

بررسی تأثیرات شرط مرزی‌های مختلف دیواره بر واکنش پایدار شده کاتالیزی متان/هوا روی سطح پلاتینیوم جهت تولید توان یکنواخت ترموالکتریکی

محمد عباسزاده دربانی^۱ و سید ابوذر فنایی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۲۸	در این کار تأثیر واکنش پایدار شده سطحی کاتالیزی و شرایط مرزی مختلف دیواره برای جریان غیر احتراقی مخلوط متان-هوا درون ریز با ترموالکتریک بررسی شده است. برای حل این مسئله از مدل عددی در حالت پایا و دو بعدی با فرض جریان تراکم ناپذیر با ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته ثابت برای مخلوط متان-هوا استفاده شده است. برای اعتبار سنجی این مدل، تغییرات دمای بدون بعد بر حسب طول بدون بعد ریزمحفظه با داده‌های مقایسه شده که تطابق قابل قبول با حداکثر خطای ۸/۴۵ درصد را نشان می‌دهد. افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی از مقدار ۲ تا ۱۰ وات بر متر کلون سبب کاهش مصرف گرمی متان شده اما با افزایش این ضریب تا مقدار ۲۰ وات بر متر کلون کاهش می‌یابد. در حالت دیواره با ضریب انتقال حرارت ۱۰ با دو برابر کردن سرعت از ۰/۴ به ۰/۸ متر بر ثانیه میزان ولتاژ خروجی ترموالکتریک ۳۷٪ افزایش می‌یابد. با توجه به این که با افزایش سرعت جریان ورودی مخلوط متان-هوا، راندمان در پایه های ترموالکتریک کاهش پیدا می‌کند توان ترموالکتریکی نیز کاهش یافته که تغییرات توان خروجی ترموالکتریک از بیشترین تا کمترین سرعت ورودی برابر با ۷۰٪ می‌باشد.
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰	
واژگان کلیدی: واکنش سطحی کاتالیزی، حل عددی، مخلوط متان-هوا، ولتاژ خروجی، توان ترموالکتریکی.	

مقدمه^۱

امروزه با توجه به نیاز به سیستم‌های تولید انرژی قابل حمل، کاربرد محفظه‌های کاتالیزی در ابعاد میکرو و ماکرو به طور روز افزون در حال افزایش است. استفاده از سطح کاتالیزی در این ریز محفظه‌های واکنشی به دلیل ایجاد پایداری در واکنش‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است که علاوه بر این استفاده از این سطوح موجب ایجاد چگالی انرژی بالاتر در هیدروکربن‌های سوختی شده است. با جلوگیری از اتلافات محفظه به کمک ترموالکتریک‌ها راندمانی که از واکنش مخلوط سوخت و هوا روی سطح کاتالیزی به دست می‌آید می‌تواند افزایش یابد. مطابق با [۱]، ترموالکتریک قابلیت تولید برق از اختلاف دما را داشته و به دلیل عدم آلاینده‌گی سازگار با محیط زیست بوده و

استفاده از آن به عنوان راه حلی برای رفع بحران‌های انرژی و آلودگی مهم می‌باشد. در [۲] بررسی استفاده از صفحات موازی کاتالیزی در ریز محفظه‌ها توسط چن و همکاران با فرض دو بعدی بودن مسئله و برای مخلوط متان-هوا به همراه کاتالیز سطحی پلاتینیوم انجام شده است. در این کار اثرات فضاهای خالی، ضخامت دیواره‌ها و طول پایداری واکنش برای بهینه سازی طراحی محفظه بررسی می‌شود و مشاهده می‌شود که فضای خالی مناسب به سرعت و دبی جریان وابسته است و ضخامت دیواره در مناسب ترین حالت با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. در [۳]، آزمایشی به منظور پیدا کردن دمای یکنواخت روی سطح ریزمحفظه با استفاده از مخلوط سوخت هایی همچون پروپان-هوا و هیدروژن-هوا در نرخ

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: sab.famech@birjand.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی دانشگاه بیرجند
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی دانشگاه بیرجند

و علوم فیزیک، شیمی و علم مواد برای افزایش ضریب ترموالکتریسیته به کار گرفته شده‌اند.

مواد با بازده ترموالکتریکی بالاتر مطابق با [۱۳] به دلیل توسعه تکنیک‌های نوین ساخت به طور گسترده در حال توسعه می‌باشند. ضریب سیبک مربوط به ترموالکتریک‌ها مطابق با [۱۴] نشان‌دهنده انتشار خالص الکترونها از انتهای گرم به سمت انتهای سرد بوده که باعث ایجاد یک میدان الکتریکی بر روی آن می‌شود و به بنابراین افزایش این ضریب جهت به دست آوردن کارایی بالاتر تولید توان برای سیستم ترموالکتریک ضروری می‌باشد. همچنین پیشرفت‌های اخیر در کوچک سازی وسایل مخصوصا در زمینه تولید توان در حالت میکرو [۱۵] و ترکیب آن با ترموالکتریک منجر به اهمیت استفاده تلفیقی از این دو وسیله شده است. شین و همکاران [۱۶]، با استفاده از کاتالیزگر پلاتینیوم در یک اختلاف دمای میانگین ۵۰/۶ کلوین ناشی از منبع حرارتی سیالی بین دو سطح ترموالکتریک توان تولیدی ۱/۹ میکرو وات را گزارش کرده‌اند. امره و دیتسر [۱۷]، مدل‌سازی عددی یک سیستم جدید برای بهبود گرم‌زدایی از اگزوز یک ماشین سواری را توسعه داده‌اند. ژنراتورهای ترموالکتریک استفاده شده بر روی تمام لوله‌های مبدل حرارتی برای تولید برق با اختلاف دما بین طرف‌های داغ و سرد نصب می‌شوند. نتایج این کار نشان‌دهنده این است که با افزایش جریان جرم خروجی اگزوز به میزان ۲۴٪ قدرت تولید سیستم ترموالکتریکی تا ۹۰/۶٪ افزایش می‌یابد. همچنین در کارهای [۱۸] و [۱۹] بررسی تحلیلی یک بعدی جریان واکنشی با واکنش پایدار سطحی و شرط عدم لغزش درون یک ریز محفظه نشان داده شده است. در کار دیگری بررسی عددی [۲۰] جریان غیر واکنشی با در نظر گرفتن تولید توان غیر یکپارچه درون ریزمحفظه با دیواره‌های لغزشی نشان داده شده است. مطابق با این بررسی‌ها واکنش سطحی پایدار مدل‌سازی مسئله را دقیق‌تر کرده در حالی که استفاده از تولید توان غیر یکپارچه دقت محاسبات را کمتر می‌کند.

