

بررسی تحلیلی تأثیرات رژیم جریان بر مخلوط متان-هوای جاری شده درون ریزمحفظه با سطح کاتالیزی پلاتینیوم

سید ابوذر فنایی*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

در این کار به بررسی تحلیلی دو اثر انتقال گرما و جرمی مخلوط واکنشی غیرهمگن کاتالیزی در یک ریزمحفظه با در نظر گرفتن تأثیرات رژیم جریان پرداخته شده است. اهمیت ویژه کار حاضر پیدا کردن عدد نادسن منتخب و بررسی تأثیرات ضرایب پرش جرمی و گرمایی بر مسئله حاضر است. معادلات حاکم شامل معادله انرژی، کسر مولی و مصرف کاتالیزی می باشد و تأثیرات رژیم جریان از طریق شرایط مرزی به این معادلات وارد می شود. نتایج مدل در سه مقدار مختلف عدد نادسن با مقادیر گزارش شده آزمایشگاهی مقایسه شده اند. برای عدد نادسن ۰/۱ حداکثر خطای ۷/۵۴ درصد نسبت به داده های آزمایشگاهی وجود دارد اما برای اعداد نادسن ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ میزان خطا به ۳۵/۴ درصد افزایش می یابد. بنابراین عدد نادسن منتخب برای ریزمحفظه کاتالیزی برابر با ۰/۱ می باشد. بیشترین افزایش مصرف سوخت با افزایش عدد نادسن در اعداد رینولدز پایین رخ داده و میزان این افزایش ۳۵/۲ درصد می باشد. همچنین تغییرات نرخ افزایشی مصرف سوخت و کسر مولی سطحی با افزایش عدد نادسن تقریباً با یکدیگر برابر بوده که این امر به دلیل وارد شدن سیال از رژیم پیوسته به رژیم لغزش است. **واژه های کلیدی:** ریزمحفظه، رژیم پیوسته، واکنش سطحی کاتالیزی، پرش حرارتی و جرمی، حل تحلیلی.

The analytical study of flow regime effects on methane-air mixture put inside a micro-channels with Pt catalyst surface

S. A. Fanaee

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

In this paper, an analytical analysis for thermal and mass transfer effects of a non-homogeneous catalytic mixture into a micro-channel is investigated with considering flow regime effects. The importance of the present work is to find out the selective Knudsen number and investigating the possessions of mass and heat jump coefficients on the present problem. The governing equations include energy, molar fraction and catalytic conversion equations, and the effects of flow regime is introduced into the problem through boundary conditions. The obtained results are compared in three different values of the Knudsen number with experimental data. The maximum errors rather than experimental data for Knudsen number equal to 0.1 is 7.54 percent but for Knudsen numbers of 0.01 and 0.001, the errors is increased to 35.4 percent. Therefore, the selective Knudsen number for catalytic micro-channel is equal to 0.1. The greatest increase in fuel conversion with increasing Knudsen number is occurred in the low Reynolds number with a value of 35.2%. Furthermore, the increasing rates of fuel conversion and surface mole fraction with increase of Knudsen number are nearly equal, which this issue is due to entrance of fluid from continuous to slip regime.

Keywords: Micro-Channel, Continuous Regime, Non-Homogeneous Catalytic Reaction, Thermal and Mass Jump, Analytical Solution.

۱- مقدمه

در سال های اخیر نیازهای تحقیقاتی و استفاده های تجاری از وسایل مکانیکی با ابعاد میکرو^۱ و نانو^۲ رواج بسیار زیادی یافته است. کانال ها از مهم ترین بخش های این سیستم ها هستند که به منظور انتقال سیال با اهداف مختلف مانند انتقال گرما، جابه جایی و سوخت-رسانی مورد استفاده قرار می گیرند. توسعه سیستم های احتراقی میکروتوانی با چگالی بالای انرژی در سوخت های هیدروکربنی ایجاد شده که این موضوع دستیابی به نیاز روز افزون سیستم های توانی قابل حمل را آسان ساخته است. از جمله این سیستم ها می توان به رانشگر سفینه ها در ابعاد میکرو/نانو، راکتورهای میکرو/نانو شیمیایی و حسگرها اشاره کرد. همچنین در دو دهه اخیر، انتقال گرما و جریان در

چاه های^۳ گرمایی میکرو/نانو محفظه مورد توجه واقع شده که به عنوان یک موضوع تحقیقاتی در میکروالکترونیک مورد توجه ویژه ای قرار گرفته است. مطابق با [۱]، اگر مرتبه طول مشخصه، قطر داخلی یک سیلندر و اندازه فاصله بین دو صفحه موازی محفظه از مرتبه هزار میکرومتر یا کمتر باشد به فرآیند انجام شده اصطلاحاً میکرو و نانو گفته می شود. تأثیر نیروها، واکنش ها و کمیت های سطحی در مقابل مقادیر حجمی در حالت میکرو اهمیت بیشتری نسبت به حالت ماکرو خواهد داشت. بنابراین پارامترهایی مانند ضریب انتقال گرما و جرم، ضریب اصطکاک و ... تفاوت های قابل توجهی در دو حالت میکرو و ماکرو خواهند داشت. به لحاظ سیالی و حرارتی میکرو شدن یا کوچک شدن یک محفظه سبب می شود که تأثیرات افت فشار و ضریب انتقال گرمای جابجایی افزایش یابند که این امر درمورد ضریب انتقال گرما به

