

بررسی تاثیر وجود مواد متخلخل میکرو محفظه احتراق بر راندمان تابشی

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

حسین فرامرزپور*
کیومرث مظاهری
علیرضا علی پور
قادر اولیائی

چکیده

در این پژوهش دستگاه معادلات ناویر- استوکس واکنشی به منظور شبیه سازی عوامل مؤثر بر راندمان تابشی میکرو برنر بصورت دوبعدی حل شده است. می توان نسبت هم ارزی مخلوط ورودی، جنس محفظه و همچنین وجود ماده متخلخل را از مهمترین عوامل تأثیر گذار بر راندمان تابشی میکرو برنر نام برد که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته اند. بر اساس نتایج این پژوهش، استفاده از مواد متخلخل درون محفظه احتراق، راندمان تابشی محفظه را از طریق افزایش دمای متوسط دیواره ی خارجی افزایش می دهد. همچنین وجود ماده ی متخلخل علاوه بر تغییر محل تشکیل شعله، همزمان با افزایش دمای دیواره ی خارجی، دمای داخل محفظه ی احتراق را کاهش می دهد. علاوه بر این در بحث تأثیر نسبت هم ارزی مخلوط ورودی مشاهده شد، حداکثر راندمان تابشی محفظه در مخلوط هیدروژن و هوا، در مخلوط رقیق از سوخت حاصل می شود. در بخش دیگر تأثیر جنس دیواره ی محفظه ی احتراق بر راندمان تابشی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده، برای حصول حداکثر راندمان تابشی، انتخاب جنس مناسب برای محفظه بسیار حائز اهمیت می باشد.

واژه های کلیدی: احتراق در ابعاد میکرو، نسبت هم ارزی، بازده تابشی.

Investigating the effect of presence of porous media in the micro combustion chamber on radiation efficiency

H. Faramarzpour
K. Mazaheri
A. R. Alipoor
Gh. Oliayi

Department of Mechanical Engineering, tarbiat modares University , tehran, iran
Department of Mechanical Engineering, tarbiat modares University, tehran, Iran
Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
Department of aerospace Engineering, tsharif University, tehran, Iran

Abstract

In the present numerical study, 2D effect of presence of porous media on radiative efficiency in micro combustion chamber is investigated with taking account of conservative equations of momentum, energy and species. The effect of equivalence ratio of mixture and thermal conductivity of combustor wall as key parameters on radiative efficiency are also studied. Based on simulation results, using of porous media in combustion chamber causes to increase of mean wall temperature and consequently radiation efficiency of micro combustor will increased. moving flame front toward downstream and reduction of maximum flow temperature is as result of applying porous media as well. Furthermore, maximum radiation efficiency is occurred in lean condition of fuel-air mixture. wall thermal conductivities is also perused on radiative efficiency. It is observed that there is an optimum value for conduction heat transfer coefficient of combustor walls, and the combustor material play an important role on radiative efficiency.

Keywords: Micro combustion, Equivalence ratio, Radiative efficiency.

عنوان سیستم تامین انرژی بجای باتری های لیتیومی در لوازم الکترونیکی نام برد. ترموفوتوولتایی ژنراتورها بدلیل امکان استفاده بصورت ژنراتور CHP و همچنین تولید حداقل صدا به دلیل نداشتن قطعات گردنده، تعمیر و نگهداری آسان، تنوع در استفاده از سوخت های متفاوت بسیار مورد توجه قرار دارند [۱]. یکی از مفاهیم مؤثر در افزایش راندمان گرمایی و تابشی محفظه های احتراق میکرو و همچنین پایدار کردن شعله در میکرو محفظه ها و همچنین جلوگیری از خاموشی گرمایی میکرو محفظه ها، استفاده از مفهوم آنتالپی اضافه می باشد. وینبرگ [۲] نخستین بار مبحث شعله های آنتالپی اضافه را بصورت تئوری مطرح کرد. پس از وی تاکنو و همکاران [۳] امکان ایجاد شعله با آنتالپی اضافه را با اضافه کردن مواد متخلخل با ضریب انتقال حرارت رسانی بالا مطرح کردند. از راه های دیگر برای ایجاد مفهوم احتراق با آنتالپی اضافه و همچنین افزایش راندمان تابشی

۱- مقدمه

با رشد فزاینده لوازم الکترونیکی قابل حمل نظیر لپتاپ ها و گوشی های موبایل، و همچنین پردازنده های مورد استفاده در سفینه های فضایی و ماهواره ها، نیاز فزاینده ای به سیستم تامین انرژی کوچک با چگالی انرژی بالا بیش از پیش احساس می شود. سوخت های هیدروکربنی با چگالی انرژی ۱۰ KWh/kg، حدود ۵۰ برابر باتری های لیتیومی معمولی، چگالی انرژی دارند. از آنجاکه یکی از مناسب ترین روش های آزاد کردن انرژی موجود در سوخت های هیدروکربنی، احتراق است، ساخت تبدیلی که بتواند در عین کوچکی اندازه، انرژی گرمایی را به الکتریسیته تبدیل کند، می تواند آینده تامین انرژی لوازم الکترونیکی را برای مدت های مدید تضمین کند. به عنوان نمونه می توان از میکرو ترموفوتوولتایی ژنراتورها به عنوان نمونه ای مناسب برای استفاده به

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: aerospace1365@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۴/۳۱