با توجه به مرور انجام شده تأثیرات شروط مرزی مختلف دیواره محفظه بر جریان غیرواکنشی کاتالیزی به لحاظ ایجاد توزیع یکنواخت دما روی سطح و بررسی توان سیستم ترموالکتریکی ترکیبی و با محاسبات توان یکپارچه بررسی نشده است. بنابراین در این کار تحلیل جریان با کاتالیز سطحی با واکنش‌های پایدار و بررسی میزان تولید

جریان‌های متفاوت توسط فدرکی و همکاران انجام شده است. نتایج این کار نشان می‌دهد که بهره وری و بازده سیستم هنگامی بالاتر می‌رود که مدیریت حرارتی بهبود یابد. در کاری دیگر، لی و همکاران [۴] به بررسی یک مبدل حرارتی صفحه‌ای بخار که با محفظه کاتالیزی یکپارچه شده است پرداخته‌اند تا به میزان انرژی استفاده نشده گاز در هنگام پخش گرمایی دست یابند. نتایج این کار نشان می‌دهد که نسبت کسر حجمی فرآورده‌ها به محصولات یکی از عوامل تعیین‌کننده در میزان اتلافات حرارتی است. مرتو و همکاران [۵] و سینگ و همکاران [۶] به آزمایش‌هایی در زمینه تجزیه و تحلیل اثرات جاگذاری و عمر کاتالیز بر اجزای محفظه و کارایی حرارتی آن در مخلوط غیرواکنشی پروپان-هوا پرداختند. این آزمایشات استفاده بهینه از کاتالیز سطحی با یک توزیع دمای یکنواخت به عنوان یکی از بهترین راه‌ها به عنوان بهبود رانمان حرارتی معرفی شد. چن و همکاران [۷] پایداری واکنش مخلوط متان-هوا را در یک کانال کاتالیزی و با گرمای برگشتی به صورت عددی و با فرض دو بعدی بودن مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق مکان بهینه کاتالیز سطحی مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده می‌شود بیشینه دما از دیوار با رسانندگی حرارتی بالا بیشتر از دمای دیواره با رسانندگی حرارتی کمتر است. در کارهای دیگر [۸]، [۹] و [۱۰] مدل‌سازی‌های عددی شبیه سازی تأثیر هندسه زبری در محفظه درون محفظه و بررسی جریان توأم با واکنش اکسایشی متان در داخل محیط کاتالیست متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. پروفایل‌های سینتیکی اجزاء واکنش و پروفایل درجه حرارت در طول دامنه محاسباتی در این کار به عنوان عوامل اصلی بررسی واکنش‌ها بررسی شده‌اند. در [۱۱] دشموخ و همکاران به بررسی اثرات واکنش کاتالیزی سطحی بر روی احتراق متان-هوا به کمک مدل‌سازی عددی پرداخته‌اند. نتایج این کار نشان می‌دهد که افزایش سرعت جریان سبب کاهش تأثیر واکنش سطحی روی جریان می‌شود. استفاده از مدل‌های چند واکنشی کاتالیزی در چنین مسائلی می‌تواند به کمک نرخ‌ها و ضرایب مطابق با [۱۲] انجام شود. به طور کلی از اختلاف دمای موجود بین دو سطح سرد و گرم ترموالکتریک تولید توان الکتریکی تولید شده که اگرچه بازده تبدیل ترموالکتریک کم است و عمدتاً توسط عملکرد مواد ترموالکتریک محدود می‌شود اما اخیراً تکنولوژی‌های جدید

یک ریزمحفظه با سطوح کاتالیزی قرار گرفته بوده و به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_{k=1}^{K_g} Y_K h_K V_{k,x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sum_{k=1}^{K_g} Y_K h_K V_{k,y} \right) \right) - k \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) = 0 \quad (4)$$

که در معادلات بالا $\rho, \mu, u, v, T, h, Y_K$ به ترتیب برابر با چگالی مخلوط، فشار کل درون ریز محفظه، مؤلفه سرعت در راستای x ، مؤلفه سرعت در راستای y ، لزجت دینامیکی، دما، آنتالپی و ضریب رسانندگی حرارتی می‌باشند. همچنین کمیت‌های Y_K, h_K و V_K به ترتیب کسر مولی، آنتالپی و سرعت ظاهری مربوط به گونه‌ها می‌باشند. در این کار مکانیزم واکنش‌های کاتالیستی مخلوط متان-هوا بر روی سطح پلاتینیوم درون ریز محفظه به صورت چند واکنشی با فرض عدم لغزش در سطوح و واکنش‌های پایدار سطحی مطابق با جدول زیر انتخاب شده است.

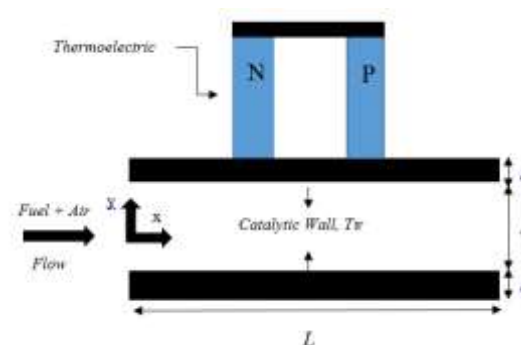
جدول ۱- مکانیزم واکنش کاتالیستی متان-هوا بر روی سطح پلاتینیوم [۱۲]

$H_2 + 2Pt \Rightarrow 2H$	$2H \Rightarrow H_2 + 2Pt$	$O_2 + 2Pt \Rightarrow 2O$
$O_2 + 2Pt \Rightarrow 2O$	$2O \Rightarrow O_2 + 2Pt$	$H_2O + Pt \Rightarrow H_2O$
$H_2O \Rightarrow H_2O + Pt$	$OH + Pt \Rightarrow OH$	$OH \Rightarrow OH + Pt$
$H + O = OH + Pt$	$H + OH = H_2O + Pt$	$OH + OH = H_2O + O$
$CO + Pt \Rightarrow CO$	$CO \Rightarrow CO + Pt$	$CO_2 \Rightarrow CO_2 + Pt$
$CO + O \Rightarrow CO_2 + Pt$	$CH_4 + 2Pt \Rightarrow CH_3 + H$	$CH_3 + Pt \Rightarrow CH_2 + H$
$CH_2 + Pt \Rightarrow CH + H$	$CH + Pt \Rightarrow C + H$	$C + O \Rightarrow CO + Pt$
	$CO + Pt \Rightarrow C + O$	

توان ترموالکتریکی سطحی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. با قرار گرفتن پایه ترموالکتریک منطبق بر سطح بالایی ریزمحفظه یکپارچه در حالتی که ابعاد طولی و عرضی بسیار کوچک است ولتاژ و توان خروجی از این سیستم بررسی و بهترین شرایط توزیع دما تعیین می‌شود.