^۱ Micro-scale

^۲ Nano-scale

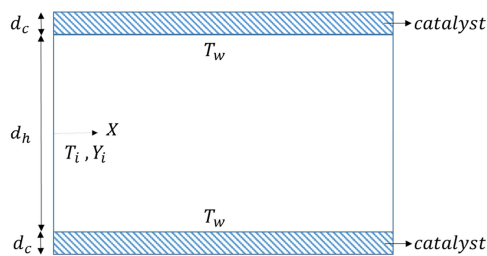
^۳ Heat Sink

ریزمحفظه‌ها مرور کرده است. در این کار اثرات رقیق شدن سیال تحت شرایط مرزی شار و دما ثابت بررسی شده و جمله‌های رسانش و اتلاف لزجت تحت تأثیر این کمیت‌ها مشخص شده‌است. در [۱۳] نشان می‌دهد که واکنش غیرهمگن کاتالیزی سبب ایجاد رخدادهای غیر-همگن درون جریان واکنشی می‌شوند. بنابراین برای مدل‌سازی چنین مسائلی حل‌های مختلف انتقال گرما و غیر همگن کاتالیزی انجام شده که از مهمترین این مسائل می‌توان به تحقیق آپل و همکاران [۱۴]، وانگ و همکاران [۱۵] و دشموخ و همکاران [۱۶] اشاره کرد. این کارها تطبیق کاملی بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی درون ریزمحفظه-های سطحی را نشان نداده‌اند. در کار حاضر با هدف تطبیق کامل‌تر نتایج تحلیلی بر نتایج عملی، برای کاربرد در مدل‌سازی وسایلی مانند چاه‌های حرارتی و تراشه‌های سیلیکونی، مدل‌سازی تحلیلی دقیق‌تری با در نظر گرفتن پرش گرمی و حرارتی جهت توصیف مخلوط سوختی به همراه واکنش غیر همگن کاتالیزی انجام شده‌است. تفاوت اصلی کار مربوطه و کار حاضر پیدا کردن تأثیرات عدد نادنس و ضرایب پرش گرمی و گرمایی بر مسئله حاضر و پیدا کردن عدد نادنس منتخب جهت به دست آوردن جواب دقیق درون ریزمحفظه کاتالیزی می‌باشد.

۲- مشخصات مقاله

۲-۱- مدل فیزیکی

برای بررسی جریان درون محفظه یک بعدی تحت تأثیر پرش گرمایی و گرمی ریزمحفظه‌ای مشابه با شکل (۱) در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- هندسه مدل فیزیکی ریزمحفظه‌ی کاتالیزی

هندسه نشان داده شده از یک محفظه استوانه‌ای شکل با قطر هیدرولیکی برابر با d_h تشکیل شده است که سطح داخلی آن با کاتالیزور پلاتینیوم با ضخامت d_c پوشیده شده و دمای دیواره‌های آن برابر با T_w در نظر گرفته شده است. دمای دیواره با استفاده از جریان الکتریکی متغیر به صورت ثابت کنترل شده و تمامی سطح ریزمحفظه از کاتالیزور پوشیده شده که به علت ضخامت کم لایه کاتالیزور، کم‌تر از $0/1$ میلی متر، دمای آن با دمای دیواره یکسان در نظر گرفته می‌شود. مخلوط متان و هوا با دمای ورودی برابر با T_i ، کسر مولی ورودی Y_i و سرعت ورودی U وارد ریزمحفظه می‌شود که این مخلوط با توجه به دمای نسبتاً پایین خود فقط تحت تأثیر واکنش‌های غیرهمگن کاتالیزی سطحی نیز قرار خواهد گرفت.

برای حل مسئله حاضر قطر محفظه در بازه $0/4$ تا 4 میلی متر تغییر کرد و ضخامت کاتالیست برابر با $0/1$ میلی‌متر و طول محفظه ده