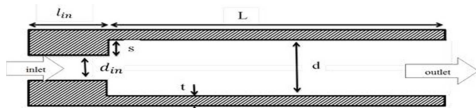
میکرو محفظه‌ها، می‌توان به استفاده از محفظه‌های حلزونی شکل و با استفاده از پله اشاره کرد. مطالعه احتراق در محفظه احتراق‌های پر شده با مواد متخلخل در دهه اخیر بواسطه نرخ احتراق بالاتر، دمای شعله بالاتر، محدوده بیشتر برای حد شعله‌وری و همچنین تابش کمتر نسبت به احتراق آزاد افزایش فزاینده‌ای داشته است. مطالعه پروفیل دمایی در منطقه متخلخل اطلاعات سودمندی از رفتار این ماده و تاثیر آن بر انتقال حرارت و همچنین ساختار دمایی شعله ارایه می‌کند. لی و همکارانش [۴] دینامیک احتراق مخلوط هیدروژن هوا در میکرو برنر حاوی ماده متخلخل از جنس استیل را بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. بر طبق گزارش ایشان، حداکثر دمای شعله در ناحیه متخلخل ایجاد می‌شود و با جابجا کردن مکان ناحیه متخلخل، مکان حداکثر دمای شعله نیز تغییر می‌کند. بر اساس گزارش آنها حد بیرون‌زدگی شعله تا حد زیادی از شکل هندسی محفظه احتراق مستقل است. اما حد بازگشت شعله به داخل منبع^۱ بشدت تابع شکل محفظه و همچنین مشخصات ماده متخلخل نظیر محل قرارگیری، ضخامت، و همچنین سایز مواد متخلخل می‌باشد. وانگ و همکاران [۵] احتراق شعله پیش‌آمیخته متان-هوا را در محفظه احتراق متخلخل بصورت تجربی بررسی کردند. ایشان احتراق در ناحیه متخلخل به سه بخش تقسیم‌بندی کردند. ناحیه پیشگرم، ناحیه واکنش و ناحیه بعداز واکنش. بعد از وارد شدن مخلوط به منطقه واکنش، ابتدا مخلوط ورودی پیشگرم شده و پس از رسیدن به دمای اشتعال، محترق شده و دمای شعله افزایش می‌یابد. آنها همچنین گزارش کردند هرچه در شرایط یکسان، سرعت مخلوط ورودی را افزایش یابد، دمای مخلوط در ناحیه پیشگرم کاهش و در دو ناحیه احتراق و بعد از احتراق افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش اندازه ذرات متخلخل از ۴/۳ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر، حداکثر دمای شعله کاهش و دمای ناحیه پیشگرم و بعد از واکنش افزایش یافت. به معنای دیگر دما در منطقه تخلخل یکنواخت‌تر می‌شود. دلیل این را می‌توان افزایش تابش از منطقه احتراق به نواحی مجاور آن عنوان کرد. همچنین آنها تاثیر نسبت هم‌آزری مخلوط ورودی بر دمای شعله را بررسی کردند. بر اساس نتایج آنها، با افزایش نسبت هم‌آزری دما در منطقه پیشگرم کاهش، و در مناطق احتراق و بعد از احتراق افزایش می‌یابد. پان و همکاران [۶] احتراق هیدروژن هوا در ابعاد میکرو را در حضور ماده متخلخل بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آنها مهمترین پارامتر تاثیر گذار بر خواص مواد متخلخل ضریب رسانش و همچنین ظرفیت گرمایی این مواد هستند. آنها در این مطالعه عددی، تاثیر سه ماده مختلف با ظرفیت و ضریب انتقال حرارت رسانشی متفاوت را بررسی کردند. بر این اساس، محفظه‌ای که ماده متخلخل آن ظرفیت گرمایی کمتر و ضریب انتقال حرارت رسانشی بزرگتری دارد، دمای یکنواختتری در محفظه احتراق ایجاد می‌کند. همچنین نرخ احتراق را نیز بهبود می‌بخشد. ماده متخلخلی که ضریب رسانشی بزرگی دارد، عمل پیشگرم کردن مخلوط ورودی به منطقه احتراق را بهتر و سریعتر انجام می‌دهد. همچنین ظرفیت گرمایی بالا در ماده متخلخل، باعث افزایش دما در قسمت جلویی ماده متخلخل نسبت به سایر نقاط محفظه می‌شود که افزایش

