد.

در تحقیق حاضر به بررسی عملکرد مشعل تشعشی کاتالیستی نفوذ متقابل پرداخته شده است. مدل ایجاد شده به صورت مرحله به مرحله گسترش داده شده است. ابتدا برای اعمال شرایط مرزی مناسب روی سطح خروجی مشعل، نسبت به استخراج 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 مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه نسبت به تولید مدل نهایی سه‌بعدی مشعل تشعشی کاتالیستی با استفاده از نرم افزار کامسول (COMSOL Multiphysics 2013) و حل عددی معادلات انتقال مومنتم، حرارت و بقای گونه‌ها به روش المان محدود اقدام به عمل آمد. به منظور مطالعه نحوه

عملکرد مشعل تشعشی کاتالیستی، یک نمونه تجاری از این سیستم‌ها جهت مدلسازی عددی و اندازه‌گیری تجربی دمای سطح و بازده احتراق خریداری شد. مشعل مورد استفاده در این پژوهش، دارای مشخصات مندرج در جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات مشعل تشعشی تجاری

توضیحات	پارامتر
WX12X24	مدل
۱۰۰۰۰ BTUH	ظرفیت مشعل
۱۲ V	ولتاژ راه‌اندازی
۳۰ A	جریان الکتریکی مورد نیاز
گاز طبیعی	سوخت مصرفی
۰/۰۷۸×۰/۳×۰/۶ m ³	ابعاد کلی مشعل
۴/۹۳ lit/min	دبی سوخت ورودی

۲- معادلات حاکم

۱-۲- معادله حاکم بر جریان سیال

با توجه به ساختار مشعل‌های تشعشی کاتالیستی، سیال در داخل مشعل در دو محیط متخلخل و غیرمتخلخل و به صورت آرام جاری می‌شود. معادله جریان حاکم در محیط غیر متخلخل معادله ناویر استوکس^۱ به صورت (۱) بوده و معادله‌ای که جهت تخمین رفتار سیال در محیط متخلخل به کار برده شده است، معادله برینکمن^۲ است که توسعه یافته معادله داریسی در محیط‌های متخلخل می‌باشد و به صورت (۲) بیان می‌شود.

$$\nabla \cdot [-pI + \sim(\nabla u + (\nabla u)^T)] - \dots(u \cdot \nabla)u = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot [-pI + \frac{\sim}{\rho}(\nabla u + (\nabla u)^T)] - \frac{2\sim}{3\rho}(\nabla u)I] - \frac{\sim}{\nu_p}u = 0 \quad (2)$$

به منظور محاسبه ویسکوزیته مخلوط‌های چندجزئی از تئوری چپمن-انسکاگ^۳ به صورت رابطه (۳) استفاده شده است.

$$\sim_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sim_i}{\sum_{j=1}^n y_j \times \{_{ij}} \quad (3)$$

روش‌های مختلفی برای تخمین پارامتر $\{_{ij}$ وجود دارد. در اینجا از روش تقریب وایک^۴ استفاده می‌گردد. وایک با استفاده از تئوری سینتیک سادرلند^۵ به نتیجه زیر رسید.

$$\{_{ij} = \frac{[1 + (\frac{\sim_i}{\sim_j})^2 (\frac{M_j}{M_i})^4]^{\frac{1}{2}}}{[8 \times (1 + \frac{M_i}{M_j})]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

¹ Navier-Stokes equations

² Brinkman

³ Chapman-Enskog

⁴ Wilke's Approximation

⁵ Sutherland's Kinetic theory

۲-۲- معادله بقای انرژی

به منظور بررسی انتقال حرارت در مشعل تشعشی می‌بایست معادله انرژی را در محیط متخلخل و غیرمتخلخل حل نمود. محیط متخلخل در این پژوهش به صورت همگن و ایزوتروپ فرض شده و از اثرات تشعشع در آن صرف نظر گردیده است. همچنین فرض شده است که در محیط متخلخل تعادل حرارتی محلی^۱ وجود دارد به طوری 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.

$$\left(\dots C_p\right)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\dots C_p\right)_f u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T) + Q \quad (5)$$

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

$$C_p = \tilde{S}_1 C_{p,1} + \tilde{S}_2 C_{p,2} + \tilde{S}_3 C_{p,3} + \dots = \sum_i \tilde{S}_i C_{p,i} \quad (6)$$

ضریب رسانش مخلوط از رابطه واسیلجوا^۲ 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 شده است و در سایر بخش‌ها مقدار آن صفر در نظر گرفته شده است.

$$Q = -r \times \Delta H_{CH_4} \quad (7)$$

مقدار ΔH_{CH_4} نشان‌دهنده آنتالپی احتراق متان است و به صورت (۸) در نظر گرفته می‌شود [۷].

