

بررسی تحلیلی تأثیرات مدل‌سازی رژیم جریان پیوسته‌ی مخلوط هیدروژن - هوا جاری‌شده درون ریزمحفظه با کاتالیست سطحی پلاتینیوم

در این مطالعه به بررسی تحلیلی دو اثر انتقال حرارتی و جرمی مخلوط واکنشی تحت اثر سطح کاتالیزی در یک ریزمحفظه با در نظر گرفتن تأثیرات رژیم پیوسته پرداخته شده است. در این مسئله عدد نادسن کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ در نظر گرفته شده و جریان در رژیم پیوسته یا سرش قرار دارد. معادلات حاکم شامل معادله انرژی، کسر مولی و مصرف کاتالیزی بوده که تأثیرات دیواره از طریق شروط مرزی پرش حرارتی و جرمی به مسئله وارد شده است. نتایج حل 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 با داده‌های آزمایشگاهی را دارند. داده‌های مدل لغزشی-پرسی با حداکثر خطای ۲/۵۴ درصد تطابق بهتری را نسبت به حالت پایه بدون لغزش و پرش با حداکثر خطای ۲۶/۶ درصد را نشان می‌دهد. بیشترین میزان افزایش مصرف سوخت با افزایش عدد نادسن در اعداد رینولدز پایین رخ داده که حدوداً ۱۰/۰۴ درصد می‌باشد. با افزایش ضریب تأثیر پرش حرارتی دمای بی‌بعد کاهش می‌یابد.

سید ابودر فنايي^۱

استادیار

مینا رجایی^۲

کارشناسی

واژه های راهنما: ریزمحفظه، رژیم پیوسته، واکنش غیرهمگن کاتالیزی، پرش حرارتی و جرمی، حل تحلیلی

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر نیازهای تحقیقاتی و استفاده‌های تجاری از وسایل مکانیکی با ابعاد میکرو و نانو رواج بسیار زیادی یافته است. کانال‌ها از مهم‌ترین بخش‌های این سیستم‌ها هستند که به منظور انتقال سیال با اهداف مختلف مانند انتقال حرارت، جابه جایی و سوخت‌رسانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. توسعه سیستم‌های احتراقی میکروتوانی با چگالی بالای انرژی در سوخت‌های هیدروکربنی ایجاد شده که این موضوع دستیابی به نیاز روز افزون سیستم‌های توانی قابل حمل را آسان ساخته است. از جمله این سیستم‌ها می‌توان به رانشگر سفینه‌ها در ابعاد میکرو/نانو، رآکتورهای میکرو/نانو شیمیایی و سنسورها اشاره کرد. همچنین در دو دهه اخیر، انتقال گرما و جریان در چاه‌های گرمایی میکرو/نانو کانال مورد توجه واقع شده که به عنوان یک موضوع تحقیقاتی در میکروالکترونیک مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است.

^۱نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند sab.famech@birjand.ac.ir

^۲کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند rajaemina1@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۲۸، تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۵/۲۱

مطابق با مرجع [۱]، اگر مرتبه طول مشخصه و اندازه بین دو صفحه موازی محفظه از مرتبه هزار میکرومتر یا کمتر باشد، جریان آن اصطلاحاً میکرو و نانو نامیده می‌شود. تأثیر نیروها، واکنش‌ها و کمیت‌های سطحی در مقابل مقادیر حجمی در حالت میکرو اهمیت بیشتری نسبت به حالت ماکرو خواهد داشت. بنابراین پارامترهایی مانند ضریب انتقال حرارتی-جرمی و ضریب اصطکاک تفاوت‌های قابل توجهی در دو حالت میکرو و ماکرو خواهند داشت. به لحاظ سیالی و حرارتی میکرو شدن یا کوچک شدن یک محفظه سبب می‌شود که تأثیرات افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش یابند که این امر در مورد ضریب انتقال حرارت به علت تغییر عدد ناسلت با رژیم جریان بوده و سبب می‌شود ضریب انتقال حرارت برای گاز و مایع حدود ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ برابر شود. لی و همکاران [۲] مدلی یک بعدی جهت بررسی مسئله انتقال حرارت 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.

فناپی و اصفهانی [۳] یک مدل شبه سه‌بعدی انتقال حرارت در ریزمخفظه را توسعه داده‌اند. در این حل ناحیه‌های مورد بررسی به سه بخش تقسیم شده و معادلات حاکم به صورت نیمه‌تحلیلی با توجه به شرایط تطبیقی از دیدگاه‌های حدی و غیرحدی به دست می‌آیند. کاربرد حل‌های شبه تحلیلی حدی و غیر حدی در مسایل ریزمخفظه‌ها در مرجع [۴] تا [۶] نشان داده شده است. در این مطالعه‌ها مدل‌سازی شبه تحلیلی کاتالیزی ریزمخفظه با در نظر گرفتن دمای دیواره ثابت توسعه داده شده‌اند. قاضی‌زاده و همکاران [۷]، اهمیت نسبی واکنش‌های همگن و غیرهمگن کاتالیزی در اکسیداسیون هیدروژن با شارهای ورودی جرمی، نسبت اکی‌والان و ارتفاع‌های محفظه مختلف را درون ریزمخفظه صفحه‌ای بررسی کردند. نتایج این مطالعه عددی نشان می‌دهد که در دماهای نسبتاً پایین تأثیر واکنش‌های کاتالیزی سطحی بر واکنش‌های همگن اکسیداسیون هیدروژن غالب است. یان و همکاران ایشان [۸] به بررسی مطالعات تحلیلی و تجربی در زمینه مشخصه‌های حرارتی اکسیداسیون متان تحت تأثیر دیواره کاتالیستی رادیم پرداختند.

در این مطالعه نتایجی در زمینه تأثیرات عدد نادسن، شار مومنتوم و فاکتورهای تصحیح انرژی حرکتی نشان داده شده است. هتیاراچی در مرجع [۹]، به صورت عددی به بررسی پدیده انتقال حرارت و جریان لغزشی در محفظه مستطیلی با دمای دیواره ثابت و جریان توسعه‌یافته با روش حجم کنترلی پرداختند. این مطالعه بیان می‌کند که درون میکروکانال اگر عدد نادسن کوچک‌تر از ۰/۰۱ باشد سیال در محیط پیوسته، وقتی که این عدد بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ باشد سیال درون رژیم سرش و هنگامی که این عدد بزرگ‌تر از ۰/۱ باشد رژیم جریان گذار خواهد بود. نتایج این مطالعه 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. مطابق با این مطالعه در شرایط دیگر ریزمخفظه محدوده رژیم حاکم بر جریان در مطالعه‌های بعدی می‌تواند مورد بررسی قرارگیرد. بررسی ستین و همکارانش در مرجع [۱۰]، انتقال حرارت در میکرو لوله‌ها و میکرو کانال‌های دوبعدی را با فرض جریان لغزشی و صرف نظر از هدایت محوری برای حالت‌های دما ثابت و شار حرارتی ثابت بررسی کردند. شجاعیان و دیباجی در مرجع [۱۱]، جریان لغزشی آرام در یک میکروکانال مستطیلی را به روش حجم محدود بررسی کردند.