مدل فیزیکی

مدلسازی مسئله به صورت دو بعدی درون یک محفظه کاتالیزی به طول L و قطر D و ضخامت دیواره t که مخلوط متان-هوا با سرعت U و دمای T وارد آن شده است، انجام می‌شود. روی سطح دیواره کاتالیز سطحی پلاتینیوم قرار دارد و جریان سیال که شامل سوخت و هوا است از سمت چپ ریز محفظه وارد آن می‌شود. در بالای سطح ریز محفظه نیز یک ترموالکتریک با پایه‌های n و p از جنس سیلیسیوم نصب شده است. نمایش مدل فیزیکی این مسئله در شکل (۱) دیده می‌شود. مدل‌سازی این مسئله در حالت پایا و با فرض تقارن محوری نسبت به محور وسطی محفظه انجام شده و فرض بر این است که کارکرد ترموالکتریک به جز دریافت حرارت اضافی ریزمحفظه تأثیر دیگری بر جریان درون آن ندارد.



شکل ۱- توصیف هندسی مسئله

مخلوط متان-هوا با سه سرعت $0.4, 0.8$ و 1.2 متر بر ثانیه وارد محفظه شده است. همچنین طول محفظه برابر با 4 ، قطر آن برابر با 0.4 و ضخامت دیواره کاتالیزی برابر با 0.2 میلی متر می‌باشند. بنابراین جریان ورودی به محفظه در تمامی حالات می‌تواند آرام فرض می‌شود. همچنین جریان مخلوط متان-هوا درون محفظه تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود. علاوه بر این ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته سیال درون محفظه ثابت فرض شده است.

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم در راستای x و y و انرژی در مخلوط متان-هوا که درون

$$\theta = \frac{T_s - T}{T_s - T_i} \quad (10)$$

که در این رابطه T_s ، T_i و T به ترتیب نشان دهنده دمای سطح ریز محفظه، دمای ورودی جریان به ریز محفظه و توزیع دما درون ریز محفظه می‌باشد.

برای بررسی درصد تغییرات کمیت‌ها روی نمودارها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر نیز از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$X = \frac{x_2 - x_1}{x_2} \times 100 \quad (11)$$

که در این رابطه x_2 مقدار بیشینه کمیت روی منحنی و x_1 مقدار کمینه آن می‌باشد.

شرایط مرزی دیواره انتخاب شده در این مسئله شامل انتقال حرارت جابجایی با ضرایب ۲، ۴ و ۱۰ وات متر مربع کلوین، دیواره عایق و دیواره با دماهای ثابت ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ کلوین می‌باشد. همچنین در حالت عایق منظور از شرط مرزی به کار رفته انتقال توزیع دما به طور مستقیم به پایه ترموالکتریک و عایق شدن انتهای بالایی آن می‌باشد. مخلوط متان-هوا با سه سرعت ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ متر بر ثانیه وارد محفظه شده است. همچنین طول محفظه برابر با ۴، قطر آن برابر با ۰/۴ و ضخامت دیواره کاتالیزی برابر با ۰/۲ میلی متر می‌باشند.

نتایج

در این کار با استفاده از یک حل عددی-نرم‌افزاری به بررسی تأثیر تغییرات شروط مرزی روی دیواره بر توزیع دما و جرم روی سطح دیواره و درون ریز محفظه دو بعدی با واکنش سطحی کاتالیزی چند مرحله‌ای پرداخته می‌شود. با قراردادن پایه ترموالکتریک منطبق بر سطح بالایی ریز محفظه از اختلاف دمای ایجاد شده بین سطح پایینی و بالایی آن یک ولتاژ به دست آورد. در این کار هدف مدل‌سازی یک ریز محفظه و به دست آوردن ولتاژ در این ساختار به عنوان بخشی از مجموعه‌های بزرگ‌تر است.

ترموالکتریک از جنس سلیسیوم مطابق با [۱۴] انتخاب شده که ضریب سیبک آن برابر با ۴۴۰ میکرو ولت بر کلوین و ضریب ترموالکتریسیته‌ای برابر با ۰/۷ دارد. مقادیر نفوذ جرمی و ضریب هدایت حرارتی برای مخلوط متان-هوا به ترتیب برابر با 10^{-5} و $2/88 \times 10^{-5}$ متر مربع بر ثانیه و ۰/۴۵۴ وات بر متر کلوین می‌باشند.

برای اعتبار سنجی این مدل، تغییرات دمای بدون بعد θ

محاسبه نرخ واکنش‌های کاتالیزی بالا از رابطه‌نمایی نرخ واکنش به صورت زیر به دست می‌آید:

$$K(T) = AT^b \exp\left(\frac{-Ea}{RuT}\right) \quad (5)$$

که در این رابطه A ، b و Ea به ترتیب ضریب پیش‌نمایی، توان حرارتی و انرژی فعال‌سازی می‌باشند. مقادیر عددی ثوابت این واکنش‌ها مطابق با [۱۲] به دست می‌آید.

همچنین توان خروجی ترموالکتریک قرار گرفته روی سطح ریز محفظه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P = \eta Q \quad (6)$$

جایی که در رابطه بالا Q و η به ترتیب برابر با گرمای انتقال داده شده به پایه‌های ترموالکتریک و بازده ترموالکتریک می‌باشند.

مقدار گرمای انتقال داده شده به سطح ترموالکتریک با توجه به مقدار مساحت سطح مقطع پایه A و ضریب رسانش حرارتی ماده پایه آن K به صورت زیر بدست می‌آید:

$$Q = \int KA \frac{dT}{dy} \quad (7)$$

همچنین مقدار کارآیی ترموالکتریک با توجه به تغییرات دما و میزان توان تولید شده در آن از [۱] به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_h} \times \frac{-1 + \sqrt{1 + Z_T}}{\frac{T_c}{T_h} + \sqrt{1 + Z_T}} \quad (8)$$

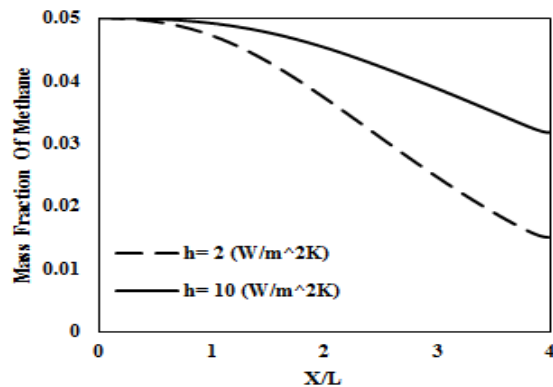
در رابطه بالا ΔT ، T_h و T_c به ترتیب اختلاف دمای طرف گرم و سرد ترموالکتریک، دمای طرف سرد ترموالکتریک و ضریب ترموالکتریسیته ترموالکتریک می‌باشند. علاوه بر این برای محاسبه ولتاژ خروجی ترموالکتریک از رابطه سیبک به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$V = \frac{\int_0^L \alpha (T_x - T_\infty) dx}{L} \quad (9)$$

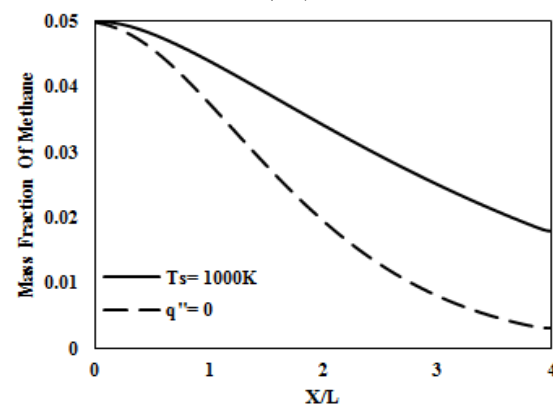
جایی که در رابطه بالا، T_∞ ، L و α به ترتیب دمای محیط، طول ریز محفظه و ضریب سیبک ماده ترموالکتریک می‌باشند.