$$\Delta H_{CH_4} = -806.9 + 1.586e - 2 \times T - 8.485e - 6 \times T^2 - 3.963e - 9 \times T^3 + 2.16e - 12 \times T^4 \quad (8)$$

۳-۲- معادله بقای گونه

رابطه پیوستگی برای گونه i در مشعل به صورت معادله (۹) و (۱۰) در نظر گرفته شده است. این رابطه با فرض پایا بودن سیستم و استفاده از مدل نفوذ فیک^۳ برای تخمین فلاکس جرمی در مشعل در نظر گرفته شده است.

$$\nabla \cdot j_i + \dots (u \cdot \nabla) w_i = r_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (9)$$

$$j_i = -\dots D_{i,m} \nabla w_i \quad (10)$$

همچنین به دلیل آن که فیبرهای موجود در مشعل بسیار نازک هستند و نرخ جریان گاز پایین است، این انتظار وجود دارد که اختلاف غلظت و دما در عبور از مرز مشترک سیال-جامد در ساختار متخلخل و فیبری 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، به جای استفاده از سینتیک جزئی احتراق متان روی کاتالیست پلاتینیوم بر پایه فیبر آلومینا، از سینتیک کلی استفاده نمود [۳]. برای این منظور از نتایج مطالعه تجربی تریم و لام استفاده شده و رابطه سینتیک کلی به صورت رابطه (۱۱) در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که استفاده از مکانیزم سینتیک کلی نیازمند بهره‌مندی از اطلاعات تجربی می‌باشد در حالی که استفاده از مکانیزم جزئی نیازی به اطلاعات تجربی قبلی ندارد. در شرایط عملکردی مشابه می‌توان از مکانیزم سینتیک کلی به منظور پیش‌بینی پارامترهای عملکردی سیستم با استحصال دقت قابل قبول استفاده نمود [۸].

$$r_{CH_4} = -k \times \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \times w_{mol_{CH_4}}^a \times w_{mol_{O_2}}^b \quad (11)$$

¹ Local thermal equilibrium

² Wassiljewa

³ Fick's law

در این رابطه در دمای بحرانی ۸۱۳ کلوین، ثوابت رابطه عوض می‌شوند. بنابراین سینتیک کلی زیر را برای احتراق کاتالیستی متان در این مشعل در نظر گرفته شد.

$$T < 813K \Rightarrow r_{CH_4} = -k_{LT} \times \exp\left(\frac{-1.87e5}{RT}\right) \times w_{mol_{CH_4}} \times w_{mol_{O_2}}^{0.75} \quad (12)$$

$$T > 813K \Rightarrow r_{CH_4} = -k_{HT} \times \exp\left(\frac{-8.61e4}{RT}\right) \times w_{mol_{CH_4}} \times w_{mol_{O_2}} \quad (13)$$

ضرایب پیش‌نمایی در مطالعه جدیری و همکاران، به ترتیب $1.67e12 \frac{kgCH_4}{m^3R.s}$ و $7.72e5 \frac{kgCH_4}{m^3R.s}$ ذکر شده اند، به جای ضرایب مولی از ضرایب جرمی استفاده کرده و دمای بحرانی نیز ۸۱۷ کلوین در نظر گرفته شده بود. این امر باعث ایجاد خطا در نتایج مدل‌سازی ایشان گردیده است که تصحیحات تمامی این موارد در پژوهش حاضر مد نظر قرار گرفته است [۵].

۳- شرایط مرزی

در معادله بقای مومنتوم، شرایط مرزی برای نازل ورودی، با توجه به میزان مصرف سوخت مشعل، شرط سرعت ثابت اعمال گردید. همه مرزهای دیگر بدون لغزش فرض شدند، به جز مرز خروجی (سطح کاتالیست) که به صورت فشار ثابت ($p = 101325(Pa)$) در نظر گرفته شده است.

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

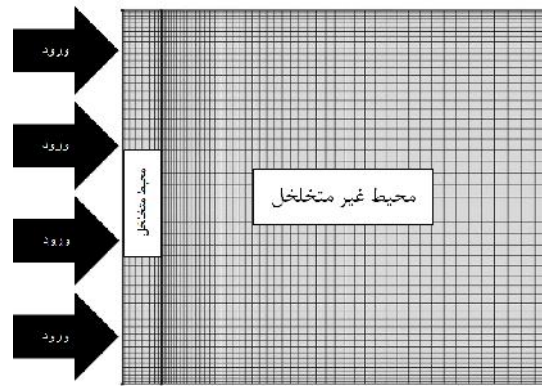
$$-n \cdot (-K \nabla T) = q \quad (14)$$