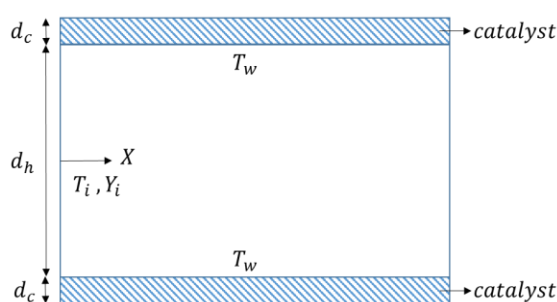
این مطالعه نشان می‌دهد که وابستگی بین ضریب اصطکاک کاملاً توسعه یافته با عدد ناسن و ضریب هندسی وجود دارد. همچنین آن‌ها اثرات رقیق شدن سیال را روی عدد ناسلت نیز آزمایش کردند. کولین در مرجع [۱۲]، انواع روش‌های تحلیلی و عددی را برای مطالعه جابه‌جایی در میکروکانال‌ها مرور کرده است. در این مطالعه اثرات رقیق شدن سیال تحت شرایط مرزی شار و دما ثابت بررسی شده و جمله‌های هدایت و اتلاف لزجت تحت تأثیر این کمیت‌ها مشخص شده است. در مرجع [۱۳] نشان می‌دهد که واکنش غیرهمگن کاتالیزی سبب ایجاد رخدادهای غیرهمگن درون جریان واکنشی می‌شوند. بنابراین برای مدل‌سازی چنین مسائلی حل‌های مختلف انتقال حرارت و غیر همگن کاتالیزی انجام شده که از مهمترین این مسائل می‌توان به تحقیق آپل و همکاران [۱۴] و وانگ و همکاران [۱۵] اشاره کرد.

در مراجع [۱۶] و [۱۷] بررسی تحلیلی ریزمحفظه‌های کاتالیزی بدون در نظر گرفتن تأثیرات پرش حرارتی و جرمی انجام شده است. این مطالعه‌های تطبیق کاملی بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی درون ریزمحفظه‌های سطحی را نشان نداده‌اند. در مطالعه‌های قبلی اکثر حل‌ها عددی بوده و به طور کارا نمی‌توانند به بررسی پارامتریک و جزء به جزء مسئله میکرو در شرایط مختلف دمایی - حرارتی بپردازند. همچنین یکی از مهم‌ترین نقص‌های این مدل‌ها عدم بررسی دقیق تأثیر پرش مرزی در این مسائل بوده است. در مطالعه حاضر به بررسی تحلیلی دو بعدی جریان درون ریزمحفظه در رژیم‌های مختلف می‌پردازد و محدوده عدد ناسن برای جواب دقیق‌تر را معرفی می‌کند. سپس تأثیر تغییرات عدد ناسن، ضرایب لغزش و پرش حرارتی و سایر پارامترهای هندسی در محدوده دقیق‌تر عدد ناسن پیش‌بینی شده است.

۲- مشخصات مقاله

۲-۱- مدل فیزیکی

برای بررسی جریان یک بعدی تحت تأثیر پرش حرارتی و جرمی ریزمحفظه‌ای مشابه با شکل (۱) در نظر گرفته شده است. 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 ۰/۱ میلی‌متر، دمای آن با دمای دیواره یکسان در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱- هندسه مدل فیزیکی ریزمحفظه کاتالیزی

مخلوط هیدروژن 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 غیرواکنشی بوده و تحت تأثیر واکنش‌های غیرهمگن کاتالیزی سطحی نیز قرار خواهد گرفت. به طور کلی قطر محفظه، قطر هیدرولیکی نامیده شده که مقدارش برابر با d_h بوده و بنابراین مقطع ریزمحفظه می‌تواند اشکال غیردایروی با قطر هیدرولیکی مشخص شده داشته باشند. طول L و قطر ریزمحفظه d_h از مرتبه ۱۰۰۰ میکرومتر یا کمتر در نظر گرفته شده‌اند و همچنین طول محفظه میکروی مورد بررسی همواره معادل با ۱۰ برابر عرض آن است. مقادیر چگالی با توجه به مخلوط هیدروژن هوا به صورت ثابت محاسبه شده اما مقدار ویسکوزیته در هر نقطه از ریزمحفظه برحسب متوسط دمای بین دیواره و مرکز آن به دست آمده و در فرآیند سعی و خطایی با تصحیح حل دقیق تر می‌شوند. مهمترین فرضیات مطالعه حاضر شامل جریان آرام، ظرفیت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی وابسته به دما و ثابت بودن دما در دیواره می‌باشند.

۲-۲- مدل ریاضی و حل

واکنش غیرهمگن کاتالیزی سطحی سبب ایجاد دو اثر شامل انتقال حرارت به جریان و مصرف جرم مخلوط می‌شود. بنابراین معادلات اصلی این مسئله به کمک در نظر گرفتن یک حجم کنترل درون محفظه یک‌بعدی به دست آمده‌اند. در این حجم کنترل میزان خالص انتقال حرارت هدایت و همرفت توده‌ای سیال با مقدار انتقال حرارت از دیواره کاتالیزی برابر قرار داده می‌شود. بررسی این مسئله در عدد نادسن کوچک‌تر از ۰/۱ انجام شده جایی که مطابق با [۹] جریان در رژیم پیوسته یا سرش قرار دارد. معادلات حاکم بر این مساله میکرو مشابه با ابعاد ماکرو است اما برای بررسی تأثیرات دیواره می‌بایست از شروط مرزی پرش حرارتی و جرمی نیز کمک گرفت. همچنین مسئله مزبور یک مسئله ریاضی با مشتقات جزئی نسبت به جهت‌های x و y در دو معادله حرارتی و جرمی است. اما با توجه به حل شبه دوجبه‌ای تحلیلی تأثیرات نفوذ سطحی کاتالیزی از طریق شار حرارتی وارد مسئله شده و عبارات مربوط به جهت عرضی با تقریب خوب صرف‌نظر شده‌اند بنابراین معادلات انرژی و کسر مولی در جهت جریان غیر واکنشی به صورت زیر قابل بیان می‌باشند:

$$kA_c \frac{d^2T}{dx^2} - \rho C_p U A_c \frac{dT}{dx} + hp(T_w - T) = 0 \quad (1)$$

$$-D_{H_2/air} A_c \frac{d^2y}{dx^2} + U A_c \frac{dy}{dx} + h_m p (y - y_s) = 0 \quad (2)$$

در رابطه بالا A_c سطح عرضی ریزمحفظه و p محیط خیس شده جریان در ریزمحفظه است که این دو کمیت از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$A_c = \frac{\pi d_h^2}{4}, \quad p = \pi d_h \quad (3)$$

شرایط مرزی معادلات بالا در راستای جریان شامل دما و کسر مولی ورودی ثابت مخلوط و شیب صفر در انتهای منحنی‌های دما و کسر مولی، در معادله (۴) و (۵) به صورت زیر نوشته شده است:

$$T(x=0)=T_i, \quad \frac{dT}{dx}(x=L)=0 \quad (۴)$$

$$y(x=0)=Y_i, \quad \frac{dy}{dx}(x=L)=0 \quad (۵)$$

برای محاسبه ضرایب جابه‌جایی حرارتی و جرمی از رابطه پرش، شار ورودی حرارتی و جرمی مربوطه در مرز-های حجم کنترل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T - T_w = -\xi_t L \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=z_w} \quad (۶)$$

$$y - y_s = -\xi_m L \left. \frac{\partial y}{\partial z} \right|_{z=z_w} \quad (۷)$$

در معادله بالا z مختصات عمود بر حرکت جریان داخل ریزمحفظه می‌باشد. همچنین $D_{H_2/air}$ ضریب نفوذ مولکولی برای نفوذ سوخت درون هوا می‌باشد که از معادله فلر^۱ [۱۳] برای گونه‌های هیدروژن و هوا به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D_{H_2/air} = \frac{1.013 \times 10^{-2} T^2 \left(\frac{1}{M_{H_2}} + \frac{1}{M_{air}} \right)^{0.5}}{P \left[(v_i)_{H_2}^{1/3} + (v_i)_{air}^{1/3} \right]^2} \quad (۸)$$