برای ساده‌سازی بیان حل مسئله دمای بی‌بعد به صورت زیر تعریف می‌شود:

محفظه در شرایط مرزی مختلف مشاهده می‌شود. در امتداد ریز محفظه تغییرات جرمی متان در شرط مرزی دیواره با ضریب انتقال حرارت جابجایی ۱۰ وات بر متر کلون کمترین و برای شرط مرزی دیواره عایق کمترین مقدار خود را دارد که اختلاف کسر جرمی متان بین این دو حالت حداکثر برابر با ۰.۹٪ است. همچنین با کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی، واکنش کاتالیزی فعال‌تر شده و جرم متان در امتداد سطح ریز محفظه دچار تغییرات بیشتری می‌شود.



(الف)

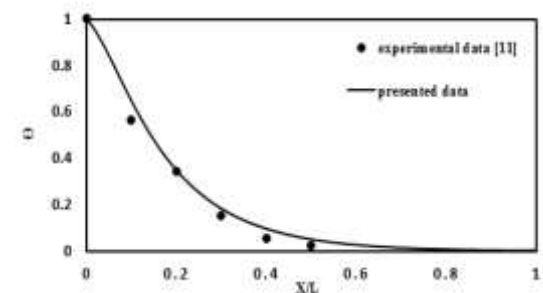


(ب)

شکل ۴- توزیع کسر جرمی متان در سطح کاتالیزی ریز محفظه با قطر ۰/۴ میلی‌متر در سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه (الف) دیواره با ضریب انتقال حرارت جابجایی ۲ و ۱۰ (ب) دیواره عایق و دیواره با دمای ۱۰۰۰ کلون

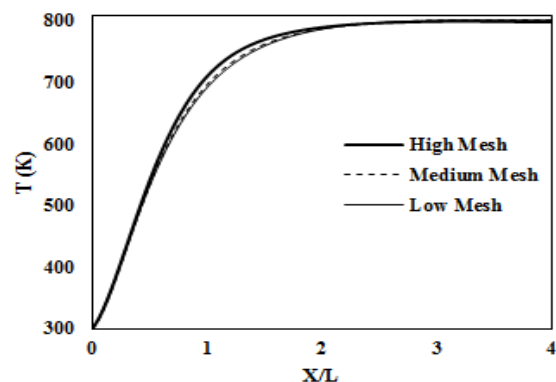
در شکل (۵) تغییرات کسر جرمی متان در خط مرکزی ریز محفظه با سه ضریب انتقال حرارت جابجایی مختلف دیواره در سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه در طول آن نشان داده شده‌است. افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی از مقدار ۲ تا ۱۰ وات بر متر کلون سبب کاهش مصرف جرمی متان شده اما با افزایش این ضریب تا مقدار ۲۰ وات بر متر کلون کاهش می‌یابد. با توجه به شکل بیشترین اختلاف بین نمودارهای کسر جرمی متان در انتهای ریز محفظه بین دو

بر حسب طول بدون بعد ریز محفظه X/L ، با داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده [۱۱] در شرایط مشابه وقتی که دمای دیواره برابر با ۱۰۰۰ کلون است، مقایسه شده‌است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش طول بی بعد، دمای بی بعد در هر دو حل کاهش یافته و نتایج به دست آمده از حل حاضر تطابق قابل قبولی با حداکثر خطای ۰/۴۵٪ نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۲- مقایسه تغییرات دمای بی بعد شده بر حسب طول بی بعد در مرکز ریز محفظه برای حل حاضر و نتایج آزمایشگاهی گزارش شده [۱۱] در دمای دیواره برابر با ۱۰۰۰ کلون

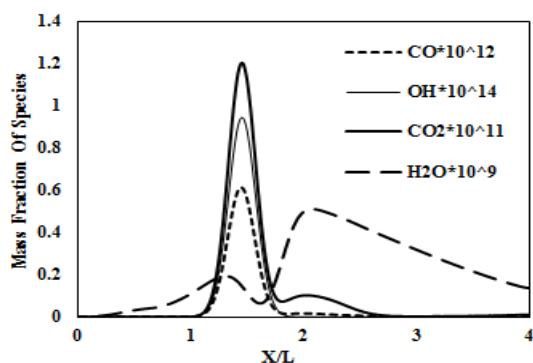
برای تأیید استقلال از شبکه حل عددی حاضر، در شکل (۳) مقایسه بین تغییرات محاسبه شده دما در سه حالت با تعداد شبکه کم، متوسط و بالا با دمای دیواره ۸۰۰ کلون و سرعت ورودی برابر با ۰/۸ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته‌است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، توزیع دما در سه حالت مشخص شده انطباق خوبی با یکدیگر داشته و بنابراین تعداد نقاط شبکه منتخب برابر با مقدار متوسط در نظر گرفته شده‌است.



شکل ۳- توزیع دما در خط مرکزی ریز محفظه با دمای دیواره ۸۰۰ کلون در سرعت ۰/۸ متر بر ثانیه برای سه حالت مش متفاوت با تعداد نقاط شبکه کم (۹۰۶۰۱ نقطه)، متوسط (۱۶۰۸۰۱ نقطه) و بالا (۲۵۱۰۰۱ نقطه)

در شکل (۴) تغییرات جرمی متان در سطح کاتالیزی ریز

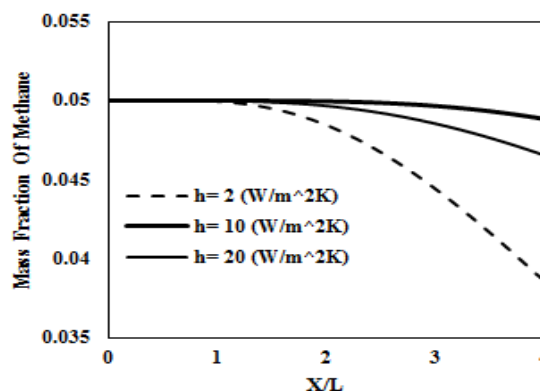
مصرف، مکانیزم های تولیدی با نرخ های بالاتر در بازه ۱/۵ تا ۲/۵ فعال می شوند و نهایتاً مصرف گونه آب تا انتهای محفظه صورت می گیرد. همچنین بر طبق این شکل، کسر جرمی گونه هابه جز آب در طول بی بعد ریز محفظه بزرگ-تر از ۲/۵ به صفر می رسند.