علت تغییر عدد ناسلت^۱ با رژیم جریان بوده و سبب می‌شود ضریب انتقال گرما برای گاز و مایع حدود 1000 تا 10000 برابر شود. لی و همکاران در [۲] مدلی یک بعدی جهت بررسی مسئله انتقال گرما در یک محفظه احتراق استوانه‌ای با ابعاد میکرو توسعه داده‌اند که در آن مکانیزم واکنش غیرهمگن کاتالیزی تک‌مرحله‌ای برای مخلوط‌های هیدروژن- هوا، متان- هوا و پروپان- هوا جهت بررسی تفاوت خواص سوخت از نظر سینتیکی بررسی شده است. در [۳] یک مدل دو بعدی انتقال گرما در جریان در حال واکنش درون محفظه با در نظر گرفتن دیواره‌های دمای ثابت توسعه داده شده است. در این حل تحلیلی رابطه‌ای بین عدد پکلت و میدان دمایی گزارش شده‌است. کو و مودوار در [۴]، مدلی سه بعدی برای بررسی انتقال گرما در چاه‌های حرارتی ریز محفظه ارائه دادند. تحقیق آن‌ها نشان دهنده این است که دما در راستای جهت جریان در ناحیه جامد و سیال افزایش یافته و این افزایش می‌تواند با یک تابع خطی تخمین زده شود. در این تحقیق بیش‌ترین دمای حاصله مربوط به چاه‌های حرارتی در خروجی محفظه رخ می‌دهد. فنایی و ابوالفضلی‌اصفهانی در [۵] یک روش تحلیلی یک بعدی به بررسی گرمای جریان غیر واکنشی هیدروژن- هوا در یک کانال کوچک پرداختند. در این مدل، یک کانال ساده درمقیاس میکرو که متشکل از دو صفحه موازی که در آن سوخت پیش‌مخلوط شده و هوا وارد کانال می‌شود، در نظر گرفته شده است. در کاری دیگر فنایی و همکاران [۶] یک مدل گرمای یک بعدی تحلیلی در میکروکانال مستطیلی ارائه داده‌اند. نتایج این کار نشان می‌دهد که کوچک شدن محفظه می‌تواند روی عدم پایداری شعله موجود در محفظه تأثیر داشته باشد. همچنین در کاری دیگر آقای پن و همکاران [۷] به بررسی نقش پایداری کاتالیست در فرآیند احتراقی در ریزمحفظه پرداخته است. ایبرت و اسپارو در [۹]، تعیین افت فشار و افت سرعت در سیال گازی جاری در ریزمحفظه مستطیلی و حلقوی را مورد بررسی قرار داده‌اند. این کار بیان می‌کند که درون ریزمحفظه اگر عدد نادنس کوچک‌تر از $0/1$ باشد سیال در محیط پیوسته، وقتی که این عدد بین $0/1$ تا $0/1$ باشد سیال درون رژیم سرش و هنگامی که این عدد بزرگ‌تر از $0/1$ باشد رژیم جریان گذار خواهد بود. نتایج این کار نشان می‌دهد که تأثیر لغزش روی توزیع سرعت باعث مسطح‌تر شدن آن نسبت به جریان پیوسته می‌شود. همچنین گرادیان فشار محوری تحت شرایط لغزشی کاهش می‌یابد. ستین و همکارانش در [۱۰]، انتقال گرما در ریز لوله‌ها و ریزمحفظه‌های دوبعدی را با فرض جریان لغزشی و صرف نظر از هدایت محوری برای حالت‌های دما ثابت و شار گرمایی ثابت بررسی کردند. همچنین در این کار اثرات رقیق شدن و اتلاف لزجت که برای جریان در فشارهای پایین و سرعت‌های بالا اهمیت می‌یابد، نشان داده شده‌است. هاتیاراچی و همکارانش در [۱۱]، جریان لغزشی لایه‌ای در یک ریزمحفظه مستطیلی را به روش حجم محدود بررسی کردند. این کار نشان می‌دهد که وابستگی بین ضریب اصطکاک کاملاً توسعه یافته با عدد نادنس و ضریب هندسی وجود دارد. همچنین آن‌ها اثرات رقیق شدن سیال را روی عدد ناسلت نیز آزمایش کردند. کولین در [۱۲]، انواع روش‌های تحلیلی و عددی را برای مطالعه جابه‌جایی در

^۱Nusselt number

$$y - y_S = -\xi_m L \left. \frac{\partial y}{\partial z} \right|_{z=z_w} \quad (7)$$

$$(8)$$

با مقایسه روابط محاسبه ضریب جابه جایی در حالت پایه با دو رابطه پرش گرمایی در معادله (7) و جرمی در معادله (8)، مقادیر ضرایب جابه جایی گرمایی و جرمی به صورت زیر در می آید:

$$h = \frac{k}{\xi_l L} \quad (9)$$

$$h_m = \frac{D_{H_2/air}}{\xi_m L} \quad (10)$$

مقادیر ضرایب پرش گرمایی و جرمی در معادله های بالا به ترتیب از روابط (11) و (12) به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\xi_l = \frac{2 - F_l}{F_l} \cdot \frac{2\gamma}{1 + \gamma} \cdot \frac{kn}{Pr} \quad (11)$$

$$\xi_m = \frac{2 - F_m}{F_m} \cdot \frac{kn}{Sc} \quad (12)$$

کمیت های Pr و Sc در این معادلات به صورت زیر تعریف می شوند:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}, \quad Sc = \frac{\mu}{\rho D_{H_2/air}} \quad (13)$$

علاوه بر این با توجه به تعاریف معادلات (9) و (10) و تعاریف اعداد ناسلت و شروود رابطه محاسبه این دو کمیت نهایتاً به صورت زیر به دست می آید:

$$Nu = \frac{1}{\xi_l}, \quad Sh = \frac{1}{\xi_m} \quad (14)$$

همچنین رابطه بی بعد بین کسر مولی سطحی و کسر مولی درون محفظه به صورت زیر می تواند بیان شود:

$$Y_s = \frac{S}{S+1} Y, \quad S = \frac{h_m}{k_C} \quad (15)$$

در این رابطه S برابر با نسبت ضریب انتقال جرم جابه جایی به نرخ واکنش غیرهمگن کاتالیزی می باشد. اندازه کسر مولی سطحی در ابتدای محفظه برابر صفر در نظر گرفته می شود. میزان نرخ واکنش سطحی مخلوط متان-هوا روی کاتالیز پلاتینیوم از [13] به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$k_C = 1.8 \times 10^{13} \exp\left(\frac{-146400}{RT_W}\right) \quad (16)$$

با توجه به معادلات بالا نهایتاً جواب معادلات بی بعد (1) و (2) با توجه به شرایط مرزی پرش گرمایی و جرمی و تعاریف بیان شده عدد ناسلت و شروود به صورت نامی به دست می آید:

$$\theta = C_1 \exp(C_3 X) + C_2 \exp(C_4 X)$$

$$C_1 = \frac{C_4 \exp(C_4 L / d_h)}{C_4 \exp(C_4 L / d_h) - C_3 \exp(C_3 L / d_h)} \quad (17)$$

$$C_2 = 1 - C_1$$

$$C_3 = \frac{-Pe + \sqrt{Pe^2 + 16Nu^2}}{2}$$

$$C_4 = \frac{-Pe - \sqrt{Pe^2 + 16Nu^2}}{2}$$

$$Y = C_{1m} \exp(C_{3m} X) + C_{2m} \exp(C_{4m} X)$$

$$C_{1m} = \frac{C_{4m} \exp(C_{4m} L / d_h)}{C_{4m} \exp(C_{4m} L / d_h) - C_{3m} \exp(C_{3m} L / d_h)} \quad (18)$$