با مقایسه روابط محاسبه ضریب جابه‌جایی در حالت پایه با دو رابطه پرش حرارتی در معادله (۶) و جرمی در معادله (۷)، مقادیر ضرایب جابه‌جایی حرارتی و جرمی به صورت زیر در می‌آیند:

$$h = \frac{k}{\xi_t L} \quad (۹)$$

$$h_m = \frac{D_{H_2/air}}{\xi_m L} \quad (۱۰)$$

مقادیر ضرایب پرش حرارتی و جرمی در معادله‌های بالا به ترتیب از روابط (۱۱) و (۱۲) به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\xi_t = \frac{2 - F_t}{F_t} \cdot \frac{2\gamma}{1 + \gamma} \cdot \frac{kn}{Pr} \quad (۱۱)$$

$$\xi_m = \frac{2 - F_m}{F_m} \cdot \frac{kn}{Sc} \quad (۱۲)$$

کمیت‌های Pr و Sc در این معادلات به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}, \quad Sc = \frac{\mu}{\rho D_{H_2/air}} \quad (۱۳)$$

^۱Fuller equation

برای بی‌بعد سازی از تعاریف کمیت‌ها با هدف به وجود آوردن دمایی دربرگیرنده دماهای درون محفظه و ورودی و دیواره آن، کمیت جرمی دربرگیرنده کسر جرمی درون و ورودی محفظه و مختصات شامل مختصات عمومی و قطر هیدرولیکی محفظه استفاده می‌شود. کمیت‌های بی‌بعد مورد نظر عبارتند از:

$$\theta = \frac{T_w - T}{T_w - T_i}, X = \frac{x}{d_h}, Y = \frac{y}{Y_i}, Y_s = \frac{y_s}{Y_i} \quad (14)$$

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

بنابراین با تعاریف بالا، معادلات بی‌بعد بقای انرژی و کسر مولی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$-\frac{d^2\theta}{dX^2} + Pe \frac{d\theta}{dX} + 4Nu\theta = 0 \quad (15)$$

$$-\frac{d^2Y}{dX^2} + Pe_m \frac{dY}{dX} + 4Sh(Y - Y_s) = 0 \quad (16)$$

شرایط مرزی بی‌بعد شده این معادلات با توجه به معادلات (۴) و (۵) به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\theta(X=0) = 1, \frac{d\theta}{dX} \left(X = \frac{L}{d_h} \right) = 0 \quad (17)$$

$$Y(X=0) = 1, \frac{dY}{dX} \left(X = \frac{L}{d_h} \right) = 0 \quad (18)$$

همچنین مقادیر اعداد پکلت حرارتی و جرمی در معادله بالا از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$Pe = Re.Pr, Pe_m = Re.Sc \quad (19)$$

علاوه بر این با توجه به تعاریف معادلات (۶)، (۷)، (۹)، (۱۰) و (۱۴) برای اعداد ناسلت و شروود رابطه محاسبه این دو کمیت نهایتاً به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Nu = \frac{1}{\xi_t}, Sh = \frac{1}{\xi_m} \quad (20)$$

همچنین برای به دست آوردن مدل غیرلغزشی معادله‌های محاسبه عدد ناسلت و شروود از مدل لغزشی - پرشی در معادله (۲۰) با معادلات پایه جریان غیرلغزشی درون ریزمحفظة در معادله (۲۱) به صورت زیر جایگزین می‌شود:

$$Nu = 3.66 \left[1 + 0.095 \left(\frac{d_h}{L} \right) Pe \right]^{0.45}$$

$$Sh = 3.66 \left[1 + 0.095 \left(\frac{d_h}{L} \right) Pe_m \right]^{0.45} \quad (21)$$

همچنین میزان نرخ مصرف سوخت از مقدار شار جرمی نفوذی به سمت دیواره به صورت زیر به دست می‌آید:

$$W_c = h_m C_b (y - y_s) \quad (22)$$

که در معادله بالا C_b دانسیته مولی مخلوط است. علاوه بر این نرخ مصرف سوخت از طریق نرخ واکنش

غیرهمگن کاتالیزی، k_c ، به کمک رابطه زیر نیز قابل محاسبه است:

$$W_c = k_c C_b y_s \quad (23)$$

بنابراین از برابری معادلات محاسبه نرخ مصرف سوخت (۲۱) و (۲۲) رابطه بی‌بعد بین کسر مولی سطحی و کسر مولی درون محفظه به صورت زیر می‌تواند بیان شود:

$$Y_s = \frac{S}{S+1} Y, \quad S = \frac{h_m}{k_c} \quad (24)$$

در این رابطه S برابر با نسبت ضریب انتقال جرم جابه‌جایی به نرخ واکنش غیرهمگن کاتالیزی می‌باشد. اندازه کسر مولی سطحی در ابتدای محفظه برابر صفر در نظر گرفته می‌شود و بنابراین شرط مرزی بی‌بعد مربوط به این کمیت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Y_s(X=0) = 0 \quad (25)$$

عموماً بیان نرخ واکنش غیرهمگن کاتالیزی برای مخلوط سوخت-هوا با قانون آرنهیوس^۱ به دست می‌آید. میزان این نرخ برای مخلوط هیدروژن-هوا روی کاتالیز پلاتینیوم از مدل مارینف [۱۴] به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$k_c = 1.8 \times 10^{13} \exp\left(\frac{-146400}{RT_w}\right) \quad (26)$$

با توجه به معادلات بالا نهایتاً جواب معادلات بی‌بعد (۱۵) و (۱۶) با توجه به شرایط مرزی مربوطه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \theta &= C_1 \exp(C_3 X) + C_2 \exp(C_4 X) \\ C_1 &= \frac{C_4 \exp(C_4 L / d_h)}{C_4 \exp(C_4 L / d_h) - C_3 \exp(C_3 L / d_h)} \\ C_2 &= 1 - C_1 \\ C_3 &= \frac{-Pe + \sqrt{Pe^2 + 16Nu^2}}{2} \\ C_4 &= \frac{-Pe - \sqrt{Pe^2 + 16Nu^2}}{2} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} Y &= C_{1m} \exp(C_{3m} X) + C_{2m} \exp(C_{4m} X) \\ C_{1m} &= \frac{C_{4m} \exp(C_{4m} L / d_h)}{C_{4m} \exp(C_{4m} L / d_h) - C_{3m} \exp(C_{3m} L / d_h)} \end{aligned}$$

¹Arrhenious equation

$$C_2 = 1 - C_1$$

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

$$C_{4m} = \frac{-Pe_m - \sqrt{Pe_m^2 + 16Sh^2}}{2} \quad (28)$$

برای محاسبه میزان سوخت مصرف‌شده، Y_C از تعریف بی‌بعد زیر استفاده می‌شود:

$$Y_C = \frac{Y_i - y}{Y_i} \quad (29)$$

جایی که با در نظر گرفتن تعاریف کمیت‌های بی‌بعد میزان مصرف سوخت می‌تواند به صورت زیر به دست آید:

$$Y_C = 1 - Y \quad (30)$$

۳- نتایج

۳-۱- بحث و نتیجه‌گیری

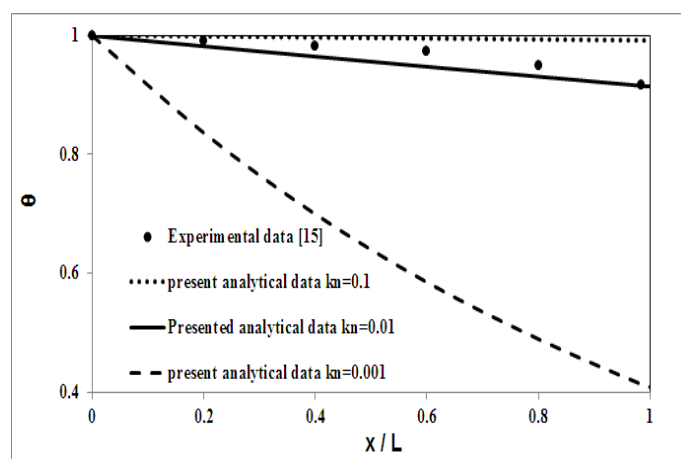
در این مطالعه به بررسی جریان با واکنش غیرهمگن کاتالیزی سطحی درون یک ریزمحفظه با توجه به شروط مرزی پرش حرارتی و جرمی پرداخته شد. مطابق با [۱۱] در مسئله ریزمحفظه اگر عدد نادسن کوچک‌تر از ۰/۰۱ باشد سیال در محیط پیوسته، وقتی که این عدد بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ باشد سیال درون رژیم سرش و هنگامی که این عدد بزرگ‌تر از ۰/۱ باشد رژیم جریان گذار خواهد بود. بنابراین بررسی این مطالعه 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 حرارتی و جرمی نیز کمک گرفت.

مقادیر عدد ناسلت و شروود با توجه به دست آمدن مقدار دقیق عدد نادسن برابر با ۰/۰۱ با توجه به رژیم جریان بر حسب پارامترهای لغزش سیالی و پرش حرارتی مطابق با معادله (۲۰) به دست آمده‌اند و در مقاله حاضر تأثیرات پارامترهای لغزش سیالی و پرش حرارتی از طریق پارامترهای موجود در معادله‌های (۱۱) و (۱۲) در شکل‌های (۵) تا (۱۱) مورد بررسی قرار گرفته است. دمای ورودی به محفظه همواره برابر با ۳۰۰ درجه کلون است اما سرعت ورودی در مقادیر مختلف عدد رینولدز تغییر کرده و در محدوده ۵ تا ۴۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. برای بررسی این حل در شکل (۲) تغییرات دمای بی‌بعد بر حسب طول بی‌بعد محفظه در سه مقدار مختلف عدد نادسن برابر با ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۱ با مقادیر گزارش شده آزمایشگاهی از [۱۵] مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود مقادیر مربوط به عدد نادسن برابر با ۰/۰۱ در کلیه نقاط بیشترین نزدیکی با داده‌های آزمایشگاهی را داشته‌اند. همچنین در این عدد نادسن حداکثر خطای ۲/۵۴ درصد نسبت به داده‌های آزمایشگاهی وجود داشته در حالی که برای عدد نادسن برابر با ۰/۱ حداکثر خطای ۷/۴۴ درصد دیده می‌شود. علاوه بر این به طور کلی در اعداد نادسن بسیار پایین نتایج از مقادیر واقعی فاصله گرفته جایی که مطابق با نمودار در عدد نادسن برابر با ۰/۰۰۱ حداکثر خطایی در حدود ۸۳/۳۳ درصد مشاهده می‌شود.

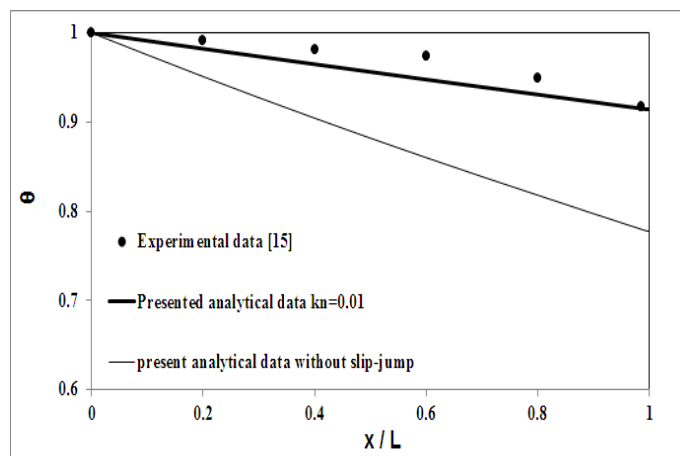
همچنین در سایر اعداد نادسن در محدوده ۰/۰۱ تا ۰/۱ بیشتر جوابها به سمت ناحیه نادسن بالاتر منطبق شده و بنابراین بهترین نتایج مدل تحلیلی در مسئله حاضر در عدد نادسن برابر با ۰/۰۱ به دست می‌آید. بنابراین مدل لغزش با توجه به تطابق نتایج با مقادیر آزمایشگاهی [۱۵] دارای خطای قابل قبولی بوده و نیز عدد نادسن مربوط به مسئله ریزمحفظه کاتالیزی حاضر در تحلیل لغزش می‌بایست برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شود. جهت بیان دقیق‌تر اهمیت مدل حاضر، در شکل (۳) مقایسه بین نتایج مدل غیرلغزشی و مدل لغزشی با عدد نادسن برابر با ۰/۰۱ ارائه شده است. برای به دست آوردن مدل غیرلغزشی معادله‌های محاسبه عدد ناسلت و شروع از مدل لغزشی در معادله (۲۰) با معادلات پایه جریان غیرلغزشی درون ریزمحفظه در معادله (۲۱) جایگزین شده است.

همان طور که در این شکل دیده می‌شود داده‌های مدل لغزشی با حداکثر خطای ۲/۵۴ درصد تطابق بهتری را نسبت به حالت غیرلغزشی با حداکثر خطای ۲۶/۶ درصد را نشان می‌دهد و در تک‌تک نقاط نیز می‌توان گفت داده‌های لغزشی-پرشی بسیار نزدیک‌تر از حالت غیرلغزشی به داده‌های آزمایشگاهی هستند. بنابراین بهبود مدل‌سازی و تأثیرپذیری مسئله از نوآوری حاضر، شامل استفاده از مدل لغزشی-پرشی جریان به جای مدل غیرلغزشی، مورد تأیید قرار می‌گیرد.

در شکل (۴) تغییرات دمای بی‌بعد بر حسب طول بی‌بعد ریزمحفظه در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود با توجه به اینکه یک سرعت با پروفیل ثابت در ورودی محفظه برای حالات مختلف در نظر گرفته شده روند تغییرات نمودارها در رینولدزهای مختلف به صورت ثابت می‌باشد. البته با کاهش عدد رینولدز و حرکت در طول ریزمحفظه دمای بی‌بعد کاهش می‌یابد. بیشترین درصد کاهش دمای بی‌بعد در طول محفظه مربوط به عدد رینولدز برابر با ۱۵۰۰ بوده که مقدار آن حدوداً برابر با ۲۷/۰۴ درصد می‌باشد.