شکل ۷- تغییرات کسر جرمی گونه های واکنشی بر روی سطح ریز محفظه با قطر ۰/۴ میلی متر با ضریب انتقال حرارت جابجایی ۲ وات بر متر کلونین در سرعت ۰/۸ متر بر ثانیه

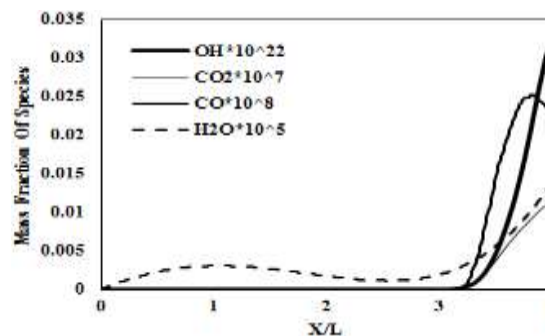
در شکل (۸) تغییرات ولتاژ بر حسب سرعت ورودی جریان با ضریب انتقال حرارت جابجایی دیواره ۱۰ وات بر متر کلونین نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با دو برابر کردن سرعت از ۰/۴ به ۰/۸ متر بر ثانیه میزان ولتاژ خروجی ۳۷٪ افزایش می یابد اما با بیشتر شدن سرعت ولتاژ خروجی حداکثر به میزان ۱۲/۲٪ کاهش می یابد. با افزایش سرعت جریان ورودی حرارت حاصل از واکنش کاهش می یابد و همزمان کسر جرمی متان نیز افزایش پیدا کرده که منجر به کاهش ولتاژ خروجی می شود و این روند در سرعت های بزرگ از ۰/۸ متر بر ثانیه معکوس می شود. تغییرات توان بر حسب سرعت ورودی جریان در شرط مرزی دیواره ضریب انتقال حرارت جابجایی ۱۰ وات بر متر کلونین در شکل (۹) نشان داده شده است. توان خروجی ترموالکتریک متناسب با میزان گرمای انتقال داده شده به پایه های آن می باشد؛ با افزایش سرعت میزان حرارت تولیدی واکنش به دلیل کاهش دما در خط مرکز محفظه کاهش می یابد و در نتیجه توان خروجی ترموالکتریک نیز کاهش خواهد یافت. با توجه به این شکل با افزایش سرعت ورودی از ۰/۴ به ۰/۸ متر بر ثانیه میزان توان خروجی به علت افزایش انتقال حرارت به پایه های ترموالکتریک ۰/۴٪ افزایش می یابد اما با افزایش سرعت از ۰/۸ به ۱/۲ متر بر ثانیه توان خروجی ترموالکتریک به علت کاهش انتقال حرارت به پایه های ترموالکتریک حداکثر ۳۲٪ کاهش می یابد.

دیواره با ضریب انتقال حرارت جابجایی ۲ و ۱۰ وات بر متر کلونین به مقدار ۲۱٪ دیده می شود.



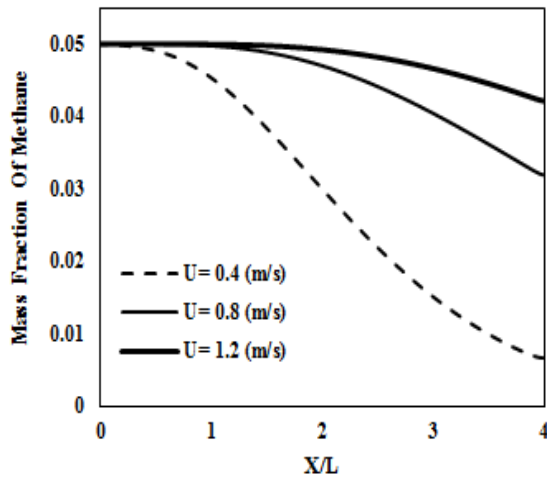
شکل ۵- توزیع کسر جرمی متان در خط مرکزی ریز محفظه با قطر ۰/۴ میلی متر با سه ضریب انتقال حرارت جابجایی دیواره مختلف در سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه

در شکل (۶) تغییرات کسر جرمی گونه های واکنش بر روی سطح ریز محفظه با ضریب انتقال حرارت جابجایی ۱۰ وات بر متر کلونین نشان داده شده است. در این حالت تولید گونه های سطحی به جز آب تنها در طول بی بعد بزرگتر از ۳ مشاهده می شود. همچنین با توجه به شکل با افزایش طول، فرایندهای واکنش سطحی در جهت تولید گونه ها پیش رفته و کسر جرمی گونه های واکنشی افزایش قابل توجهی می یابند.

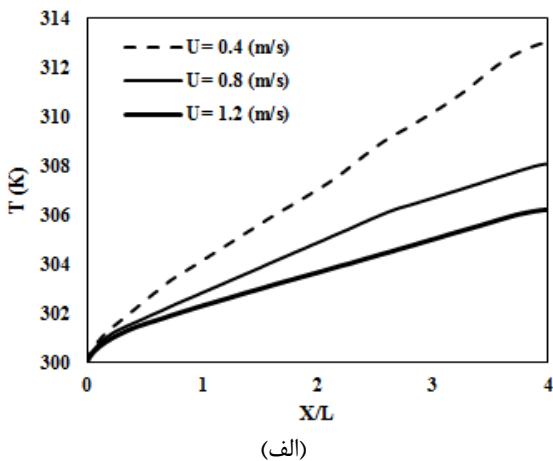


شکل ۶- تغییرات کسر جرمی گونه های واکنشی بر روی سطح ریز محفظه با قطر ۰/۴ میلی متر با ضریب انتقال حرارت جابجایی ۱۰ وات بر متر کلونین در سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه

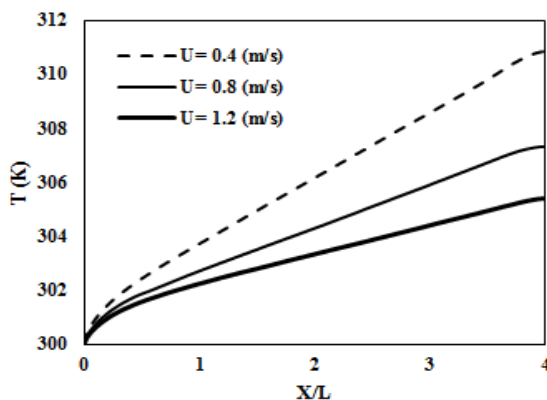
تغییرات کسر جرمی گونه های واکنش بر روی سطح ریز محفظه با ضریب انتقال حرارت جابجایی ۲ وات بر متر کلونین در شکل ۷ مشاهده می شود. در این حالت تولید گونه های سطحی غیر از آب در محدوده طول بی بعد ۰ تا ۱/۵ همواره در حال افزایش بوده و پس از آن کاهش می یابد. در گونه آب در ابتدا مکانیزم های چند واکنشی با نرخ های پایین تر تولید فعال بوده و سپس پس از یک میزان