$$C_{2m} = 1 - C_{1m}$$

برابر قطر محفظه می باشد. مقدار دمای دیواره در بازه 400 تا 1000 کلوین بوده و دمای ورودی به آن برابر با 300 کلوین می باشد. همچنین کسر مولی ورودی متان برابر با 0.095 برای مخلوط متان و هوا با نسبت اکی والان برار با یک بوده و سرعت ورودی مخلوط در بازه 2 تا 8 متر بر ثانیه می باشد. همچنین خاصیت های مخلوط متان-هوا براساس نسبت جرمی مخلوط به دست می آید.

2-2- مدل ریاضی و حل

واکنش غیرهمگن کاتالیزی سطحی سبب ایجاد دو اثر شامل انتقال گرما به جریان و مصرف جرم مخلوط می شود. بنابراین معادلات اصلی این مسئله به کمک در نظر گرفتن یک حجم کنترل درون محفظه یک بعدی به دست آمده اند. بررسی این مسئله در عدد ناسلت کوچکتر از 0.1 انجام شده جایی که مطابق با [9] جریان در رژیم پیوسته یا سرش قرار دارد. معادلات حاکم بر این مساله میکرو مشابه با ابعاد ماکرو است اما برای بررسی تأثیرات دیواره می بایست از شروط مرزی پرش گرمایی و جرمی نیز کمک گرفت. بنابراین معادلات بی بعد انرژی و کسر مولی در جهت جریان با فرض جریان غیر واکنشی به صورت زیر قابل بیان می باشند:

$$-\frac{d^2\theta}{dX^2} + Pe \frac{d\theta}{dX} + 4Nu\theta = 0 \quad (1)$$

$$-\frac{d^2Y}{dX^2} + Pe_m \frac{dY}{dX} + 4Sh(Y - Y_s) = 0 \quad (2)$$

در رابطه بالا برای ساده سازی این مسئله کمیت های بی بعد به صورت زیر استفاده شده اند:

$$\theta = \frac{T_W - T}{T_W - T_i}, \quad X = \frac{x}{d_h}, \quad Y = \frac{y}{Y_i}, \quad Y_s = \frac{y_s}{Y_i} \quad (3)$$

$$Nu = \frac{hL}{k}, \quad Sh = \frac{h_m L}{D_{H_2/air}}$$

در معادله بالا z مختصات عمود بر حرکت جریان داخل ریزمحفظه می باشد. همچنین $D_{H_2/air}$ ضریب نفوذ مولکولی برای نفوذ سوخت درون هوا می باشد که از معادله فلر [13] برای گونه های متان و هوا به صورت زیر محاسبه می شود:

$$D_{CH_4/air} = \frac{1.013 \times 10^{-2} T^2 \left(\frac{1}{M_{CH_4}} + \frac{1}{M_{air}} \right)^{0.5}}{P \left[(v_i)_{CH_4}^{1/3} + (v_i)_{air}^{1/3} \right]^2} \quad (4)$$

همچنین شرایط مرزی بی بعد شده این به صورت زیر به دست می آید:

$$\theta(X=0) = 1, \quad \frac{d\theta}{dX} \left(X = \frac{L}{d_h} \right) = 0 \quad (5)$$

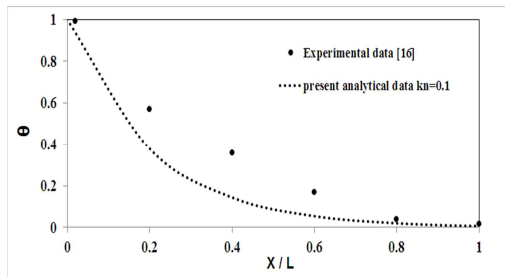
$$Y(X=0) = 1, \quad \frac{dY}{dX} \left(X = \frac{L}{d_h} \right) = 0 \quad (6)$$

برای محاسبه ضرایب جابه جایی گرمایی و جرمی از رابطه پرش، شار ورودی گرمایی و جرمی مربوطه در مرزهای حجم کنترل به صورت زیر محاسبه می شود:

$$T - T_W = -\xi_l L \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=z_w}$$

Fuller equation

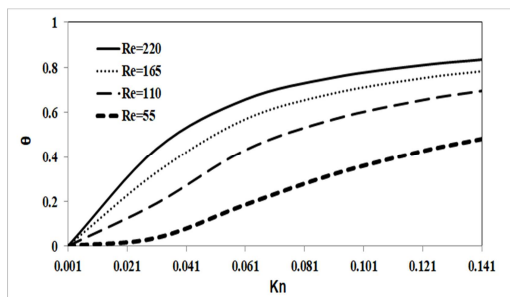
همچنین برای بررسی کاملتر نتایج کار حاضر نتایج مدل حاضر در عدد نادسن برابر با ۰/۱، که مطابق با مقایسه نتایج شکل قبلی بیشترین انطباق با داده‌های آزمایشگاهی [۱۳] را داشت، با داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده در [۱۶] با عدد رینولدز متفاوت برابر با ۴۶ مقایسه شده است.