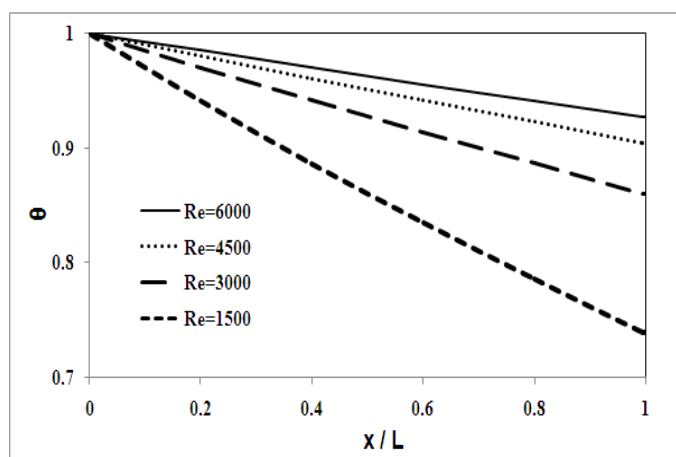


شکل ۲- تغییرات دمای بی‌بعد بر حسب طول بی‌بعد برای نتایج آزمایشگاهی [۱۵] و مقادیر مدل حاضر با اعداد نادسن برابر با ۰/۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ با عدد رینولدز ۵۰۶۹، دمای سطح برابر با ۹۰۰ درجه کلونین

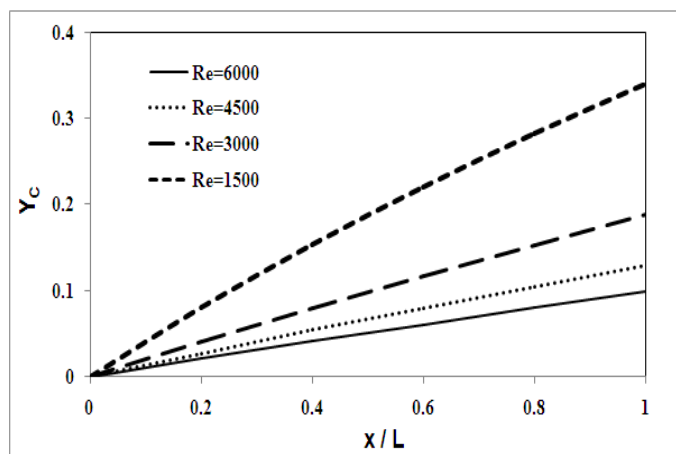


شکل ۳- تغییرات دمای بی بعد بر حسب طول بی بعد برای نتایج آزمایشگاهی [۱۵] و مقادیر مدل حاضر در شرایط لغزش-پرشی با عدد نادسن برابر با ۰/۰۱ و شرایط پایه بدون لغزش و پرش حرارتی در عدد رینولدز ۵۰۶۹ و دمای سطح برابر با ۹۰۰ درجه کلوین

در شکل (۵) تغییرات مصرف سوخت بر حسب طول بی بعد ریزمحفظه در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده‌است. با توجه به اینکه افزایش عدد رینولدز با افزایش سرعت عبور یا قطر محفظه ایجاد می‌شود بنابراین این افزایش منجر به کاهش در میزان مصرف سوخت شده‌است. کمترین و بیشترین مقادیر مصرف سوخت به ترتیب مربوط به اعداد رینولدز برابر با ۱۵۰۰ و ۶۰۰۰ با مقادیری در حدود ۹/۸۷ و ۳۳/۹۹ درصد می‌باشد. همچنین با حرکت در طول محفظه با توجه به مدت زمان بیشتر واکنش کاتالیزی نرخ مصرف سوخت افزایش می‌یابد.



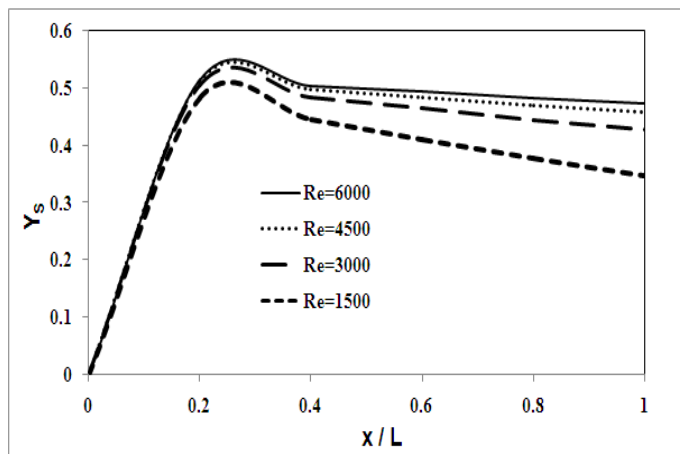
شکل ۴- تغییرات دمای بی بعد بر حسب طول بی بعد برای عدد نادسن برابر با ۰/۰۱، دمای سطح برابر با ۴۰۰ و ضریب پرش حرارتی ۰/۷۵۹ در مقادیر مختلف عدد رینولدز



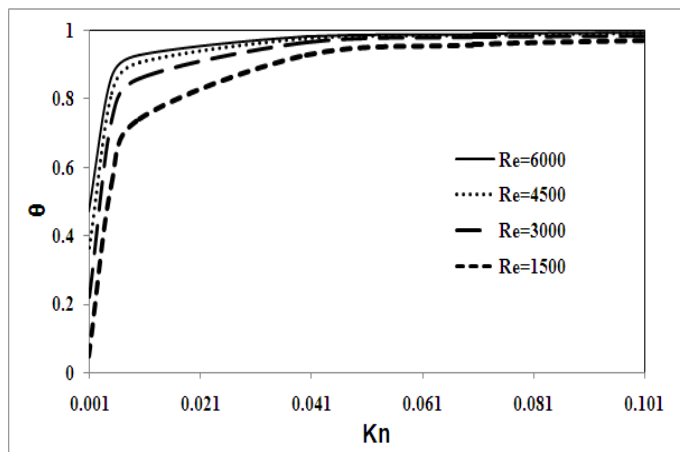
شکل ۵- تغییرات مصرف سوخت بر حسب طول بی بعد برای عدد ناسن برابر با ۰/۰۱، دمای سطح برابر با ۴۰۰ و ضریب پرش جرمی ۰/۷۵۹ در مقادیر مختلف عدد رینولدز

در شکل (۶) تغییرات کسر مولی سطحی بر حسب طول بی بعد ریزمحفظه در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود با افزایش عدد رینولدز میزان کسر مولی سطحی نیز افزایش خواهد یافت. در طول محفظه میزان کسر مولی سطحی در ابتدا به خاطر نفوذ جرمی سوخت به سمت سطح افزایش یافته اما پس از آن به خاطر پیشی گرفتن مصرف کاتالیزی از میزان نفوذ به سمت سطح این کمیت کاهش می یابد. موقعی که نسبت طول بی بعد کوچکتر از ۰/۲ است مقدار کسر مولی سوخت با تغییر عدد رینولدز تغییرات بسیار کمی دارد که این امر به دلیل نسبت برابر نفوذ و مصرف جرم می باشد. در شکل (۷) تغییرات دمای بی بعد بر حسب عدد ناسن در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده است. با افزایش عدد ناسن از مقدار حداقلی ۰/۰۰۱ تا ۰/۱، در انتهای محفظه، همواره در همه مقادیر عدد رینولدز دمای بی بعد افزایش خواهد یافت. نرخ این افزایش در ابتدا وقتی که عدد ناسن بین ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱ باشد بسیار زیاد بوده و سپس در مقادیر عدد ناسن بزرگتر از ۰/۰۱ مقدار متوسطی به خود گرفته و نهایتاً برای مقادیر بیشتر از ۰/۱ یک روند ثابت افزایشی را خواهد داشت و این رخداد نشان دهنده این است که برای مقادیر عدد ناسن مختلف به طور معمول بسته به نوع کاربرد میکروکانال می بایست رنج کاربردی را در محدوده بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ در نظر گرفت. افزایش عدد رینولدز در محدوده عدد ناسن بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ بیشترین تأثیرات را بر دمای بی بعد داشته و همواره مشابه با اشکال (۲)، (۳) و (۴) سبب افزایش دمای بی بعد می شود.