شکل ۱۰- تغییرات کسر جرمی متان در خط مرکزی ریز محفظه با قطر ۰/۴ میلی متر با شرط مرزی دیواره عایق در سه سرعت مختلف



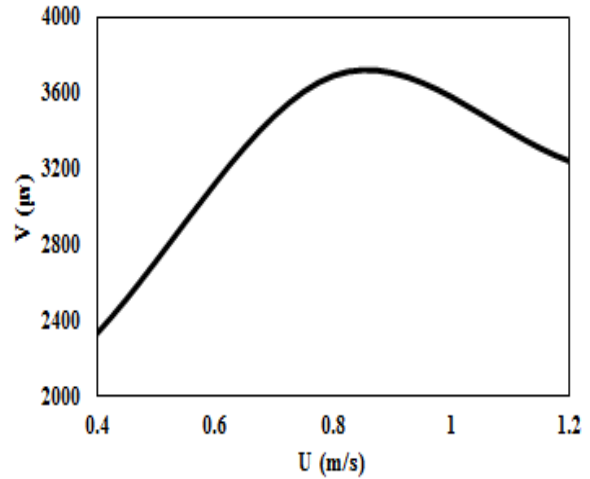
(الف)



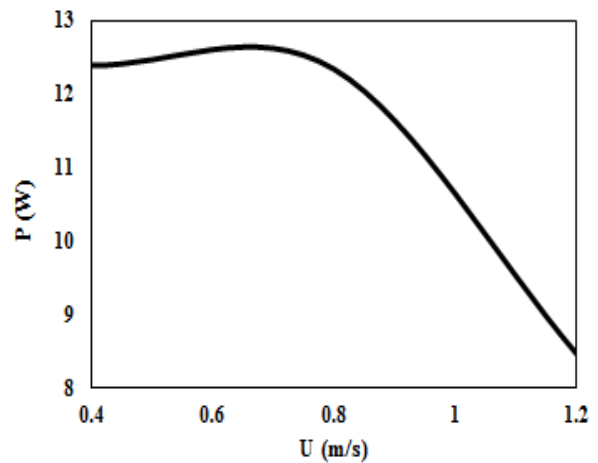
(ب)

شکل ۱۱- توزیع دما بر روی سطح ریز محفظه با شرط مرزی دیواره عایق در سه سرعت مختلف با قطرهای الف) ۰/۴ میلی متر ب) ۰/۵ میلی متر

همان طور که مشاهده می‌شود با کاهش سرعت جریان ورودی، نفوذ حرارتی ناشی از واکنش سطحی کاتالیزی به میانه محفظه بیشتر شده و دما در طول محفظه افزایش



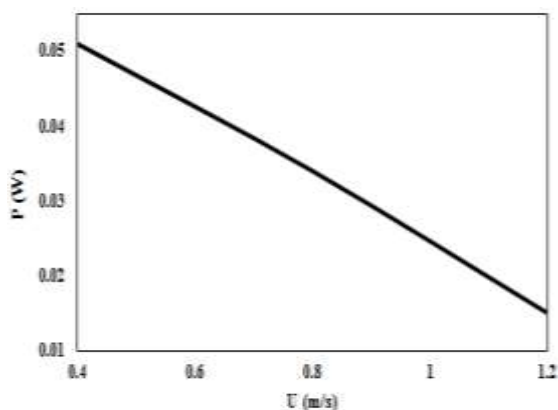
شکل ۸- تغییرات ولتاژ در طول ریز محفظه با قطر ۰/۴ میلی متر بر حسب سرعت ورودی جریان با ضریب انتقال حرارت جابجایی دیواره ۱۰ وات بر مترمربع کلومین



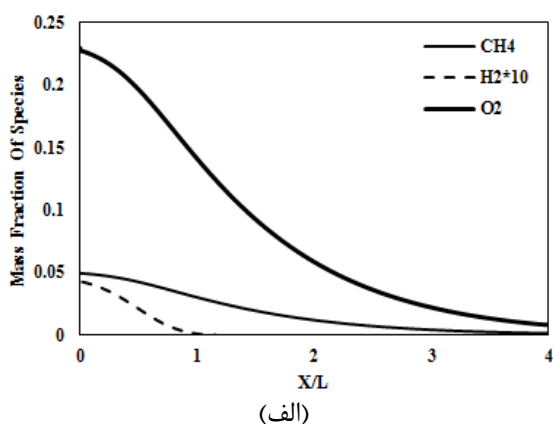
شکل ۹- تغییرات توان در طول ریز محفظه با قطر ۰/۴ میلی متر بر حسب سرعت ورودی با ضریب انتقال حرارت جابجایی دیواره ۱۰ وات بر مترمربع کلومین

در شکل (۱۰) تغییرات کسر جرمی متان در خط مرکزی ریز محفظه با شرط مرزی دیواره عایق با سرعت های متفاوت با قطر ۰/۴ میلی متر نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود به علت زمان ماندن بالاتر بالای مخلوط متان-هوا در سرعت های کمتر گونه متان با افزایش مصرف همراه است. بیشترین اختلاف میزان مصرف جرم متان در انتهای محفظه و بین دو سرعت ۰/۴ تا ۱/۲ متر بر ثانیه با میزان ۰/۸۸٪ می‌باشد.

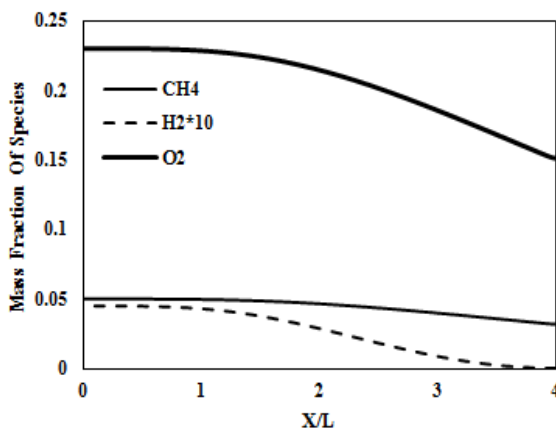
در شکل (۱۱) تغییرات دمای دیواره ریز محفظه بر حسب طول آن برای مقادیر مختلف سرعت ورودی جریان، در شرط مرزی دیواره عایق با قطر ۰/۴ و ۰/۵ میلی متر ارائه شده است.