گرادیان دمایی را به همراه دارد. همچنین متوسط دمای دیواره خارجی نیز در حضور ماده متخلخل افزایش محسوسی می‌یابد. بر طبق مشاهدات آنها تخلخلهای بسیار بزرگ و یا بسیار کوچک، هر دو به یک اندازه پایداری شعله را متزلزل می‌کنند. بر اساس مطالعات آنها، برای محفظه احتراق میکرو استوانه‌ای، حداکثر راندمان احتراق در نسبت هم‌آزری ۰/۸ تا ۰/۵ و جنس SiC حاصل می‌شود. لی و همکاران [۷] بصورت تجربی احتراق هیدروژن - هوا در محفظه احتراق متخلخل مستطیل شکل را مورد بررسی قرار دادند. هدف آنها بررسی تاثیر انتقال حرارت رسانشی ماده متخلخل بر مشخصات شعله نظیر مکان شعله، دمای شعله، و سرعت شعله می‌باشد. بر اساس مشاهدات آنها محفظه احتراق مستطیلی متخلخل، دمای دیواره بالاتر (۱۰۰ درجه سلسیوس) و دمای شعله کمتری نسبت به شعله آزاد در میکرو برنر بدون مواد متخلخل دارد. همچنین حداکثر راندمان تابشی در نسبت هم‌آزری ۰/۸ به دست آمده است. جیوانونی و همکاران [۸] تاثیر قرار دادن مقطعی ماده متخلخل به عنوان نگهدارنده شعله در داخل میکرو برنر را بصورت عددی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آنها نگهدارنده شعله در مواردی خاص بخصوص در مواقعی که سرعت سوزش مخلوط بسیار بیشتر از سرعت مخلوط ورودی به محفظه باشد، باعث افزایش افت گرمایی محفظه شده و منجر به خاموشی شعله در میکرو محفظه می‌شود. چو و همکاران [۹]، تاثیر مواد متخلخل بر افزایش راندمان ترموفوتوولتایی ژنراتورها را در ابعاد میکرو به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها در این تحقیق احتراق مخلوط هیدروژن - هوا را در میکرو برنر با افزودن مواد متخلخل مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آنها افزودن مواد متخلخل انتقال حرارت از محصولات احتراق به دیواره خارجی را افزایش داده و علاوه بر افزایش دما، توزیع یکنواخت‌تری از دما بر روی دیواره خارجی محفظه ایجاد می‌کند. نینگ و همکاران [۱۰] بصورت تجربی، شعله نفوذی پیش‌آمیخته متان و هوا را در محفظه احتراق Y شکل در حضور و عدم حضور مواد متخلخل بررسی کردند. آنها افزایش پایداری، بهبود راندمان احتراق و افزایش دامنه شعله‌وری را تایید کردند. اضافه کردن مواد متخلخل در افزایش راندمان سلولهای سوختی نیز تاثیر بسزایی دارد. وانگ و همکاران [۱۱،۱۲] محفظه احتراق پر شده با مواد متخلخل را در سلول سوختی شعله‌ای مورد استفاده قرار دادند. آنها دلیل این پدیده را توزیع یکنواخت دما در محفظه احتراق عنوان کردند. علاوه بر مواد متخلخل، پارامترهای مختلف دیگری نظیر سرعت مخلوط ورودی، نسبت هم‌آزری مخلوط ورودی و جنس دیواره خارجی محفظه، مشخصات احتراق در ابعاد میکرو را تحت تاثیر قرار می‌دهند. لی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۹، در محفظه احتراق استوانه‌ای در حضور پله، تاثیر پارامترهای هندسی شامل قطر محفظه و اندازه پله و تاثیر پارامترهای فیزیکی مخلوط، شامل نسبت هم‌آزری و سرعت ورودی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج پژوهش ایشان، افزایش نسبت هم‌آزری از ۰/۶ تا ۰/۸ باعث افزایش قابل توجه دمای دیواره می‌شود. در حالی که افزایش نسبت هم‌آزری تا ۱ تاثیر بسیار ناچیزی در دمای متوسط دیواره دارد. بیگ محمدی و همکاران [۱۴] تاثیر وجود مانع پله دار کاتالیستی در مرکز محفظه را بصورت عددی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آنها استفاده از مانع کاتالیستی با پله به همراه رسانایی گرمایی بالا، پایداری شعله بخصوص در سرعتهای بالا را

1 Flash back

۲- تعریف مسئله

در این پژوهش از هندسه محفظه استوانه‌ای با پله در دو حالت بدون ماده متخلخل و پر شده با مواد متخلخل برای میکرو برنر استفاده شده است. طبق شکل ۱ سیال پیش مخلوط هیدروژن - هوا از ورودی محفظه وارد شده و پس از احتراق، از خروجی خارج می‌شوند. در شکل ۱ طرحواره ای از محفظه احتراق نشان داده شده است. در محفظه احتراق ساده با پله، t, s, d, d_{in} و l_{in} و L به ترتیب قطر ورودی محفظه، قطر محفظه احتراق، ارتفاع پله، ضخامت دیواره، طول ناحیه ورودی به محفظه و طول محفظه محفظه احتراق می‌باشد.



شکل ۱- طرحواره دو محفظه احتراق مورد شبیه سازی

ضریب تابش در محفظه ساده 0.8 و همچنین رسانایی گرمایی دیواره 15 w/m-k می‌باشد. برای شبیه‌سازی متخلخل، ضریب تخلخل 0.8 ، ضریب تابش محیط متخلخل 0.8 و همچنین رسانایی گرمایی محیط متخلخل 15 w/m-k در نظر گرفته شده است [۲۹].

۳- معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی احتراق در محیط غیر متخلخل، از حل معادلات دو بعدی ناور استوکس واکنشی ماخ پایین با حل همزمان معادله انرژی در فاز جامد و سیال بهره گرفته شده است. رینولدز در محیط متخلخل بر اساس معادله (۱) محاسبه می‌گردد.

$$Re = \frac{\rho_{mix} \cdot v_p \cdot l}{\mu_{mix}} \quad (1)$$

در معادله (۱) l بیان کننده طول مشخصه متوسط محیط متخلخل، v_p سرعت متوسط در محیط متخلخل که بصورت $v_p = \frac{v}{\epsilon}$ تعریف می‌شود و ϵ تخلخل محیط می‌باشد. ρ_{mix} و μ_{mix} بیانگر چگالی و لزجت جریان در محیط متخلخل می‌باشد.

$$\rho_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot X_i \cdot M_i^{1/2}}{\sum_{i=1}^n X_i \cdot M_i^{1/2}} \quad (2)$$

$$\mu_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n X_i \cdot M_i^{1/2}} \quad (3)$$

در معادله (۲) و (۳)، M_i و X_i به ترتیب وزن مولی و درصد مولی گونه i می‌باشد. از آنجا که، مشخصه‌های اغتشاش برای محیط متخلخل متفاوت از جریان آزاد می‌باشد و جریان مغشوش بسیار مستعد پدیدار شدن در محیط متخلخل می‌باشد، برای رینولدزهای بیش از 150 در این تحقیق از حل مغشوش بهره گرفته می‌شود. در این تحقیق از مدل اغتشاشی K-C realizable برای حل جریان و از مدل احتراقی EDC به منظور در نظر گرفتن اندرکنش مغشوش و شیمی استفاده شده است. مدل تابشی DO برای در نظر گرفتن تاثیر تابش محیط گازی استفاده شده است [۶].