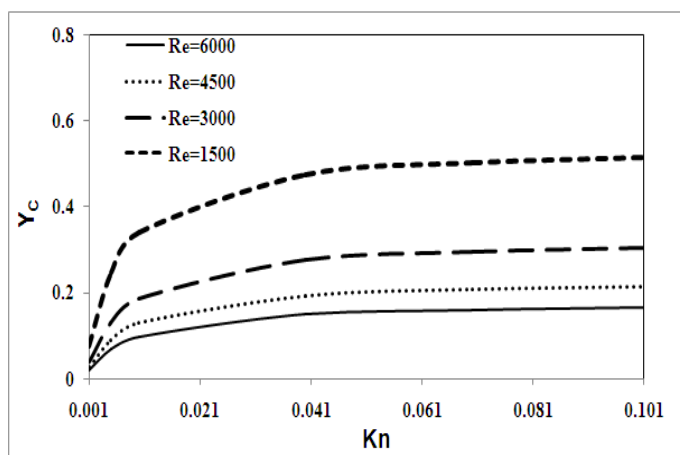
در شکل (۸) تغییرات مصرف سوخت بر حسب عدد ناسن در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده است. مطابق این شکل با افزایش عدد ناسن همواره میزان مصرف سوخت افزایش یافته در حالی که نرخ این افزایش در عدد ناسن کوچکتر از ۰/۰۴ بسیار شدید بوده و در مقادیر بین ۰/۰۴ تا ۰/۰۴ کاهش یافته و سپس در مقادیر بزرگتر از ۰/۰۴ تقریباً افزایش به صورت خطی و با نرخ کوچک است. افزایش تراکم مولکولی در اعداد ناسن بالاتر سبب افزایش درصد نفوذ جرم به سمت سطح و در نتیجه فعال تر شدن واکنش کاتالیزی و افزایش مصرف سوخت شده است. بیشترین میزان افزایش مصرف سوخت با افزایش عدد ناسن در عدد رینولدز پایین تر رخ داده که حدوداً ۸۰/۰۴ درصد می باشد.



شکل ۶- تغییرات کسر ملی سطحی بی‌بعد برحسب طول بی‌بعد برای عدد نادسن برابر با ۰/۰۱، دمای سطح برابر با ۴۰۰ و ضریب پرش گرمی ۰/۷۵۹ در مقادیر مختلف عدد رینولدز



شکل ۷- تغییرات دمای بی‌بعد برحسب عدد نادسن برای دمای سطح برابر با ۴۰۰، طول بی‌بعد برابر با یک و ضریب پرش حرارتی ۰/۷۵۹ در مقادیر مختلف عدد رینولدز



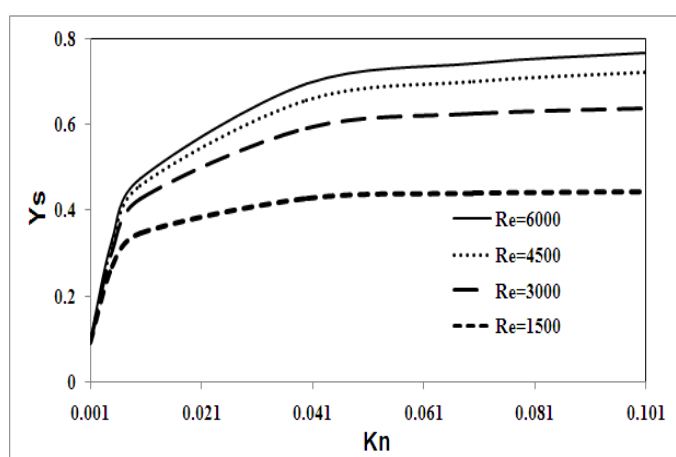
شکل ۸- تغییرات مصرف سوخت برحسب عدد نادسن برای دمای سطح برابر با ۴۰۰، طول بی‌بعد برابر با یک و ضریب پرش گرمی ۰/۷۵۹ در مقادیر مختلف عدد رینولدز

در شکل (۹) تغییرات کسر مولی سطحی بر حسب عدد نادسن در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود 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 می باشد. مقایسه بین شکل های (۸) و (۹) نشان می دهند 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 جای گیری جرم روی سطح می باشد. البته با افزایش عدد رینولدز میزان کسر مولی سطحی افزایش یافته اما میزان مصرف سوخت کاهش یافته است.

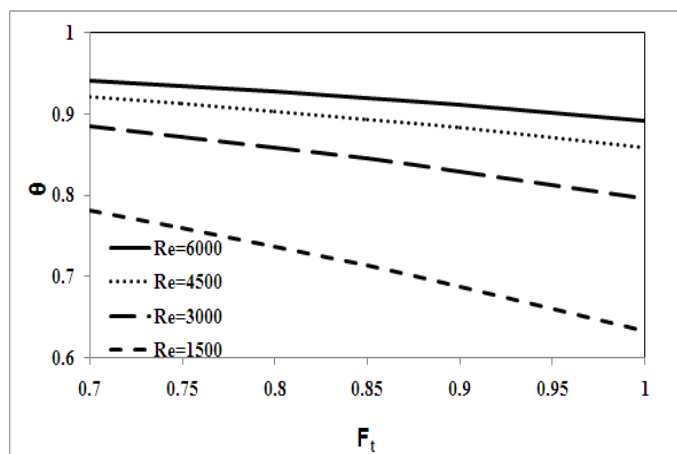
این امر نیز به دلیل امکان جای گیری بیشتر جرم روی سطح با نفوذ بیشتر جرم سوختی به سمت سطح بوده جایی که به طور هم زمان نرخ واکنش کاتالیزی با افزایش عدد رینولدز کاهش می یابد. به کمک ضرایب تأثیر پرش حرارتی و جرمی تأثیرات لایه های سیالی میکروکانال به ترتیب روی انتقال حرارت و جرم درون مخلوط واکنشی نشان داده می شود.

افزایش این پارامترها در رینولدزهای کمتر به خاطر لایه ای بودن جریان تأثیرات بیشتری داشته اما در جریان های با رینولدزهای بالاتر به دلیل وجود گردابه ها تأثیرات لایه های سیالی در پدیده حرارتی و جرمی همان طور که در شکل های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) دیده می شود، کاهش می یابد.

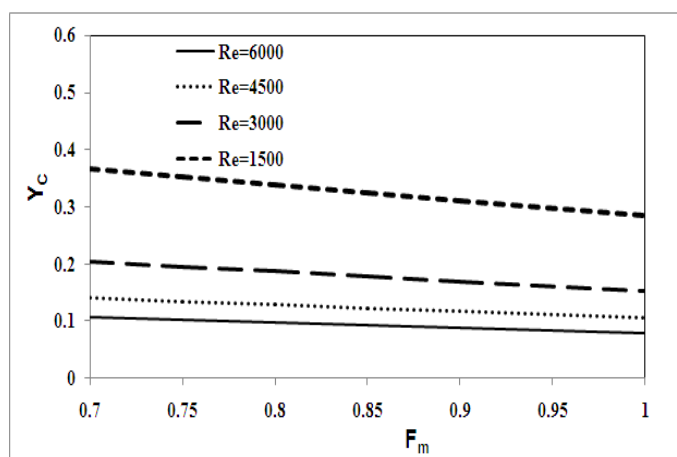
در شکل (۱۰) تغییرات دمای بی بعد بر حسب ضریب تأثیر پرش حرارتی در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده است. مطابق این شکل با افزایش این ضریب مقدار دمای بی بعد کاهش می یابد که حداکثر میزان این کاهش مربوط به عدد رینولدز ۱۵۰۰ با مقدار ۱۷/۹۵ درصد می باشد. در شکل (۱۱) تغییرات مصرف سوخت بر حسب ضریب تأثیر پرش جرمی در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده است. مطابق این شکل با افزایش این ضریب مقدار مصرف سوخت کاهش می یابد که حداکثر مقدار این کاهش مربوط به عدد رینولدز ۱۵۰۰ با میزان ۲۳/۳۳ درصد می باشد.