برای محاسبه q باید عدد ناسلت برای دیواره‌ها محاسبه گردد. در مراجع، دو رابطه (۱۵) و (۱۶)، برای محاسبه ضریب جابجایی طبیعی روی سطح عمودی ارائه شده‌اند [۹].

$$Nu_y = 0.503 \times \left[\frac{Pr}{Pr + 0.986 Pr^{0.5} + 0.492} \right]^{0.25} Ra_y^{0.25} \quad (15)$$

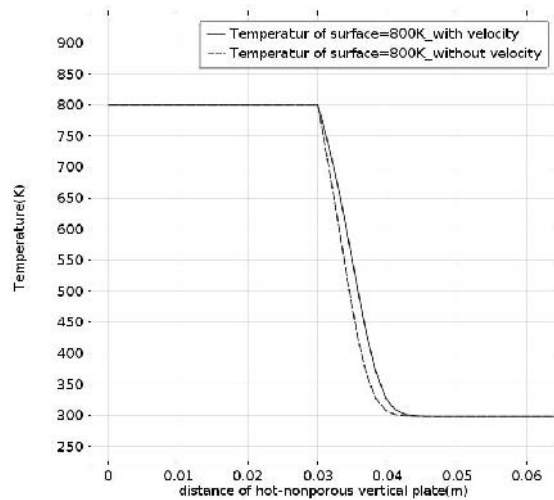
$$Nu_y = 0.508 \times Pr^{0.5} \times (0.952 + Pr)^{0.25} Gr_y^{0.25} \quad (16)$$

به منظور انتخاب معادله مناسب برای استفاده به عنوان شرط مرزی جابجایی در مرز خروجی مشعل با توجه به متخلخل بودن سطح مورد نظر، یک محیط متخلخل با ابعاد مشابه مشعل موجود (ارتفاع $0.3m$) با سه دمای ثابت $T = 500, 800, 1100K$ که در محیط با دمای T_∞ ($T > T_\infty$) قرار گرفته است، مدل‌سازی شد. دماهای سطح به گونه‌ای انتخاب شده است که در محدوده دمای سطح مشعل باشد. هندسه مورد استفاده در تحلیل حاضر در شکل ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به خروج محصولات احتراق از سطح مشعل با سرعت کم، در دو حالت با فرض ورود سیال از سمت چپ محیط متخلخل با سرعت و بدون سرعت ورودی نسبت به محاسبه عدد ناسلت روی سطح محیط متخلخل و مقایسه آن با دو رابطه تجربی فوق اقدام به عمل آمد. منطقه در نظر گرفته شده در مدل‌سازی به گونه‌ای شبکه‌بندی گردید که در نزدیکی سطح، شبکه کوچکتر از سایر مناطق باشد، چرا که گرادیان دما و سرعت بیشتری در این منطقه وجود دارد.

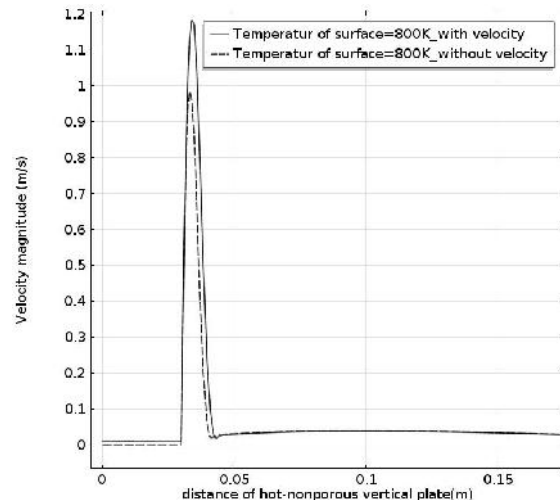


شکل ۲- هندسه مدل شده و شبکه بندی ایجاد شده در این مرحله

شکل ۳- الف پروفیل سرعت را در ارتفاع ۰/۲۵ متر، بدون در نظر گرفتن و با در نظر گرفتن سرعت تحمیلی ورودی در دمای سطح ۸۰۰ کلوین نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، دو پروفیل سرعت بسیار شبیه به هم هستند؛ بنابراین تحمیل سرعت ورودی با در بخش محیط متخلخل با توجه به دبی کم آن، تاثیر قابل توجهی بر روی توزیع سرعت در جلوی منطقه مورد بررسی نخواهد داشت. به علت شباهت پروفیل‌های سرعت، انتظار می‌رود که پروفیل‌های دما نیز با هم مشابه باشند؛ این امر در شکل ۳-ب نشان داده شده است. این رفتار در دمای محیط متخلخل برابر با ۵۰۰ و ۱۱۰۰ کلوین نیز به صورت مشابه تکرار شد.