معادلات بقا برای فاز گازی و همچنین محیط متخلخل بصورت معادله (۴) ارایه می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\epsilon \rho_g u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\epsilon \rho_g r v) = 0 \quad (4)$$

افزایش می‌دهد. زروندی و همکاران [۱۵] در شبیه‌سازی عددی، تاثیر اضافه کردن هیدروژن به مخلوط متان/ هوا را بررسی کردند. بر اساس نتایج بررسی آنها، اضافه کردن هیدروژن علاوه بر پایدار کردن هرچه بیشتر شعله، استفاده از این محفظه را برای ترموفتو ولتایی ژنراتورها مناسبتر می‌کند. همچنین بیگ محمدی و همکاران [۱۶] در شبیه‌سازی عددی تاثیر قرار دادن سیم داخل میکرو محفظه را بررسی کردند. آنها گزارش کردند که وجود سیم داخل محفظه میکرو علاوه بر افزایش راندمان محفظه احتراق، پایداری بیشتر شعله در سرعت‌های بالا را از طریق تولید بیشتر رادیکالهای OH و H ... به همراه دارد یکی دیگر از راهکارهای عملی برای افزایش عملکرد و پایداری احتراق در ابعاد میکرو همچنین استفاده از آنتالپی اضافه، استفاده از پله و موانع [۱۷] در میکرو برنرها می‌باشد. پله و موانع، زمان بقای مخلوط ورودی در محفظه و نرخ اختلاط را افزایش می‌دهد و همچنین به پیشگرم شدن هرچه بیشتر مخلوط ورودی کمک می‌کند. آتش افروز و همکاران [۱۹] به عنوان یکی از کارهای اولیه، یانگ و همکاران [۱۸] احتراق در محفظه میکرو در حضور و عدم حضور پله را، به منظور بررسی تاثیر وجود پله، مورد بررسی قرار دادند. ایشان گزارش کردند که استفاده از پله منجر به یکنواختی دما در دیواره خارجی، افزایش اختلاط و افزایش زمان ماندگاری مخلوط در محفظه می‌شود. همچنین، ایشان بیان کردند که استفاده از پله در محفظه امکان احتراق هرچه کامل‌تر را در محفظه فراهم می‌کند. از سال 2014 تا به امروز تحقیقات تجربی [۲۰، ۱۹] و عددی [۲۳، ۲۲، ۲۱] متعددی در زمینه استفاده از موانع در میکرو محفظه انجام شده است. همانگونه که بیان شد، استفاده از پله به پایداری هرچه بیشتر شعله در محفظه کمک می‌کند. از سال 2008 تاکنون مقالات زیادی بصورت عددی [۲۶، ۲۵، ۲۴] و تجربی [۲۷] در زمینه دینامیک شعله در محفظه احتراق میکرو انجام شده است. همچنین آتش‌افروز و همکاران [۲۸]، رفتار هیدرودینامیکی و گرمایی جریان لایه‌ای با انتقال حرارت جابجایی آمیخته در گازهای تابشی غیر خاکستری در یک لوله مایل با یک پله مایل بررسی کردند. سیال مفروض آنها به صورت مخلوطی از هوا، 10% درصد CO_2 و 20% درصد H_2O در نظر گرفته شده است که به صورت یک محیط همگن، جاذب، انتشاری و بدون پراکندگی رفتار می‌کند. از روش FSK برای بخش غیرخاکستری و از روش DO برای حل معادله انتقال حرارت تابشی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بسیاری از مسائل، صرف نظر کردن از گرمای تابش و استفاده از فرض خاکستری قابل قبول نمی‌باشد و منجر به ایجاد خطاهای قابل ملاحظه‌ای می‌شود. با توجه به مقدمه بیان شده، مشاهده شد اگرچه بسیار از مقالات بصورت عددی و تجربی احتراق میکرو در حضور مواد متخلخل را مورد بررسی قرار داده‌اند، ولی تاثیر آن بر راندمان تابشی محفظه را بررسی نکرده‌اند. از آنجا که هدف نهایی بسیاری از کارهای پژوهشی استفاده از این محفظه در ژنراتورهای فتوولتایی می‌باشد، لذا بررسی عوامل موثر در افزایش راندمان تابشی بسیار حائز اهمیت است. از این روی، در پژوهش حاضر تاثیر پارامترهای جریان و محفظه نظیر وجود مواد متخلخل، نسبت هم ارزی مخلوط، سرعت و جنس دیواره بر دمای خارجی محفظه و همچنین راندمان تابشی آن بصورت عددی بررسی شده است. کار حاضر به صورت کمی عوامل موثر بر راندمان تابشی میکرو محفظه را بررسی کرده است.

که در این معادله ε بیانگر تخلخل محیط متخلخل می‌باشد. ρ_g چگالی گاز و u و v سرعتهای محوری و شعاعی سرعت می‌باشند. معادله گاز حالت گاز برای مخلوط چندگانه برای بدست آوردن چگالی حل شده است. معادله مومنوم در دو راستای محوری و شعاعی بصورت معادلات (۵) و (۶) بیان می‌گردند.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon \rho_g u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon \rho_g r u v) = -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + s \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon \rho_g u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon \rho_g r v v) = -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + s \quad (6)$$

در معادله (۵) و (۶) بیانگر فشار هیدرو استاتیکی و μ لزجت دینامیکی مخلوط را نشان می‌دهد. S نیز بصورت جمله چشمه بیان می‌شود، که بیانگر اتلاف لزجت و پتانسیل ناشی از محیط متخلخل می‌باشد. معادله بقا گونه نیز بصورت معادله (۷) بیان می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon \rho_g Y_i u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon \rho_g Y_i r v) + \frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon \rho_g Y_i U_i) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon \rho_g Y_i r V_i) = \varepsilon \omega_i W_i \quad (7)$$