شکل ۹- تغییرات کسر مولی سطحی بی بعد بر حسب عدد نادسن برای دمای سطح برابر با ۴۰۰، طول بی بعد برابر با یک و ضریب پرش جرمی ۰/۷۵۹ در مقادیر مختلف عدد رینولدز



شکل ۱۰- تغییرات دمای بی‌بعد بر حسب ضریب تأثیر پرش حرارتی برای دمای سطح برابر با ۴۰۰، طول بی‌بعد برابر با یک و عدد نادسن برابر با ۰/۰۱ در مقادیر مختلف عدد رینولدز

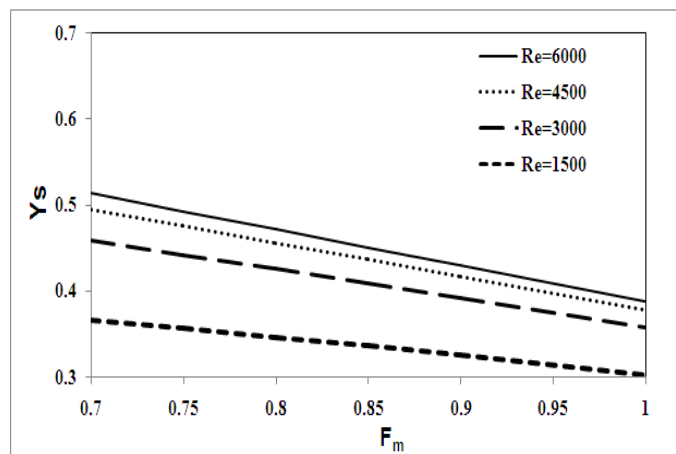


شکل ۱۱- تغییرات مصرف سوخت بر حسب ضریب تأثیر پرش جرمی برای دمای سطح برابر با ۴۰۰، طول بی‌بعد برابر با یک و عدد نادسن برابر با ۰/۰۱ در مقادیر مختلف عدد رینولدز

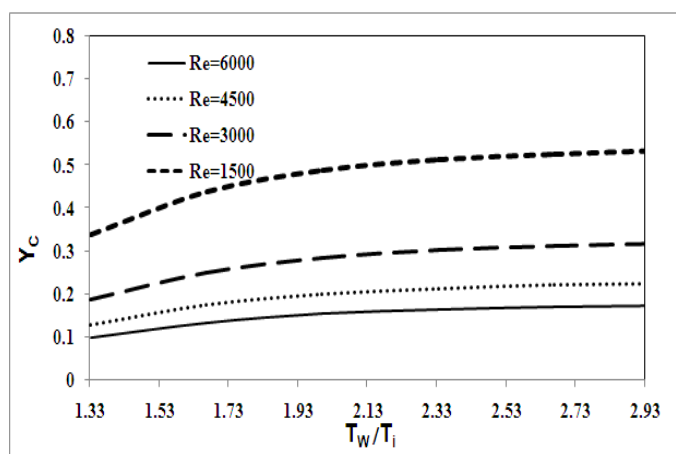
در شکل (۱۲) تغییرات کسر مولی سطحی بی‌بعد بر حسب ضریب تأثیر پرش جرمی در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده‌است. مطابق شکل با افزایش این ضریب مقدار کسر مولی سطحی افزایش می‌یابد که روندی معکوس نسبت به دمای بی‌بعد و مصرف سوخت از خود نشان داده‌است. حداکثر میزان این افزایش مربوط به عدد رینولدز ۱۵۰۰ با مقدار ۱۸/۹۲ درصد می‌باشد.

نسبت دمای دیواره به دمای مخلوط ورودی ریزمحفظه که در واقع تغییرات آن نشان‌دهنده میزان انرژی وارد شده به مخلوط ناشی از واکنش کاتالیزی به انرژی اولیه مخلوط واکنشی می‌باشد، یکی از کمیت‌هایی است که تأثیر در مسئله میکروکانال مهم باشد. در شکل (۱۳) تغییرات مصرف سوخت بر حسب نسبت دمای دیواره به دمای مخلوط در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش این نسبت میزان مصرف سوخت افزایش یافته که این امر به خاطر افزایش شدت انرژی وارد شده نسبت به انرژی اولیه بوده که ناشی از افزایش نرخ واکنش کاتالیزی به وجود آمده‌است. همچنین بیشترین میزان تغییرات مصرف سوخت با این نسبت دما در عدد رینولدز ۱۵۰۰ دیده می‌شود.

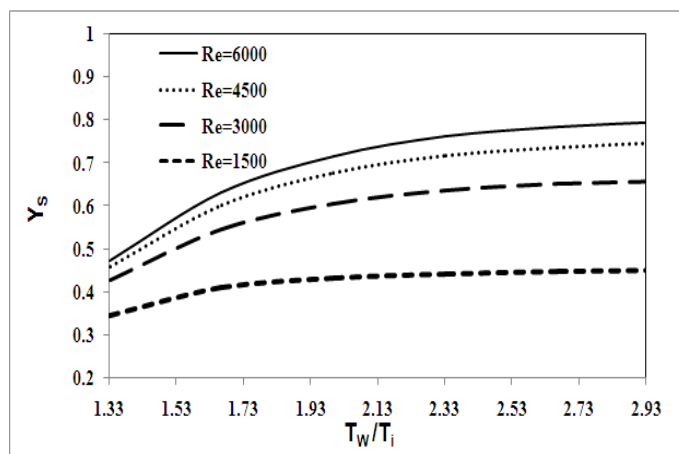
در شکل (۱۴) تغییرات کسر مولی سطحی بی‌بعد بر حسب دمای دیواره به دمای مخلوط ورودی در مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده‌است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش ای نسبت کسر مولی سطحی نیز افزایش می‌یابد در حالی که بیشترین میزان این افزایش مربوط به عدد رینولدز برابر با ۶۰۰۰ به میزان ۴۱/۲۳ درصد می‌باشد. این افزایش به دلیل افزایش انرژی ورودی به ریزمحفظة سیالی ناشی از افزایش نرخ واکنش کاتالیزی می‌باشد.



شکل ۱۲- تغییرات کسر مولی سطحی بی‌بعد بر حسب ضریب پرش جرمی برای دمای سطح برابر با ۴۰۰، طول بی‌بعد برابر با یک و عدد نادسن برابر با ۰/۰۱ در مقادیر مختلف عدد رینولدز



شکل ۱۳- تغییرات مصرف سوخت بر حسب ضریب نسبت دمای سطح به ورودی محفظه برای طول بی‌بعد برابر با یک، عدد نادسن برابر با ۰/۰۱ و ضریب پرش جرمی ۰/۷۵۹ در مقادیر مختلف عدد رینولدز



شکل ۱۴- تغییرات کسر مولی سطحی بی‌بعد برحسب نسبت دمای سطح به ورودی محفظه برای طول بی‌بعد برابر با یک، عدد نادسن برابر با ۰/۰۱ و ضریب پرش جرمی ۰/۷۵۹ در مقادیر مختلف عدد رینولدز