(ب)



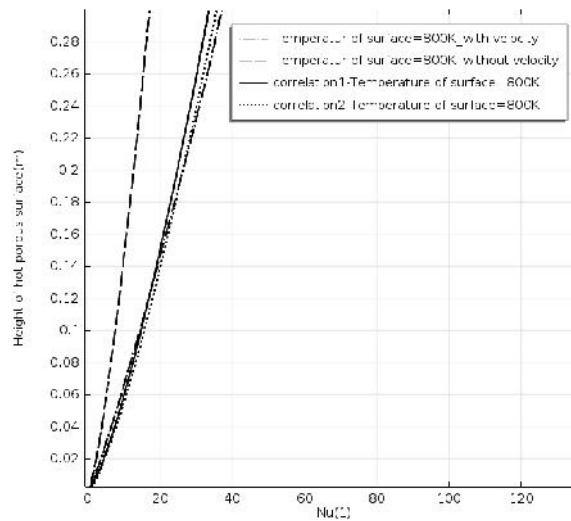
(الف)

شکل ۳- پروفیل سرعت و دما روی محیط متخلخل با دمای ۸۰۰ کلوین در ارتفاع ۰/۲۵ متر (بدون و با در نظر گرفتن سرعت تحمیلی ورودی)

به منظور استخراج Nu_y روی سطح مشعل، شار حرارتی عبوری از سطح، طبق رابطه (۱۷) از مدل‌سازی به دست آمده و سپس عدد ناسلت از آن استخراج گردید.

$$q_y = \frac{K \times Nu_y}{y} (T_s - T_\infty) \quad (17)$$

مقایسه مقدار عدد Nu_y به دست آمده از نتایج مدل سازی و روابط (۱۵) و (۱۶) در سه دمای سطح ۵۰۰، ۸۰۰ و ۱۱۰۰ کلوین به دست آورده شد. همان طور که در شکل ۴ نیز مشخص است، در حالت بدون سرعت ورودی رابطه (۱۶) نتایج دقیق تری را به دست می دهد. این در حالی است که با سرعت ورودی رابطه (۱۶) نتایج دقیق تری را به دست می دهد. بنابراین در شبیه سازی مشعل، از رابطه (۱۶) به عنوان بخشی از شرایط مرزی حرارتی برای سطوح عمودی در ادامه این تحقیق استفاده شده است.



شکل ۴- مقایسه عدد ناسلت برای دمای سطح برابر با ۸۰۰ کلوین از مدل سازی و دو رابطه تجربی

برای شرط مرزی در سطوح داغ افقی رو به بالا (بالای مشعل تشعشعی) و رو به پایین (پایین مشعل تشعشعی) نیز به ترتیب از روابط (۱۸) و (۱۹) استفاده شده است.

$$\overline{Nu}_L = 0.15 Ra_L^{\frac{1}{3}} \quad (18)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.27 Ra_L^{0.25} \quad (19)$$

در مرز خروجی q فلاکس حرارتی کل خروجی از سطح مشعل توسط رابطه (۲۰) تخمین زده می شود. 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 جابجایی طبیعی روی سطح مشعل می باشد که جهت محاسبه آن از رابطه (۱۶) استفاده شده است و ترم سوم مربوط به تشعشع خارج شده از سطح مشعل به محیط اطراف می باشد. مقدار فرض شده برای ضریب صدور سطح برابر با 0.6 و دمای سیال در فواصل دور از سطح برابر با 300 کلوین در نظر گرفته شده است.

$$q = -...C_p u (T - T_\infty) - \frac{K \times Nu_y}{y} (T_s - T_\infty) - v_r \uparrow (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (20)$$

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

$$n \cdot N_i = N_o \quad (21)$$

$$N_o = -h_{mass,i} (w_r - w_\infty) - ...uw_\infty \quad (22)$$

که در آن:

$$N_i = -j_i + \dots w_i u \quad (23)$$

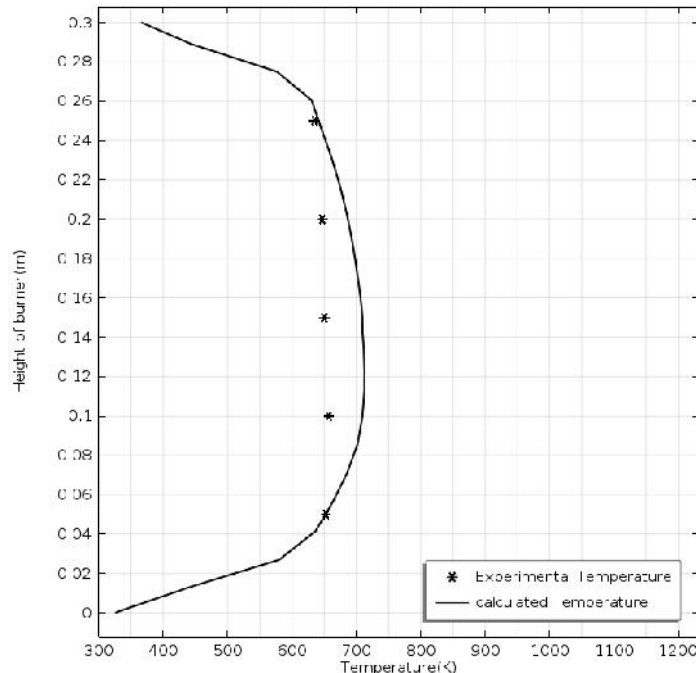
ترم اول در معادله (۲۲) فلاکس نفوذی و ترم دوم فلاکس جابجایی گونه‌ها را نشان می‌دهد که در مدل‌سازی‌های انجام شده قبلی در نظر گرفته نشده است. در این رابطه، ضریب انتقال جرم گونه i و w_∞ نیز جزء جرمی همان گونه در فاصله‌ای دور از مرز خروجی است که برای CH_4, H_2O, CO_2 برابر صفر و برای O_2, N_2 به ترتیب برابر 0.1767 و 0.2333 می‌باشد. ضریب انتقال جرم برای گونه i ، توسط رابطه (۲۴) محاسبه شده است.

$$h_{mass,i} = \frac{D_{i,m} \times SH}{y} \quad (24)$$

که در آن $D_{i,m}$ بیانگر ضریب پخش گونه i در مخلوط و y نیز نشان دهنده ارتفاع مشعل می‌باشد. عدد شرود نیز بر اساس آنالوژی انتقال حرارت و جرم، برابر با عدد ناسلت روی سطح مشعل قرار داده شده است [۱۰].

۴- نتایج

با بکارگیری شرایط مرزی به دست آمده و اعمال آن‌ها در حل معادلات توضیح داده شده، برای اولین بار در ادبیات فن، مدل سه بعدی مشعل تشعشعی کاتالیستی بدون در نظر گرفتن هوای جلوی آن تولید گردید. برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده در شبیه‌سازی، پروفیل دما حاصل از شبیه‌سازی، با نتایج تجربی مقایسه شد. شکل ۵ اعتبارسنجی نمودار دما روی سطح مشعل روی خط عمودی در فاصله 0.3 متر از لبه سمت راست مشعل را نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، نتایج مدل‌سازی سازگاری قابل قبولی با نتایج اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد به گونه‌ای که حداکثر میزان خطا در خط عمودی در وسط مشعل برابر با 10% به دست آمده است.