در معادله (۷)، Y_i و ω_i نشاندهنده کسر جرمی و نرخ تولید مولی و W_i نشانگر وزن مولکولی گونه نام می‌باشد. U_i و V_i بیانگر سرعت نفوذی در راستای محوری و شعاعی می‌باشد. برای شبیه‌سازی محیط متخلخل دو معادله انرژی برای دو فاز جامد و سیال نیاز است. معادله (۸) بیانگر معادله انرژی برای فاز گازی مخلوط ورودی به محافظه می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon \rho_g C_g T_g U) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon \rho_g C_g T_g r v) = \frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial r}) + h_v(T_s - T_g) - \varepsilon \sum_i \omega_i W_i h_i + S_h \quad (8)$$

در معادله (۸) ρ_g ، C_g ، λ_g و T_g به ترتیب بیانگر چگالی، گرمایی ویژه، رسانایی گرمایی و دمای فاز گازی و جمله چشمه مربوط به انتقال گرمایی تابشی می‌باشد. T_s دمای محیط متخلخل و h_v بیانگر ضریب انتقال گرمایی حجمی بین محیط متخلخل و محیط گازی و h_i آنتالپی گونه نام می‌باشد. معادله انرژی برای شبکه محیط متخلخل طبق رابطه ۹ بیان شده است.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\lambda_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial r}) + h_v(T_s - T_g) = 0 \quad (9)$$

در معادله (۹) ρ_s و C_s بیانگر چگالی و گرمایی ویژه شبکه بندی محیط متخلخل می‌باشد. λ_{eff} بیانگر هدایت حرارتی موثر شبکه محیط متخلخل می‌باشد که بصورت معادله ۱۰ بیان می‌شود.

$$\lambda_{eff} = (1 - \varepsilon)\lambda_s + \lambda_{rad} \quad (10)$$

در این معادله λ_s گرمایی حرارتی محیط متخلخل و λ_{rad} رسانایی گرمایی معادل انتقال گرمایی تابشی می‌باشد که برای ساده سازی شبیه‌سازی انتقال گرمایی تابشی محیط متخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرد. λ_{rad} بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon \rho_g u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon \rho_g r v) = 0 \quad (11)$$

$$\lambda_{rad} = 16\sigma K_s l \frac{T_s^3}{3}$$

در عبارت فوق σ ، K_s ، l به ترتیب اندازه مسیر ذرات نور، ضریب تابش دیواره متخلخل و ثابت استفان بولتزمن می‌باشد.

معادله انرژی برای دیواره محافظه احتراق بصورت رابطه (۱۲) ارائه می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon \rho_g u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon \rho_g r v) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial r}) = 0$$

در رابطه فوق ρ_w ، C_w ، T_w به ترتیب دمای دیواره، گرمایی ویژه و

چگالی محافظه و همچنین λ_w رسانایی گرمایی دیواره محافظه می‌باشد.

۳-۱- شرایط مرزی

$$T_g = 300 \text{ K}, U = U_{in}, Y_i = Y_i, in$$

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial x} = -\sigma K_s (T_s^4 - T_0^4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon \rho_g u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\varepsilon \rho_g r v) = 0 \quad (13)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial r})$$

که در معادله (۱۳)، T_0 دمای محیط می‌باشد.

شرط مرزی در خروجی محافظه:

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial x} = -\sigma K_s (T_s^4 - T_0^4) \quad (14)$$

شرط مرزی بروی دیواره خارجی:

$$q_0 = h_0(T_{w,0} - T_g) + \sigma K_w(T_s^4 - T_0^4) \quad (15)$$

در معادله (۱۵)، h_0 ضریب انتقال گرمایی جابجایی طبیعی (w/m².k) می‌باشد. $T_{w,0}$ دمای دیواره خارجی محافظه، K_w ضریب صدور دیواره خارجی معادل ۰/۸ می‌باشد [۱۳]. همچنین شرط عدم لغزش بروی دیواره داخلی محافظه و همچنین پیوستگی دمایی در مرز مشترک فرض شده است. برای در نظر گرفتن تابش محیط گازی از مدل DO استفاده شده است.

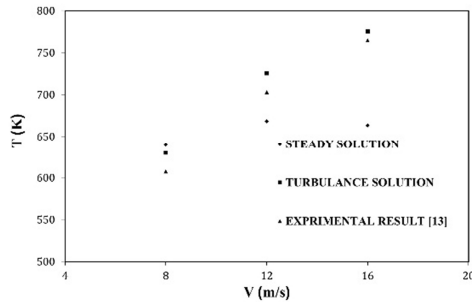
۳-۲- روش حل و شرایط مرزی

برای حل دستگاه معادلات، از روش حل فشار پایه استفاده شده است. در این تحقیق برای گسسته سازی معادلات از روش پادبادسو مرتبه دو همراه با ضریب تخفیف برای معادله انرژی و فشار استفاده شده است. همچنین برای کوپلینگ فشار و سرعت نیز از الگوریتم SIMPLE با مقدار باقی مانده 10^{-6} بهره گرفته شد [۳۱]. در این تحقیق برای شبیه‌سازی جریان اغتشاشی از روش K-E realizable استفاده شده است. این مدل اغتشاشی در جریانهای مغشوش چرخشی، نتایج بهتری را نسبت به مدل‌های دیگر پیش‌بینی می‌کند [۳۰]. برای بیان اندرکنش احتراق و جریان، از مدل احتراقی EDC استفاده شده است. جریان با سرعت و دمای مشخص وارد میکرو محافظه شده و در خروجی محافظه با فرض فشار اتمسفر خارج می‌شود. در این پژوهش برای حدس اولیه، دمای درون محافظه ۱۰۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. همچنین از سنیتک تفصیلی هیدروژن و هوا [۲۷،۲۶] برای فاز گازی و ضرایب نفوذ مختلف برای گونه‌های مختلف بهره گرفته شده است.