جمع بندی

در این مطالعه به بررسی تأثیرات شروط مرزی پرشی وابسته به رژیم جریان در میکروکانالی با واکنش غیرهمگن کاتالیزی درون مخلوط هیدروژن-هوا پرداخته شد. مهمترین نتایج به دست آمده در این مطالعه 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 ۰/۰۱ در کلیه نقاط بیشترین نزدیکی را با داده‌های آزمایشگاهی دارند.
- داده‌های مدل لغزشی-پرشی با حداکثر خطای ۲/۵۴ درصد تطابق بهتری را نسبت به حالت پایه بدون لغزش و پرش با حداکثر خطای ۲۶/۶ درصد را نشان می‌دهد.
- مطابق با مطالعه‌های انجام شده برای عدد نادسن برابر با ۰/۰۱ حداکثر خطای ۲/۵۴ درصد نسبت به داده‌های آزمایشگاهی وجود داشته در حالی که برای عدد نادسن برابر با ۰/۱ این مقدار به ۷/۴۴ درصد افزایش می‌یابد.
- با حرکت مخلوط در طول ریزمحفظه دمای بی‌بعد آن کاهش می‌یابد که بیشترین درصد این کاهش مربوط به عدد رینولدز برابر با ۱۵۰۰ بوده با مقداری حدود ۲۷/۰۴ درصد می‌باشد.
- موقعی که نسبت طول بی‌بعد کوچکتر از ۰/۲ است مقدار کسر مولی سوخت با تغییر عدد رینولدز تغییرات بسیار کمی دارد که این امر به دلیل نسبت برابر نفوذ و مصرف جرم می‌باشد.
- افزایش عدد رینولدز در محدوده عدد نادسن بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۲ بیشترین تأثیرات را بر دمای بی‌بعد دارد.
- بیشترین میزان افزایش مصرف سوخت با افزایش عدد نادسن در اعداد رینولدز پایین رخ داده که حدوداً ۸۰/۰۴ درصد می‌باشد.
- با افزایش ضریب تأثیر پرش حرارتی دمای بی‌بعد کاهش یافته اما با افزایش ضریب تأثیر پرش جرمی مصرف سوخت کاهش و کسر مولی سطحی افزایش می‌یابد.

با افزایش نسبت دمای سطح به ورودی محفظه، میزان مصرف سوخت افزایش یافته که این امر به خاطر افزایش شدت انرژی وارد شده نسبت به انرژی اولیه ناشی از افزایش نرخ واکنش کاتالیزی است.

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] Fanaee, A., and Esfahani, J. A., "The Investigation of Semi-three-dimensional Heat Transfer Modeling in Micro-combustors", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 3, pp. 1–8, (2011).
- [4] Fanaee, S. A., and Esfahani, J. A., "Two-dimensional Analytical Model of Flame Characteristic in Catalytic Micro-combustors for a Hydrogen-air Mixture", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, pp. 4600–4610, (2014).
- [5] Fanaee, S. A., and Esfahani, J. A., "Analytical Two-dimensional Modeling of Hydrogen-Air Mixture in Catalytic Micro-combustor", *Mechanica*, Vol. 50, pp. 1717–1732, (2015).
- [6] Fanaee, S.A., "The Analytical Modeling of Finite-length Homogenous Micro-combustor for a Hydrogen-Oxygen Mixture with Wall Temperature Effects", *Journal of Mechanics*, Vol. 32, No. 5, pp. 631–642, (2016).
- [7] Qazizade, A., Renksizbulut, M., and Friedman, J., "Contribution of Homogeneous Reactions to Hydrogen Oxidation in Catalytic Microchannels", *Combustion and Flame*, Vol. 159, pp. 784–792, (2012).
- [8] Yan, Y., Pan, W., Zhang, L., Tang, W., Chen, Y., and Li, L., "Numerical Study of the Geometrical Parameters on CH₄/air Premixed Combustion in Heat Recirculation Micro-Combustor", *Fuel*, Vol. 159, pp. 45–51, (2015).
- [9] 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. 51, No. 51, pp. 5088-5096, (2008).
- [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] Shojaeian, M., and Dibaji, A. R., "Three-dimensional Numerical Simulation of the Slip Flow through Triangular Microchannels", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 324-329, (2010).

- [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).
- [13] Hayes, R.E., and Kolaczkowski, 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] Esfahani, J.A., and Fanaee, S.A., "Analytical Modeling of Hydrogen-air Mixture in a Catalytic Micro-channel", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 22, pp. 274-280, (2015).
- [17] 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).

فهرست نمادهای انگلیسی

مساحت سطح عرضی ریزمحفظه، m^2	A_C
چگالی مولی، $mole.m^{-3}$	C_b
ثوابت حل معادلات، $i, i_m = 1, 2, 3, 4$	C_i
گرمای مخصوص در فشار ثابت، $J.kg^{-1}K^{-1}$	C_P
ضریب نفوذ هیدروژن هوا، $m^2.s^{-1}$	$D_{H_2/air}$
ضخامت کاتالیزور پلاتینیوم، m	d_C
قطر هیدرولیکی، m	d_h
ضریب تأثیر پرش حرارتی	F_t
ضریب تأثیر پرش جرمی	F_m
ضریب انتقال حرارت جابجایی، $W.m^{-2}K^{-1}$	h
ضریب انتقال جرم جابجایی، $m.s^{-1}$	h_m
هدایت گرمایی، $W.m^{-1}K^{-1}$	k
نرخ ثابت واکنش کاتالیزور، $m.s^{-1}$	k_C
عدد نادسن	Kn
طول کانال، m	L
وزن مولکولی گونه‌ها	M
عدد ناسلت، hd_h/k	Nu
فشار استاتیکی، atm	P

محیط خیس شده، m	P
عدد پکلت، Ud_h/α	Pe
عدد پرائتل، $\mu/\rho\alpha$	Pr
عدد پکلت جرمی، Ud_h/D_{AB}	Pe_m
ثابت گازها، $J.kg^{-1}K^{-1}$	R
عدد رینولدز، $\rho Ud_h/\mu$	Re
نسبت انتقال جرم جابجایی به نرخ واکنش	S
عدد اشمیت، $\mu/\rho D_{AB}$	Sc
عدد شروود، $h_m d_h/D_{AB}$	Sh
دما، K	T
سرعت جریان، $m.s^{-1}$	U
نفوذ حجمی گونه‌ها	v_i
نرخ مصرف سوخت، $mole.m^{-2}s^{-1}$	W_C
مختصات محوری، m	x
مختصات محوری بی بعد شده	X
کسر مولی سوخت، $mole$	y
کسر مولی سوخت بی بعد	Y
تغییرات مصرف سوخت	Y_C
کسر مولی ورودی سوخت، $mole$	Y_i
مختصات عرضی، m	z
مختصات عرضی بی بعد	Z
نسبت حرارت مخصوص	γ
دمای بی بعد شده	θ
ویسکوزیته دینامیکی، $Ns.m^{-1}$	μ
ضریب پرش حرارتی	ζ_t
ضریب پرش جرمی	ζ_m
چگالی، $kg.m^{-3}$	ρ
	زیرنویس‌ها
هوا	air
هیدروژن	H_2
ورودی	i
جرم	m
دیواره	W

Abstract

In this paper, the analytical investigation of two thermal and mass transfer effects for non-homogeneous catalytic reaction mixture into a micro-channel has been achieved considering the continuous regime properties. In this problem, the Knudsen number is considered smaller than 0.1 where the flow is in the continuous or slip regime. The governing equations are consisting of energy, mole fraction and catalytic conversion where the wall effects have been achieved from thermal and mass jump boundary conditions.

The solution results at three different values of Knudsen number are compared with experimental data, and at all points, when the Knudsen number is equal to 0.01 the best validity by experimental data be available. The results of slip-jump solution, with maximum error of 2.54%, has a better validated experimental values than based modeling data without slip and jump condition, with maximum error of 26.6%. The greatest increase in fuel conversion occurs at low-level Reynolds number, with a value about 80.04%. Increasing thermal jump effect coefficient, normalized temperature reduces while with increase in mass jump effect coefficient, fuel conversion decreases and surface mole fraction increases.