شکل ۳- تغییرات دمای بی بعد بر حسب طول بی بعد برای نتایج آزمایشگاهی [۱۳] و مقادیر مدل حاضر با اعداد نادسن برابر با ۰/۱ با عدد رینولدز ۴۶ و دمای سطح برابر با ۱۰۰۰ کلوین

مطابق با این شکل داده‌های تحلیلی حاضر باز هم انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی [۱۶] با حداکثر خطای ۲۱/۱ درصد را نشان می‌دهد. بنابراین مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی از دو مرجع متفاوت در دو شکل (۲) و (۳) صحت داده‌های تحلیلی کار حاضر را تایید می‌کند.

در شکل (۴) تغییرات دمای بی بعد بر حسب عدد نادسن در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده است. با افزایش عدد نادسن از مقدار حداقلی ۰/۰۰۱ تا ۰/۱۴۱، در انتهای محفظه، همواره در همه مقادیر عدد رینولدز دمای بی بعد افزایش خواهد یافت. نرخ این افزایش در ابتدا وقتی که عدد نادسن بین ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱ باشد بسیار زیاد بوده و سپس در مقادیر عدد نادسن بزرگتر از ۰/۰۱ مقدار متوسطی به خود گرفته و نهایتاً برای مقادیر بیشتر از ۰/۰۴ یک روند خطی افزایشی را خواهد داشت و این رخداد نشان‌دهنده این است که برای مقادیر عدد نادسن مختلف بسته به نوع کاربرد ریزمحفظه می‌توان رنج کاربردی در محدوده بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ با تقریب خوبی در نظر گرفت. همان طور که در شکل قبل گفته شد در کاربرد کاتالیزی حاضر مقدار عدد نادسن برابر با ۰/۱ برای تعیین پارامترهای مسئله مناسب تر می‌باشد.



شکل ۴- تغییرات دمای بی بعد بر حسب عدد نادسن برای دمای سطح برابر با ۸۰۰، طول بی بعد برابر با ۰/۲۵ و ضریب پرش گرمایی ۰/۷۵۹ در مقادیر مختلف عدد رینولدز

$$C_{3m} = \frac{-Pe_m + \sqrt{Pe_m^2 + 16Sh^2}}{2}$$

$$C_{4m} = \frac{-Pe_m - \sqrt{Pe_m^2 + 16Sh^2}}{2}$$

برای حل مسئله حاضر می‌بایست خاصیت‌ها ابتدا ثابت فرض شده و پس از حل اولیه تغییرات اعداد نادسن و پارامترهای پرش با سعی و خطا وارد مسئله می‌شود.

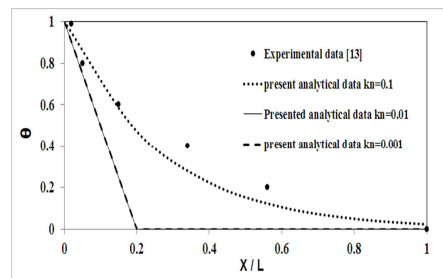
همچنین برای محاسبه میزان سوخت مصرف شده، Y_C ، از تعریف بی بعد زیر استفاده می‌شود:

$$Y_C = 1 - Y \quad (19)$$

۳- نتایج

۳-۱- جدول ها و شکل ها

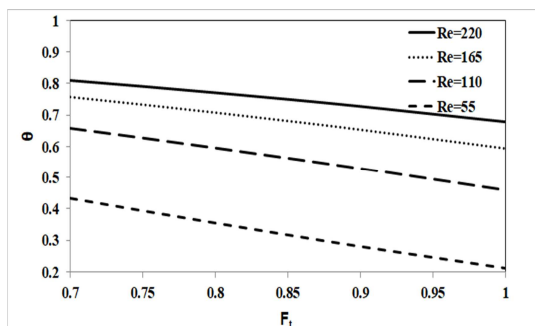
در این کار به بررسی جریان با واکنش غیرهمگن کاتالیزی سطحی درون یک ریزمحفظه با توجه به شروط مرزی پرش گرمایی و جرمی پرداخته شد. مطابق با [۹] در مسئله ریزمحفظه اگر عدد نادسن کوچکتر از ۰/۱ باشد سیال در محیط پیوسته، وقتی که این عدد بین ۰/۱ تا ۰/۱ باشد سیال درون رژیم سرش و هنگامی که این عدد بزرگتر از ۰/۱ باشد رژیم جریان گذار خواهد بود. بنابراین بررسی این کار محدود به اعداد نادسن کوچکتر مساوی ۰/۱ شده است که در آن معادلات حاکم مشابه با ابعاد ماکرو است اما برای بررسی تأثیرات دیواره می‌بایست از شروط مرزی پرش گرمایی و جرمی نیز کمک گرفت. برای بررسی این حل در شکل (۲) تغییرات دمای بی بعد بر حسب طول بی بعد محفظه در سه مقدار مختلف عدد نادسن برابر با ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱ با مقادیر گزارش شده آزمایشگاهی از [۱۳] مقایسه شده است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود مقادیر مربوط به عدد نادسن برابر با ۰/۱ در کلیه نقاط بیشترین نزدیکی با داده‌های آزمایشگاهی را داشته‌اند و نمودارهای مربوط به اعداد نادسن برابر با ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ بر یکدیگر منطبق است. همچنین در عدد نادسن ۰/۱ حداکثر خطای ۷/۵۴ درصد نسبت به داده‌های آزمایشگاهی وجود داشته در حالی که برای اعداد نادسن برابر با ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ حداکثر خطای ۳۵/۴ درصد دیده می‌شود. بنابراین بهترین نتایج مدل تحلیلی در مسئله حاضر در عدد نادسن برابر با ۰/۱ بوده که برای تحلیل سایر پارامترهای مسئله استفاده می‌شود. همچنین با حرکت در طول ریزمحفظه دمای بی بعد کاهش می‌یابد که بیشترین درصد کاهش دمای بی بعد در طول محفظه مربوط به اعداد نادسن برابر با ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ می‌باشد.