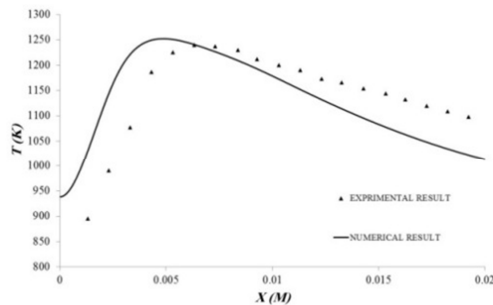
۴- ارایه نتایج و بحث

در این بخش نتایج مربوط به شبیه‌سازی احتراق در محافظه احتراقی پر شده با مواد متخلخل ارائه می‌شود و با نتایج مربوط به محافظه بدون مواد متخلخل مقایسه می‌شود. در این پژوهش تاثیر نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی و جنس محافظه احتراق بررسی و تاثیر آن بر راندمان تابشی محاسبه شده است. بازده تابشی طبق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود [۱۳].

$$\eta = \frac{\pi(d + 2t)\varepsilon \sum_{i=1}^N T_{w,0,i}^4 L_i}{\dot{m}_{H_2} H_c} \quad (16)$$



شکل ۳ (الف) - دمای متوسط دیواره محفظه با پله در حل عددی با نتایج تجربی [۱۳]



شکل ۳ (ب) - دمای دیواره خارجی پر شده با مواد متخلخل در حل عددی و نتایج تجربی [۳۱] (قطر محفظه 1 mm، ضخامت دیواره $\epsilon=0.88$ و $K=15 \text{ W/m/K}$ و $h=15 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ، $\delta=5 \text{ mm}$)

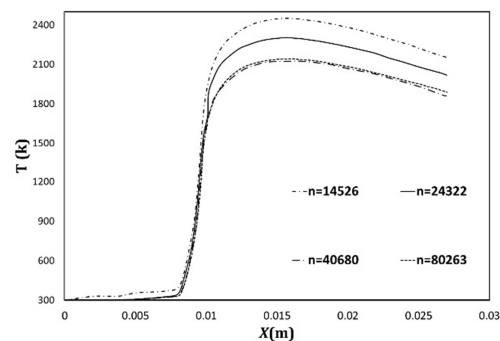
تاثیر وجود مواد متخلخل در محفظه

به منظور بررسی تاثیر مواد متخلخل بر مشخصات احتراق، محفظه احتراق با طول ۲۷ میلی‌متر با انبساط ناگهانی بدون حضور ماده متخلخل و در حضور ماده متخلخل مدل‌سازی شده است. شکل ۴ نشان دهنده مقایسه دمای دیواره خارجی محفظه احتراق در حضور و عدم حضور ماده متخلخل در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه می‌باشد. همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود دما در دیواره خارجی محفظه احتراق با مواد متخلخل افزایش معناداری پیدا کرده است که تاثیر بسزایی در راندمان تابشی محفظه میکرو ایجاد می‌کند. وجود ماده متخلخل باعث افزایش انتقال گرمای رسانشی و همچنین تابشی در محفظه شده و دمای دیواره خارجی را افزایش می‌دهد. شکل ۵ مقایسه دمای شعله در محور مرکزی محفظه در حضور و عدم حضور مواد متخلخل را نشان می‌دهد. در این شکل مطابق نتایج آزمایشگاهی دما پیش از شعله افزایش و پس از تشکیل شعله کاهش یافته است. به بیان دیگر وجود ماده متخلخل از طریق نفوذ حرارتی و همچنین تابش، مخطوط ورودی را هرچه بیشتر پیش‌گرم کرده به افزایش حد شعله‌وری و همچنین پایداری شعله کمک می‌کند. اما پس از ناحیه شعله به علت افت بالای حرارتی ناشی از رسانش به دیوار خارجی، در داخل محفظه احتراق کاهش می‌یابد. شکل ۶ و ۷ دما در دیواره خارجی و همچنین محور مرکزی احتراق در حضور و عدم حضور مواد متخلخل را سرعت ۶ متر بر ثانیه نشان می‌دهد.

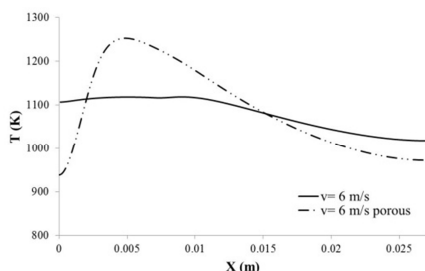
در این رابطه، $T_{wo,i}$ دمای دیواره خارجی محفظه، H_c انرژی گرمایی آزاد شده در محفظه احتراق و d و t قطر و ضخامت محفظه و L_i طول هر مقطع است.