شکل ۱۳- تغییرات توان ترموالکتریک با شرط مرزی دیواره عایق در سرعت های متفاوت در ریز محفظه با قطر ۰/۴ میلی متر



(الف)

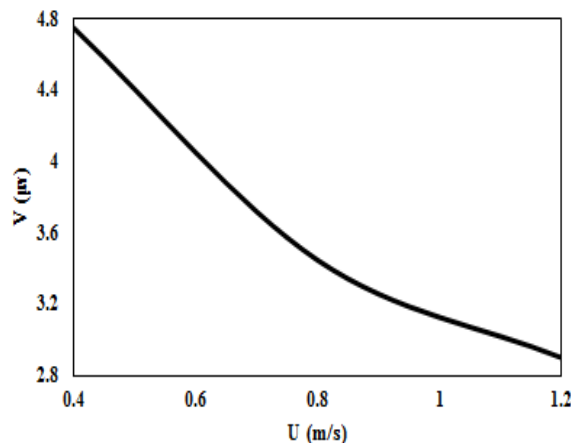


(ب)

شکل ۱۴- تغییرات کسر جرمی گونه های واکنش در خط مرکزی ریز محفظه با قطر ۰/۴ میلی متر در سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه با دیواره با دمای الف) ۶۰۰ کلوین ب) ۱۰۰۰ کلوین همانطور که مشاهده می گردد گونه های متان، هیدروژن و اکسیژن با انجام واکنش با کاتالیزر پلاتینیوم تجزیه شده و کسر جرمی آن ها در طول ریز محفظه کاهش می یابد. با توجه به شکل کسر جرمی گونه اکسیژن و متان در انتهای ریز محفظه در حالت دیواره با دمای ۶۰۰ کلوین نسبت به

می یابد. همچنین کاهش قطر ریز محفظه باعث افزایش انرژی منتقل شده از سطح کاتالیزی به سیال می شود و تغییرات دما در طول محفظه افزایش می یابد. در انتهای ریز محفظه با قطر ۰/۴ میلی متر تغییرات دما از بیشترین سرعت ورودی ۱/۲ متر بر ثانیه تا کمترین مقدار آن ۰/۴ متر بر ثانیه برابر با ۲٪ است در حالی که اختلاف دما در ریز محفظه با قطر ۰/۵ میلی متر از بیشترین سرعت تا کمترین مقدار آن برابر با ۱/۷۵٪ است.

در شکل (۱۲) تغییرات ولتاژ خروجی ترموالکتریک با شرط مرزی دیواره عایق در سرعت های متفاوت مشاهده می شود. با توجه به شکل بیشترین مقدار ولتاژ خروجی در سرعت ورودی ۰/۴ متر بر ثانیه می باشد که با افزایش سرعت تا ۱/۲ متر بر ثانیه ولتاژ خروجی ۴۰٪ کاهش پیدا کرده است. با افزایش سرعت جریان ورودی میزان انتقال حرارت به پایه های ترموالکتریک کاهش یافته و در نتیجه ولتاژ خروجی ترموالکتریک نیز کاهش می یابد.



شکل ۱۲- تغییرات ولتاژ با شرط مرزی دیواره عایق در سرعت های متفاوت در ریز محفظه با قطر ۰/۴ میلی متر

در شکل (۱۳)، تغییرات توان ترموالکتریک با شرط مرزی دیواره عایق در سرعت های متفاوت نشان داده می شود. با توجه به این که با افزایش سرعت جریان ورودی مخلوط متان-هوا، راندمان در پایه های ترموالکتریک کاهش پیدا می کند، توان ترموالکتریکی نیز کاهش یافته است. تغییرات توان خروجی ترموالکتریک از بیشترین تا کمترین سرعت ورودی برابر با ۷۰٪ بوده که نشان دهنده نقش مهم تغییرات سرعت بر کارایی ترموالکتریک است. در شکل (۱۴) تغییرات کسر جرمی گونه های واکنش در خط مرکزی ریز محفظه با قطر ۰/۴ میلی متر در سرعت ۰/۴ متر بر ثانیه در دو دمای ۶۰۰ و ۱۰۰۰ کلوین نشان داده شده است.

- برای اعتبار سنجی این مدل، تغییرات دمای بدون بعد بر حسب طول بدون بعد ریزمحفظه با داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده [۱۱] مقایسه شده که تطابق قابل قبول با حداکثر خطای ۸/۴۵ درصد را نشان می‌دهد.
- در امتداد ریز محفظه تغییرات جرمی متان در شرط مرزی دیواره با ضریب انتقال حرارت جابجایی ۱۰ وات بر متر کلون کمترین و برای شرط مرزی دیواره عایق کمترین مقدار خود را دارد.
- افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی از مقدار ۲ تا ۱۰ وات بر متر کلون سبب کاهش مصرف جرمی متان شده اما با افزایش این ضریب تا مقدار ۲۰ وات بر متر کلون کاهش می‌یابد
- در حالت دیواره با ضریب انتقال حرارت ۱۰ با دو برابر کردن سرعت از ۰/۴ به ۰/۸ متر بر ثانیه میزان ولتاژ خروجی ترموالکتریک ۳۷٪ افزایش می‌یابد.
- کاهش قطر ریز محفظه باعث افزایش انرژی منتقل شده از سطح کاتالیزی به سیال می‌شود و تغییرات دما در طول محفظه افزایش می‌یابد.
- در حالت دیواره عایق با افزایش سرعت جریان ورودی میزان انتقال حرارت به پایه های ترموالکتریک کاهش یافته و در نتیجه ولتاژ خروجی ترموالکتریک نیز کاهش می‌یابد.
- با توجه به این که با افزایش سرعت جریان ورودی مخلوط متان-هوا، راندمان در پایه های ترموالکتریک کاهش پیدا می‌کند توان ترموالکتریکی نیز کاهش یافته که تغییرات توان خروجی ترموالکتریک از بیشترین تا کمترین سرعت ورودی برابر با ۷۰٪ می‌باشد.
- بیشترین مقدار ولتاژ و توان تولیدی مربوط به حالتی است که دما به طور یکنواخت در سرتاسر سطح بالایی ریز محفظه که در تماس با پایه ترموالکتریک است نگه داشته شود. در سایر حالات استفاده از یک جریان با ضریب جابجایی بالاتر در مجاورت پایه ترموالکتریک منجر به تولید توان و ولتاژ حداکثری شده‌است.
- بیشترین مقدار ولتاژ و توان تولیدی مربوط به حالتی است که دما به طور یکنواخت سرتاسر سطح بالایی ریز محفظه نگه داشته‌شود و در سایر حالات استفاده از یک جریان با ضریب جابجایی بالاتر در مجاورت پایه ترموالکتریک منجر به تولید توان و ولتاژ حداکثری شده است.