شکل ۲- تغییرات دمای بی بعد بر حسب طول بی بعد برای نتایج آزمایشگاهی [۱۳] و مقادیر مدل حاضر با اعداد نادسن برابر با ۰/۰۱، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱ با عدد رینولدز ۶۰، دمای سطح برابر با ۱۰۰۰ کلوین

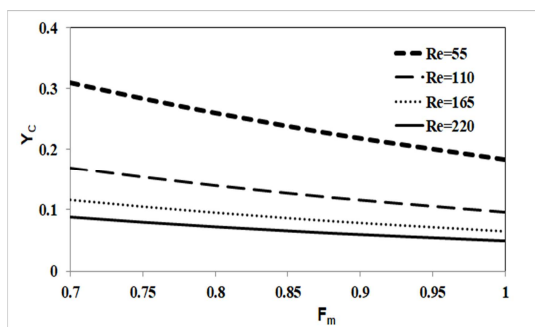
سیالی ریزمحفظه به ترتیب روی انتقال گرما و جرم درون مخلوط واکنشی نشان داده می‌شود. افزایش این پارامترها در رینولدزهای کمتر به خاطر لایه‌ای بودن جریان تأثیرات بیشتری داشته اما در جریان‌های با رینولدزهای بالاتر به دلیل وجود گردابه‌ها تأثیرات لایه‌های سیالی در پدیده حرارتی و جرمی همان طور که در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) دیده می‌شود، کاهش می‌یابد.

در شکل (۷) تغییرات دمای بی‌بعد بر حسب ضریب تأثیر پرش گرمایی در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده‌است. مطابق این شکل با افزایش این ضریب مقدار دمای بی‌بعد کاهش می‌یابد که حداکثر میزان این کاهش مربوط به عدد رینولدز ۵۵ با مقدار $0.1/50$ درصد می‌باشد.



شکل ۷. تغییرات دمای بی‌بعد بر حسب ضریب تأثیر پرش گرمایی برای دمای سطح برابر با ۸۰۰، طول بی‌بعد برابر با $0.25/0$ و عدد نادسن برابر با $0.1/0$ در مقادیر مختلف عدد رینولدز

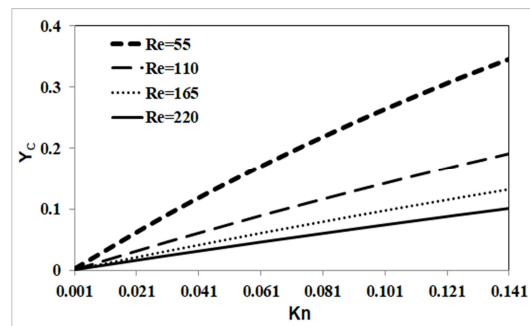
در شکل (۸) تغییرات مصرف سوخت بر حسب ضریب تأثیر پرش جرمی در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده‌است. مطابق این شکل با افزایش این ضریب مقدار مصرف سوخت کاهش می‌یابد که حداکثر مقدار این کاهش مربوط به عدد رینولدز ۵۵ با میزان $0.33/33$ درصد می‌باشد.



شکل ۸. تغییرات مصرف سوخت بر حسب ضریب تأثیر پرش جرمی برای دمای سطح برابر با ۸۰۰، طول بی‌بعد برابر با $0.25/0$ و عدد نادسن برابر با $0.1/0$ در مقادیر مختلف عدد رینولدز

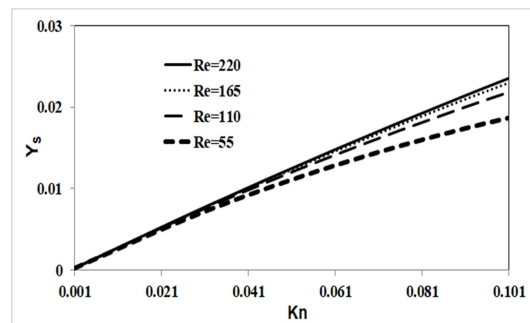
در شکل (۹) تغییرات کسر مولی سطحی بی‌بعد بر حسب ضریب تأثیر پرش جرمی در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده‌است. مطابق شکل با افزایش ضریب پرش جرمی مقدار کسر مولی سطحی کاهش می‌یابد. حداکثر میزان این کاهش مربوط به عدد رینولدز ۲۲۰

در شکل (۵) تغییرات مصرف سوخت بر حسب عدد نادسن در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده‌است. مطابق این شکل افزایش تراکم مولکولی در اعداد نادسن بالاتر سبب افزایش درصد نفوذ جرم به سمت سطح و در نتیجه فعال‌تر شدن واکنش کاتالیزی و افزایش مصرف سوخت شده‌است. بیشترین میزان افزایش مصرف سوخت با افزایش عدد نادسن در عدد رینولدز پایین‌تر رخ داده که حدوداً $0.35/2$ درصد می‌باشد.