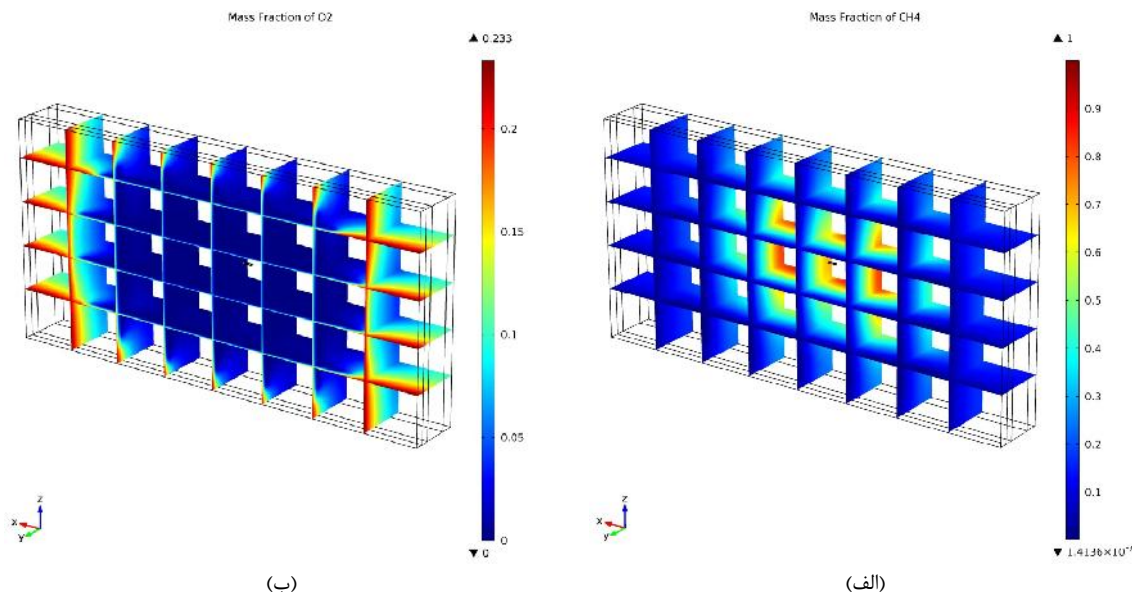


شکل ۵- تغییرات دما بر حسب ارتفاع مشعل در فاصله 0.3 از سمت راست (وسط طول) مشعل

بازده احتراق به دست آمده از مدل سازی که با استفاده از رابطه (۲۵) در مرز خروجی مشعل محاسبه شده است، برابر با ۶۱/۳۰٪ به دست آمد. این در حالی است که مقدار اندازه گیری شده بازده احتراق به صورت تجربی برابر با ۷۶/۷۵٪ به دست آمد که خطای برابر با ۲۰٪ را به دست می دهد.

$$y = \frac{W_{mol CO_2}}{W_{mol CO_2} + W_{mol CH_4}} = \frac{0.03636}{0.03636 + 0.02295} = 0.6130 = 61.30\% \quad (25)$$

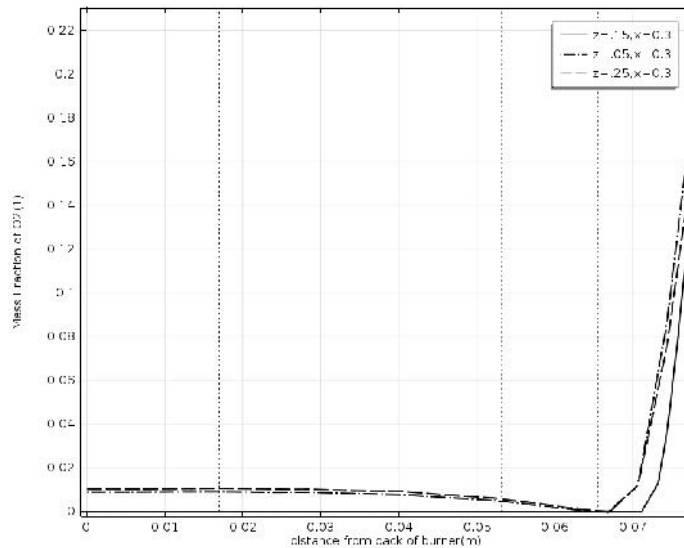
شکل ۶- الف، کانتور حجمی کسر جرمی متان را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود توزیع متان در مشعل غیر یکنواخت است به گونه ای که کسر جرمی متان در وسط مشعل که محل ورود گاز به سیستم است زیاد بوده و با فاصله گرفتن از محل ورود گاز، مقدار آن کاهش می یابد. این غیر یکنواختی در کانتور کسر جرمی اکسیژن در شکل ۶- ب نیز دیده می شود به گونه ای که اکسیژن نفوذ کرده به مشعل در قسمت مرکزی که نرخ احتراق بالاتر است، مصرف شده و موجب کاهش کسر جرمی اکسیژن می گردد، این در حالی است که با دور شدن از ناحیه مرکزی مشعل و کاهش نرخ احتراق، اکسیژن کمتری در واکنش مصرف شده و به تدریج کسر جرمی اکسیژن زیاد می شود.



شکل ۶- الف- کانتور سه بعدی کسر جرمی متان در مشعل تشعشی کاتالیستی ب- کانتور سه بعدی کسر جرمی اکسیژن در مشعل تشعشی کاتالیستی

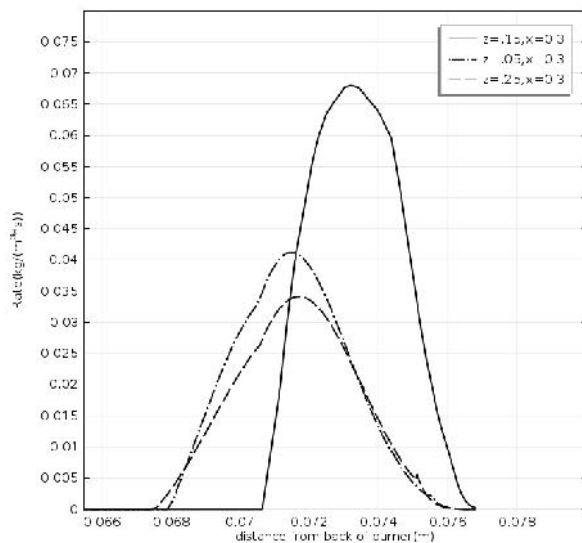
در شکل ۷ تغییرات کسر جرمی اکسیژن در فاصله ۰/۳ متر از لبه سمت راست مشعل و در عمق آن نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می گردد، اکسیژن در ناحیه مرکزی مشعل سریع تر از سایر نواحی مصرف شده است (در حالی که طبق شکل ۸- الف هنوز متان در وسط مشعل موجود است) که باعث محدود کردن احتراق در این ناحیه شده است، در نتیجه این امر متان مصرف نشده در اثر لغزش^۱ از سطح خروجی مشعل خارج می گردد.