۴-۱- اعتبارسنجی و بررسی استقلال حل از اندازه شبکه محاسباتی

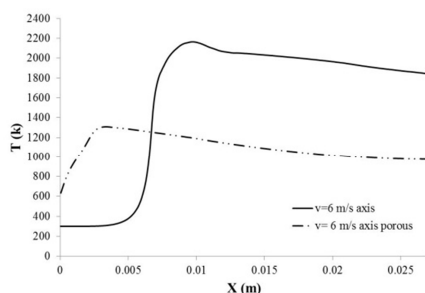
برای بررسی استقلال حل از اندازه شبکه، محفظه‌ای با پله با مشخصات $d_{in} = 1 \text{ mm}$ ، $d = 2 \text{ mm}$ ، $s = 0.5 \text{ mm}$ و به صورت شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود. برای بررسی استقلال حل از اندازه شبکه، توزیع دما بر روی محور تقارن محفظه در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، نتایج با افزایش تعداد شبکه از ۴۰۶۸۰ به ۸۰۲۶۳ گره تغییری نمی‌کند. در این حالت، فاصله هر گره در راستای طولی ۰/۵ میلی‌متر و راستای عرضی ۰/۰۲ میلی‌متر است. از آنجا که به منظور شبیه‌سازی احتراق میکرو نیاز است معادله انرژی در فاز جامد و سیال بصورت همزمان حل شوند، هزینه محاسبات بخصوص در صورت استفاده از سینتیک گازی به شدت افزایش می‌یابد. به این منظور از کامپیوتر با پردازنده نسل ۵ xeon به همراه ۱۲۸ گیگا بیت رم بهره گرفته شده است که زمان محاسبات را به کمتر از یک هفته در هر کیس کاهش داده است. در این تحقیق به منظور اطمینان از صحت نتایج، ابتدا حل عددی محفظه با پله با مرجع [۱۳] در شکل ۳ (الف) مقایسه شده و پس از آن حل محیط متخلخل در شکل ۳ (ب) با مرجع [۳۲] مقایسه شده است. بر اساس مقایسه، مدل عددی به شکل قابل قبولی مشخصات احتراق را شبیه‌سازی می‌کند. در این مقایسه، حداکثر دمای دیواره و مکان تشکیل شعله اندک مقداری تفاوت دارد. در مدل سازی احتراق محیط متخلخل، از تابش محیط گازی صرفه نظر نشده و روش DO مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور حصول اطمینان از حل شعله مغشوش و کارایی مدل EDC در شبیه‌سازی احتراق با پله، نتایج حل عددی با دو روش شعله آرنیوسی و شعله مغشوش با نتایج تجربی، طبق شکل ۳ (الف)، مقایسه شده است.



شکل ۲- نمودار دما بر روی محور مرکزی محفظه احتراق در اندازه شبکه متفاوت (قطر محفظه 2 mm، ارتفاع پله 0/5 mm، $K=20 \text{ W/m/K}$ و $5 \text{ W/m}^2/\text{K}$)

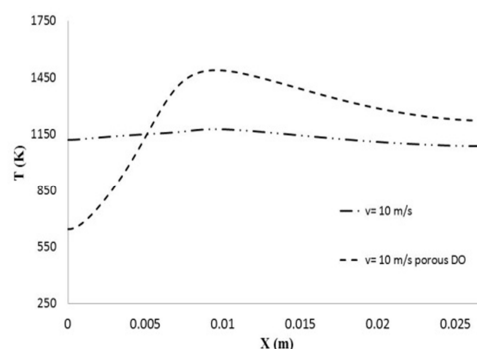


شکل ۶- دمای دیواره خارجی محفظه در حضور و عدم حضور مواد متخلخل (قطر محفظه ۰.۳ mm، ارتفاع پله ۰.۵ mm، $h=5W/m^2/K$ و $K=20 W/m/K$ و $\epsilon=0.88$)

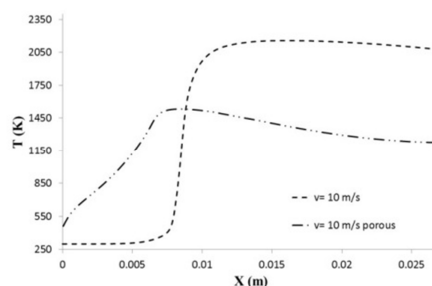


شکل ۷- دمای محور مرکزی محفظه احتراق در حضور و عدم حضور ماده متخلخل (قطر محفظه ۰.۳ mm، ارتفاع پله ۰.۵ mm، $h=5W/m^2/K$ و $K=20 W/m/K$ و $\epsilon=0.88$)

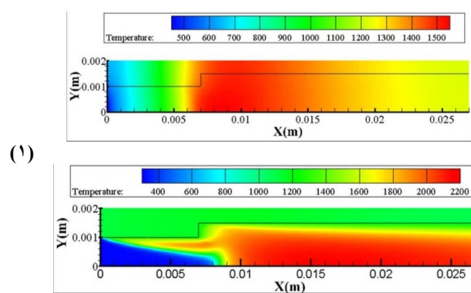
با افزایش سرعت مخلوط ورودی به محفظه احتراق میکرو، ناحیه شعله دچار کشیدگی می‌شود. از طرفی دیگر وجود ماده متخلخل در محفظه باعث می‌شود دما از داخل محفظه چه از طریق تابش و چه از طریق رسانش بیشتر به دیواره خارجی منتقل شود. به همین دلیل در سرعت‌های بالاتر مخلوط ورودی، دمای دیواره خارجی در مقایسه در سرعت‌های پایین افزایش بیشتری پیدا می‌کند. همچنین بر اساس نتایج تجربی و مقایسه این دو شکل مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت، دمای ناحیه پیشگرم کاهش می‌یابد. دلیل این امر در افزایش بیشتر دمای دیواره خارجی در سرعت بالاتر می‌باشد، که این افزایش بیشتر دمای دیواره خارجی، پیشگرم شدن مخلوط ورودی را تسهیل می‌کند. همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت مخلوط ورودی، دمای متوسط دیواره خارجی محفظه احتراق افزایش معناداری پیدا کرده است. این امر نشان دهنده این واقعیت است که استفاده از مواد متخلخل داخل محفظه، در مواردی که به سرعت‌های بالاتر سیال ورودی نیاز است، راندمان بهتری ارائه می‌دهد. این امر از آنجا که راندمان تابشی بصورت توان چهار با دمای دیواره خارجی مرتبط است بیانگر این است که در سرعت‌های پایین مخلوط ورودی، استفاده از مواد متخلخل تأثیر چندانی در افزایش راندمانی تابش نداشته و چه بسا به کاهش راندمان حرارتی محفظه بیانجامد.