شکل ۵- تغییرات مصرف سوخت بر حسب عدد نادسن برای دمای سطح برابر با ۸۰۰، طول بی‌بعد برابر با $0.25/0$ و ضریب پرش جرمی $0.759/0$ در مقادیر مختلف عدد رینولدز

در شکل (۶) تغییرات کسر مولی سطحی بر حسب عدد نادسن در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده‌است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش عدد نادسن میزان کسر مولی سطحی نیز افزایش یافته که این امر نیز به دلیل افزایش تراکم مولکولی با افزایش عدد نادسن و نیز نفوذ بیشتر جرم سوختی به سمت سطح می‌باشد. مقایسه بین شکل‌های (۵) و (۶) نشان می‌دهند که تغییرات نرخ افزایشی مصرف سوخت و کسر مولی سطحی با عدد نادسن تقریباً با درصد اختلاف کوچکی بر یکدیگر منطبق بوده که این امر ناشی از هم-زمان بودن افزایش مصرف سوخت با جای‌گیری جرم روی سطح بوده و این نرخ افزایشی به دلیل وارد شدن سیال از رژیم پیوسته به رژیم لغزش است. البته با افزایش عدد رینولدز میزان کسر مولی سطحی افزایش یافته اما میزان مصرف سوخت کاهش یافته است.

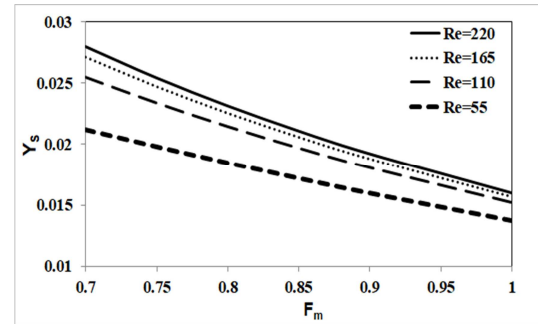


شکل ۶- تغییرات کسر مولی سطحی بی‌بعد بر حسب عدد نادسن برای دمای سطح برابر با ۴۰۰، طول بی‌بعد برابر با $0.25/0$ و ضریب پرش جرمی $0.759/0$ در مقادیر مختلف عدد رینولدز

به کمک ضرایب تأثیر پرش گرمایی و جرمی تأثیرات لایه‌های

با مقدار ۳۵/۷۱ درصد می‌باشد.

در تمامی شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) همواره افزایش ضرایب پرش گرمایی و جرمی سبب کاهش خطی دمای بی‌بعد، کسر جرمی سوخت و کسر جرمی سطحی بی‌بعد می‌شود که این امر به دلیل تأثیرات خطی این کمیت‌ها بر شرط مرزی دیواره و در نتیجه ایجاد یک گرادیان خطی پارامتری با صرفنظر شدن چشمه غیرخطی درون رژیم جریان پیوسته-لغزشی می‌باشد.



شکل ۹. تغییرات کسر مولی سطحی بی‌بعد بر حسب ضریب پرش جرمی برای دمای سطح برابر با ۸۰۰، طول بی‌بعد برابر با ۰/۲۵ و عدد نادسن برابر با ۰/۱ در مقادیر مختلف عدد رینولدز

۴- جمع بندی

در این کار به بررسی تأثیرات شروط مرزی پرشی وابسته به رژیم جریان در ریزمحفله‌ای با واکنش غیرهمگن کاتالیزی درون مخلوط متان-هوا پرداخته شد. مهمترین نتایج به دست آمده در این کار به صورت زیر می‌باشد:

- برای بررسی این حل نتایج به دست آمده در سه مقدار مختلف عدد نادسن با مقادیر گزارش شده آزمایشگاهی مقایسه شده که داده‌های مربوط به عدد نادسن برابر با ۰/۱ در کلیه نقاط بیشترین نزدیکی را با داده‌های آزمایشگاهی دارند.
- برای عدد نادسن ۰/۱ حداکثر خطای ۷/۵۴ درصد نسبت به داده‌های آزمایشگاهی وجود داشته در حالی که برای اعداد نادسن برابر با ۰/۰۱ و ۰/۰۱ این مقدار به ۳۵/۴ درصد افزایش می‌شود.
- با حرکت در طول ریزمحفله دمای بی‌بعد کاهش می‌یابد که بیشترین درصد کاهش دمای بی‌بعد در طول محفله مربوط به اعداد نادسن برابر با ۰/۰۱ و ۰/۰۱ می‌باشد.
- نرخ این افزایش دمای بی‌بعد در ابتدا وقتی که عدد نادسن بین ۰/۰۱ و ۰/۰۱ باشد بسیار زیاد بوده و نهایتاً برای مقادیر بیشتر از ۰/۰۴ یک روند خطی افزایشی را خواهد داشت.
- بیشترین میزان افزایش مصرف سوخت با افزایش عدد نادسن در عدد رینولدز پایین‌تر رخ داده که حدوداً ۳۵/۲ درصد می‌باشد.
- تغییرات نرخ افزایشی مصرف سوخت و کسر مولی

سطحی با عدد نادسن تقریباً با درصد اختلاف کوچکی بر یکدیگر منطبق بوده که این امر به دلیل وارد شدن سیال از رژیم پیوسته به رژیم لغزش است.

- افزایش ضرایب پرش حرارتی و جرمی سبب کاهش خطی دمای بی‌بعد، کسر جرمی سوخت و کسر جرمی سطحی بی‌بعد به دلیل صرفنظر شدن چشمه غیرخطی درون رژیم جریان پیوسته-لغزشی می‌شود.