¹ Slippage

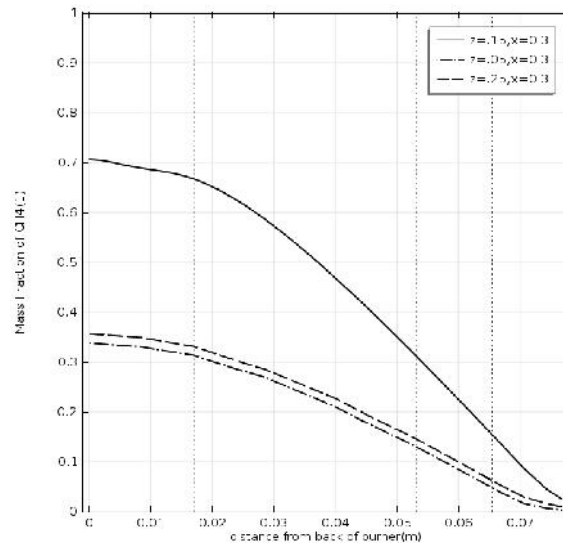


شکل ۷- نمودار کسر جرمی اکسیژن در عمق مشعل در سه ارتفاع مختلف در طول ۱/۲ مشعل

در شکل ۸- الف تغییرات کسر جرمی متان در فاصله ۰/۳ متر از لبه سمت راست مشعل و در عمق آن را نشان داده شده است. همانطور مشاهده می شود کسر جرمی متان در داخل مشعل، در ارتفاع وسط، بیشینه مقدار خود را داراست و سپس از مقدار آن در بالا و پایین مشعل کاسته می شود. در شکل ۸- ب نرخ احتراق متان بر حسب ارتفاع در فاصله ۰/۳ متر از لبه سمت راست مشعل در عمق آن نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود بیشینه مقدار نرخ احتراق در وسط مشعل رخ می دهد و در پایین و بالای مشعل از مقدار آن کاسته می شود. علت این رفتار وجود متان بیشتر در وسط مشعل و بالا بودن دما به حد کافی برای مصرف تمامی اکسیژن نفوذ کرده در وسط مشعل است. این در حالی است که در بالا و پایین مشعل، با توجه به کاهش دما، نرخ احتراق کم می شود.



(ب)

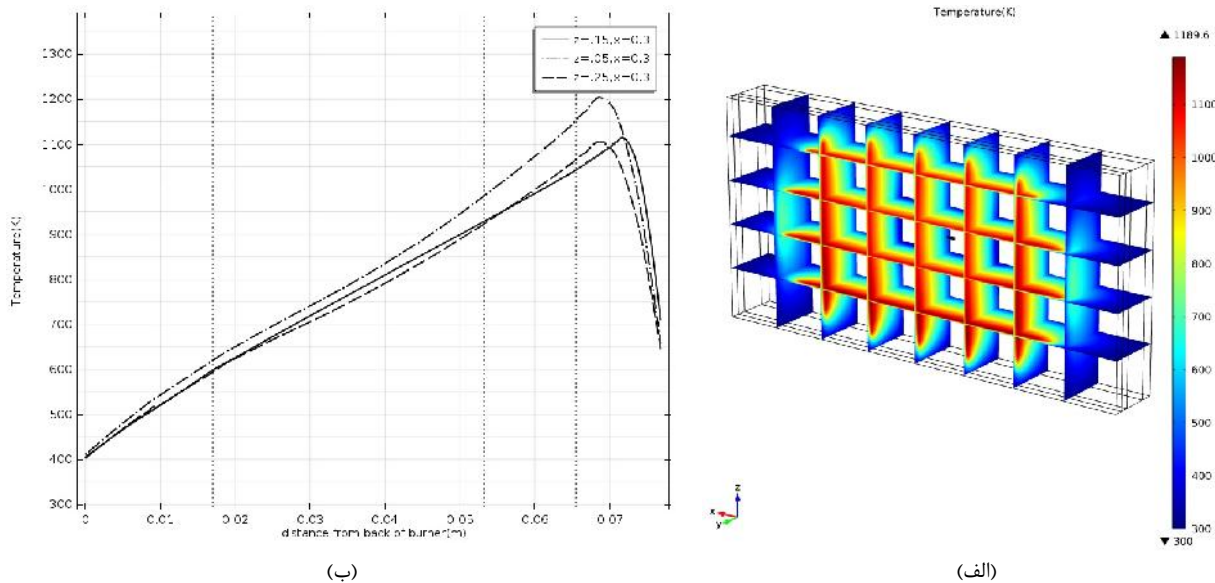


(الف)