۱۰۰۰ کلون به ترتیب ۹۴٪ و ۹۶٪ افزایش مصرف را نشان می‌دهد. همچنین گونه هیدروژن در حالت دیواره با دمای ۶۰۰ کلون به علت واکنش کاتالیزی فعال تر نسبت به دیواره با دمای ۱۰۰۰ کلون در طول ۱ میلی متر به طور کامل مصرف می‌گردد. با توجه به ثابت بودن دمای سطح ریز محفظه در این حالت کاهش و یا افزایش سرعت جریان تأثیری بر مقدار ولتاژ و توان خروجی ترموالکتریک ندارد و مقدار ولتاژ و توان ثابت می‌ماند. با افزایش دمای سطح ریز محفظه میزان ولتاژ و توان خروجی ترموالکتریک به دلیل افزایش انتقال حرارت به پایه های آن افزایش می‌یابد.

در جدول ۲، توان و ولتاژ خروجی ترموالکتریک با قطر ۰/۴ میلی متر در سرعت ورودی ۰/۴ متر بر ثانیه برای شرایط مرزی مختلف دیواره نشان داده شده است.

جدول ۲- توان و ولتاژ خروجی ترموالکتریک در سرعت ورودی ۰/۴ (m/s) در ریز محفظه با قطر ۰/۴ میلی متر

شرایط مرزی دیواره	توان (W)	ولتاژ (V)
$h=2 \text{ W/m}^2\text{K}$	۱/۲۹	$۱۸/۱۱ \times ۱۰^{-۶}$
$h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$	۱۲/۳۹	$۲۳۳۰/۴۹ \times ۱۰^{-۶}$
$q''=0$	۰/۰۵۱	$۴/۷۵ \times ۱۰^{-۶}$
$T_s=1000 \text{ K}$	۲۷۲۰/۹۱	۰/۳

بیشترین مقدار ولتاژ و توان تولیدی مربوط به حالتی است که دما به طور یکنواخت در مقداری ثابت در سرتاسر سطح بالایی ریز محفظه که در تماس با پایه ترموالکتریک است نگه داشته شود. در سایر حالات استفاده از یک جریان با ضریب جابجایی بالاتر در مجاورت پایه ترموالکتریک منجر به تولید توان و ولتاژ حداکثری شده‌است.

نتیجه گیری

در این کار به بررسی تأثیرات واکنش سطحی کاتالیزی و شرایط مرزی مختلف دیواره بر جریان غیر احتراقی مخلوط متان-هوا درون ریز محفظه یکپارچه سازی شده با ترموالکتریک پرداخته شده است. مهم ترین نتایج این کار عبارتند از:

مراجع

- [1] Zhang, X., Zhao, L. (2015). "Thermoelectric materials : Energy conversion between heat and electricity". *Journal of Materiomics*, Vol. 1, No. 2. pp. 92–105.
- [2] Chen, J., Song, W., Xu, D. (2017). "Optimal combustor dimensions for the catalytic combustion of methane-air mixtures in micro-channels". *Energy Conversion and Management*, Vol. 10, pp. 197-207.
- [3] Federici, J.A., Norton, D.G., Brüggemann, T., Voit, K.W., Wetzel, E.D., Vlachos, D.G. (2006). "Catalytic microcombustors with integrated thermoelectric elements for portable power production". *Journal of Power Sources*, Vol. 161, No. 2. pp. 1469–1478.
- [4] Lee, K., Yun, J., Ahn, K., Lee, S., Kang, S., Yu, S. (2013). "Operational characteristics of a planar steam reformer thermally coupled with a catalytic burner". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 10, pp. 4767-4775.
- [5] Merotto, L., Dondè, R., De Iuliis, S. (2016). "Study of the performance of a catalytic premixed meso-scale burner". *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, pp. 115-121.
- [6] Singh, T., Marsh, R., Min, G. (2016). "Development and investigation of a non-catalytic self-aspirating meso-scale premixed burner integrated thermoelectric power generator". *Energy Conversion and Management*, Vol. 117, pp. 431-441.
- [7] Chen, J., Yan, L., Song, W., Xu, D. (2017). "Effect of heat recirculation on the combustion stability of methane-air mixtures in catalytic micro-combustors". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 12, pp. 702-714.
- [۸] ضیائی راد، م.، جعفری ندوشن، ا. (۱۳۹۰)، بررسی عددی تأثیر هندسه دندانه های روی سطح بر جریان آشفته و انتقال حرارت در یک کانال مستطیلی، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دانشگاه سمنان، سال ۹، شماره ۲۷، ص ۳۷-۴۸.
- [۹] علی‌گودرز، م. (۱۳۹۱)، مدل سازی عددی محفظه احتراق توربین SGT600 و تحلیل میدان جریان در شرایط کارکرد واقعی، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دانشگاه سمنان، سال ۱۰، شماره ۳۱، ص ۲۵-۳۵.
- [۱۰] یعقوبی، ن.، مغربی، ر. سید نژادیان، س. (۱۳۹۳)، سینتیک و پدیده های انتقال در جفت شدن اکسایشی متان: مدل‌سازی CFD در مقیاس دانه‌ای، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دانشگاه سمنان، سال ۱۲، شماره ۳۹، ص ۱۲۳-۱۴۱.
- [11] Deshmukh, S.R., Vlachos, D.G. (2007). "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, pp. 366-383.
- [12] Deutschmann, O., Maier, L., Riedel, U., Stroemann, A.H., Dibble, R. W. (2000). "Hydrogen Assisted Catalytic Combustion of Methane on Platinum". *Catalysis Today*, Vol. 59, pp. 141-150.
- [13] Snyder, G.J., Toberer, E.S. (2008). "Complex thermoelectric materials". *Nature Materials*, Vol. 7, pp. 105–114.
- [14] Moffat, R. J. (1997). "Notes on using thermocouples". *Electronics Cooling*, Vol. 3, pp. 12-15.
- [15] Merotto, L., Fanciulli, C., Donde, R., De Iuliis, S. (2016). "Study of a thermoelectric generator based on a catalytic premixed meso-scale combustor". *Applied Energy*, Vol. 162, pp. 346–353.
- [16] Shin, W., Nakashima, T., Nishibori, M., Izu, N., Itoh, T., Matsubara, I. (2011). "Planar-type thermoelectric micro devices using ceramic catalytic combustor". *Current Applied Physics*, Vol. 11, No. 4.
- [17] Demir, M.E., Dincer, I. (2017). "Development and heat transfer analysis of a new heat recovery system with thermoelectric generator". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 108, pp. 2002-2010.
- [18] Fanaee, S. A., Esfahani, J. A. (2014). The analytical modeling of propane-oxygen mixture at catalytic micro-channel. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, no. 10, pp. 1365-1373.
- [19] Fanaee, A., & Esfahani, J. A. (2012). The normalized analysis of a surface heterogeneous reaction of a propane/air mixture into a micro-channel. *Chinese Physics Letters*, Vol. 29, No. 12, 124702.
- [20] Fanaee, S. A., Abbaszadeh, M. (2021). The thermal–fluid investigation of effects of different wall boundary conditions on platinum catalytic micro-channel combined with a thermoelectric system. *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 60, No. 6, pp. 5675-5685.