۵- فهرست علائم

C_i	ثابت حل معادلات، $i, i_m = 1, 2, 3, 4$
C_p	گرمای ویژه در فشار ثابت، $J \cdot kg^{-1} K^{-1}$
$D_{CH_4/air}$	ضریب نفوذ متان-هوا، $m^2 \cdot s^{-1}$
d_c	ضخامت کاتالیزور پلاتینیوم، m
d_h	قطر هیدرولیکی، m
F_t	ضریب تأثیر پرش گرمایی
F_m	ضریب تأثیر پرش جرمی
h	ضریب انتقال گرمای جابجایی، $W \cdot m^{-2} K^{-1}$
h_m	ضریب انتقال جرم جابجایی، $m \cdot s^{-1}$
k	رسانایی گرمایی، $W \cdot m^{-1} K^{-1}$
k_C	نرخ ثابت واکنش کاتالیزور، $m \cdot s^{-1}$
kn	عدد نادسن
L	طول کانال، m
M	وزن مولکولی گونه‌ها
Nu	عدد ناسلت، hd_h/k
P	فشار استاتیکی، atm
Pe	عدد پکلت، Ud_h/α
Pr	عدد پرائتل، $\mu/\rho\alpha$
Pe_m	عدد پکلت جرمی، Ud_h/D_{AB}
R	ثابت گازها، $J \cdot kg^{-1} K^{-1}$
Re	عدد رینولدز، $\rho U d_h/\mu$
S	نسبت انتقال جرم جابجایی به نرخ واکنش
Sc	عدد اشمیت، $\mu/\rho D_{AB}$
Sh	عدد شروود، $h_m d_h/D_{AB}$
T	دما، K
U	سرعت جریان، $m \cdot s^{-1}$
v_i	نفوذ حجمی گونه‌ها
x	مختصات محوری، m
X	مختصات محوری بی بعد شده
y	کسر مولی سوخت، $mole$
Y	کسر مولی سوخت بی‌بعد
Y_C	تغییرات مصرف سوخت
Y_i	کسر مولی ورودی سوخت، $mole$
z	مختصات عرضی، m
Z	مختصات عرضی بی‌بعد
γ	نسبت گرماهای ویژه
ζ_m	ضریب پرش جرمی

- [13] Hayes R.E. and Kolaczowski S.T., *Introduction to Catalysis Combustion*. Gordon and Breach, New York, 1997.
- [14] Appel C., Mantzaras J., Schaeren R., Bombach R. and Inauen A., Catalytic Combustion of Hydrogen-Air Mixtures over Platinum: Validation of Hetero/Homogeneous Chemical Reaction Schemes. *Clean Air*, Vol.5, No.1, pp. 21-44, 2004.
- [15] Wang Y., Zhou Z., Yang W., Zhou J., Liu J., Wang Z. and Cen K., Combustion of hydrogen-air in micro combustors with catalytic Pt layer, *Energy Conversion and Management*, Vol.51, pp.1127-1133, 2010.
- [16] Deshmukh S., and Vlachos D., A reduced mechanism for methane and one-step rate expressions for fuel-lean catalytic combustion of small alkanes on noble metals, *Combustion and Flame*, Vol. 149, No. 4, pp. 366-383, 2007.

دمای بی بعد شده	θ
لزجت دینامیکی، $Ns.m^{-1}$	μ
ضریب پرش حرارتی	ζ_t
ضریب پرش جرمی	ζ_m
چگالی، $kg.m^{-3}$	ρ
زیرنویس‌ها	
هوا	air
متان	CH ₄
ورودی	i
جرم	m
سطحی	S
دیواره	W

۶-مراجع

- [1] Kaisare N. S., and Vlachos D. G., A Review on Micro-Combustion: Fundamentals, Devices and Applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.38, No.3, pp.321-359, 2012.
- [2] Li J., Chou S.K., Li Z.W. and Yang W.M., Development of 1D model for the analysis of heat transport in cylindrical micro combustors. *Applied Thermal Engineering*, Vol.29, No.8, pp.1854-1863, 2009.
- [3] Veeragaven A., *Heat transfer analysis for improved in-situ infrared temperature diagnostics in microcombustors*, MSc. Thesis, University of Maryland, 2006.
- [4] Qu W. and Mudwar I., Analysis of three-dimensional heat transfer in micro-channel heat sinks. *International journal of Heat and mass Transfer*, Vol.45, No.19, pp.3973-3985, 2002.
- [5] Esfahani J.A. and Fanaee S. A., Analytical Modeling of Hydrogen-Air Mixture in a Catalytic Microchannel. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol.22, pp. 274-280, 2015.
- [6] Fanaee S. A. and Esfahani J. A., The analytical modeling of propane-oxygen mixture at catalytic micro-channel, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 1365-1373, 2014.
- [7] Pan J., Zhang R., Lu Q., Zha Z. and Bani S., Experimental study on premixed methane-air catalytic combustion in rectangular micro channel , *Applied Thermal Engineering*, Vol 117, pp. 1-7, 2017.
- [8] Morini G.L., Spiga M., Tartarini P., The rarefaction effect on the friction of gas flow in micro/nano channels. *Super lattices and Microstructures*, Vol.35, No.3, pp.587-599, 2004.
- [9] Ebert W.A. and Sparrow E. M., Slip flow in rectangular and annular ducts. *Journal of Basic Engineering*, Vol.87, No.4, pp.1018-1024, 1965.
- [10] Cetin B., Yuncu H. and Kackac S., Gaseous Flow in Microconduits with viscous dissipation. *International Journal of Transport Phenomena*, Vol.8, No.4, pp.297-315, 2006.
- [11] Hettiarachchi H.D., Golubovic M., Worek W.M. and Minkowycz W. J., Three-dimensional laminar slip-flow and heat transfer in a rectangular microchannel with constant wall temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.21, No.51, pp.5088-5096, 2008.
- [12] Colin S., Gas Microflows in the Slip Flow Regime: A Critical Review on Convective Heat Transfer. *Journal of Heat Transfer*, Vol.134, No.2, pp.1-13, 2012.