شکل ۸- الف- نمودار کسر جرمی متان در عمق مشعل در سه ارتفاع مختلف در طول ۱/۲ مشعل ب- نمودار نرخ احتراق متان در

عمق مشعل در سه ارتفاع مختلف در طول ۱/۲ مشعل

شکل ۹- الف کانتور حجمی دمای مشعل تشعشی کاتالیستی را به ازای دبی گاز ۴/۹۳ lit/min و شکل ۹- ب نیز منحنی تغییرات دما در سه ارتفاع مختلف از پایین مشعل کاتالیستی در طول ۱/۲ مشعل به صورت عمقی، 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 صفحه $x=0.3m$ در داخل لایه کاتالیست در قسمت تحتانی مشعل کسب می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که مطابق با نمودارهای نرخ احتراق، محل ایجاد نقطه بیشینه دما، متناظر با نرخ واکنش در وسط مشعل به سطح نزدیک تر می‌باشد.



شکل ۹- الف- کانتور سه بعدی دمای مشعل کاتالیستی در داخل مشعل ب- نمودار دما در عمق مشعل در سه ارتفاع مختلف در طول ۱/۲ مشعل

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی عملکرد پنل تشعشی کاتالیستی جریان متقابل پرداخته شد. با توجه به اشتباهات متعدد در سینتیک و شرایط مرزی استفاده شده در تحقیقات قبلی انجام گرفته در این پنل‌ها، در این تحقیق، نسبت به استفاده از سینتیک واکنش کلی با ضرایب صحیح و شرایط مرزی مناسب برای معادلات حاکم اقدام به عمل آمد. برای این منظور شبیه‌سازی عددی سه بعدی از یک پنل تجاری انجام شده و نتایج با مقادیر تجربی تست پنل مقایسه گردید. اعتبارسنجی از دو دیدگاه دما و بازده احتراق موید نتایج قابل قبول از مدل تولید شده بود به گونه‌ای که خطای نمودار دمای سطح پنل در خط عمودی در وسط پنل برابر با ۱۰٪ به دست آمده است. جنبه دیگر اعتبارسنجی نتایج، بازده احتراق به دست آمده از مدل‌سازی است که خطای برابر با ۲۰٪ را به دست داد. در این مدل‌سازی مشاهده شد که به دلیل محدود بودن نفوذ اکسیژن به داخل پنل، اکسیژن در داخل پنل سریعاً در ناحیه مرکزی پنل در احتراق مصرف شده و موجب ایجاد محدودیت در نرخ احتراق و در نتیجه دمای پنل تشعشی کاتالیستی می‌شود. همچنین نشان داده شد که به علت 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 می‌گردد.



مراجع

- 1- Pfefferle, L.D., Pfefferle, W.C., *Catalysis in Combustion*, Catal.Rev0-SCI.ENG, Vol. 29(2&3), pp. 219-267, 1987.
- 2- Trimm, D.L., Lam, C.W., *The combustion of methane on platinum-alumina fiber catalysts-I*, chemical engineering science, Vol. 35, pp. 1405-1413, 1980.
- 3- Trimm, D.L., Lam, C.W., *The combustion of methane on platinum-alumina fiber catalysts-II*, chemical engineering science, Vol. 35, pp. 1731-1739, 1980.
- 4- Ablow, C.M., Sadamori, H., *Analytical model of combustion in a catalytic fiber-mat burner*, combustion science and technology, Vol. 5, pp. 1-21, 1987.
- 5- Jodeiri, N., Mmbaga, J.P., Wu, L., Wanke, S.E., Hayes, R.E., *modelling a counter-diffusive reactor for methane combustion*, Computers and chemical engineering, Vol. 39, pp. 47-56, 2012.
- 6- Poling, B.E., Prausnitz, J.M., O'Connell, J.P., *The properties of gases and liquids*, 5th Edition, McGRAW-HILL, 2001.
- 7- Hayes, R.E., Kolaczowski, *Introduction to catalytic combustion*, Gordon and Breach Science, Amsterdam, 1997.
- 8- Shahamiri, S.A., Wierzba, I., *Modeling the reactive processes within a catalytic porous medium*, Applied mathematical modeling, Vol. 35, pp. 1915-1925, 2011.
- 9- Nield, D.A., Bejan, A., *Convection in Porous Media*, 3rd Edition, Springer, New York, 2006.
- 10- Bird, R., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N., *Transport Phenomena*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2006.