شکل ۴- دمای دیواره خارجی محفظه در حضور و عدم حضور مواد متخلخل (قطر محفظه ۰.۳ mm، ارتفاع پله ۰.۵ mm، $h=5W/m^2/K$ و $K=20 W/m/K$ و $\epsilon=0.9$)

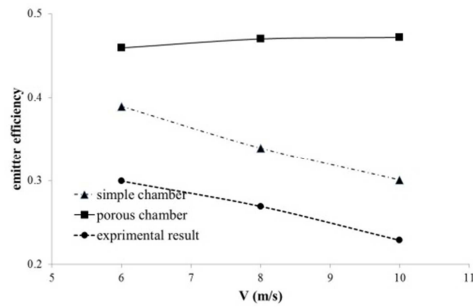


شکل ۵(الف)- دمای محور مرکزی محفظه احتراق در حضور و عدم حضور ماده متخلخل (قطر محفظه ۰.۳ mm، ارتفاع پله ۰.۵ mm، $h=5W/m^2/K$ و $K=20 W/m/K$ و $\epsilon=0.88$)

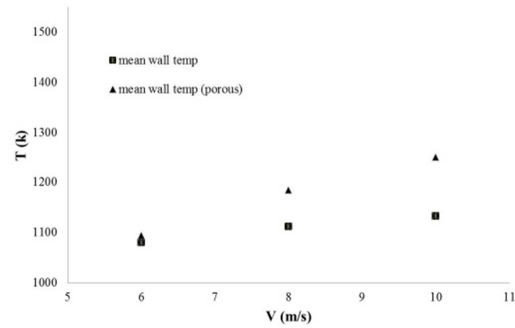


شکل ۵(ب)- کانتور دما در محفظه احتراق در حضور (۱) و عدم حضور (۲) ماده متخلخل (قطر محفظه ۰.۳ mm، ارتفاع پله ۰.۵ mm، $h=5W/m^2/K$ و $K=20 W/m/K$ و $\epsilon=0.88$)

با مقایسه دو شکل ۴ و ۶ مشاهده می‌شود که در سرعت‌های بالاتر مخلوط ورودی به محفظه، تأثیر وجود مواد متخلخل بیشتر نمایان می‌شود.



شکل ۹- بازده تشعشعی میکروبرنر، قطر محفظه ۲ میلی‌متر، ارتفاع پله ۵/۵ میلی‌متر، مخلوط استوکومیتری هیدروژن و هوا، $h=5$ W/m²/K و $K=20$ W/m/K [۱۳]



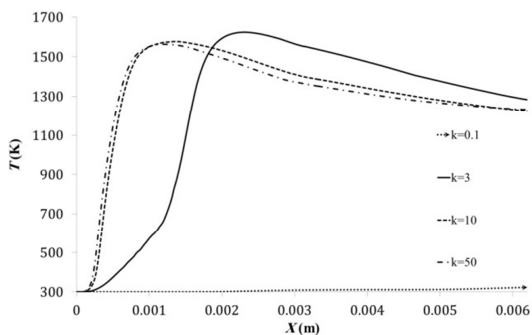
شکل ۸- دمای متوسط دیواره خارجی محفظه احتراق در سه سرعت مختلف در حضور و عدم حضور مواد متخلخل (قطر محفظه ۳ mm، ارتفاع پله ۵/۵ mm، $h=5$ W/m²/K و $K=20$ W/m/K) ($C=0.88$)

تاثیر نسبت هم‌ارزی

نسبت هم‌ارزی بهینه، نکته‌ای حائز اهمیت در افزایش بازده حرارتی و تابشی محفظه احتراق میکرو می‌باشد [۱۵]. در این بخش، تاثیر نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی بر دمای متوسط دیواره بررسی شده است. بدین منظور، در محفظه احتراق میکرو با پله در چهار نسبت هم‌ارزی مختلف، احتراق میکرو شبیه‌سازی شده و دمای متوسط دیواره محاسبه گردید. شکل ۱۰ میانگین دمای دیواره خارجی محفظه احتراق در چهار نسبت هم‌ارزی متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است، افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۶ به ۰/۹ تغییر دمایی حدود ۷۰ درجه ایجاد می‌کند، ولی برای نسبت هم‌ارزی ۱ در مقایسه با نسبت هم‌ارزی ۰/۹ تغییر دما حدود ۱۵ درجه است. با توجه به شکل ۱۰، مشاهده می‌شود که حداکثر دمای میانگین دیواره خارجی محفظه، در نسبت هم‌ارزی رقیق و در نزدیکی مقدار استوکومیتری اتفاق می‌افتد. دلیل این امر را می‌توان در کوپلینگ حرارتی بین مخلوط ورودی به محفظه و دیواره محفظه جستجو کرد [۱۳، ۳۰]. با توجه به دو شکل ۱۱ و ۱۲ که کانتور دما در داخل محفظه احتراق را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که شعله در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ کشیده‌تر و همچنین دمای کمتری را حاصل می‌کند. اگرچه که حداکثر دمای شعله در نسبت هم‌ارزی ۱ حاصل شده است، اما به علت افزایش طول شعله، دمای متوسط دیواره خارجی در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ بالاتر است. این امر عدم نیاز به استفاده از مخلوط استوکومیتری در میکرو محفظه‌ها را به منظور دستیابی به حداکثر راندمان تابشی تایید می‌کند. این نتیجه در برخی از آزمایش‌های تجربی نیز مشاهده شده است. کو و ژو [۳۰] و همچنین لی و همکارانش [۱۳] تاثیر نسبت هم‌ارزی بر دمای دیواره خارجی و همچنین دمای خروجی از میکروبرنر را بررسی کردند. کو و ژو حداکثر دما در دیواره خارجی و همچنین حداکثر دمای خروجی را در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ مشاهده کردند. لی و همکارانش نیز افزایش بازده تابشی را در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ تایید کردند. اگرچه در برخی از تحقیقات آزمایشگاهی این مقدار ۰/۸ گزارش شده است.

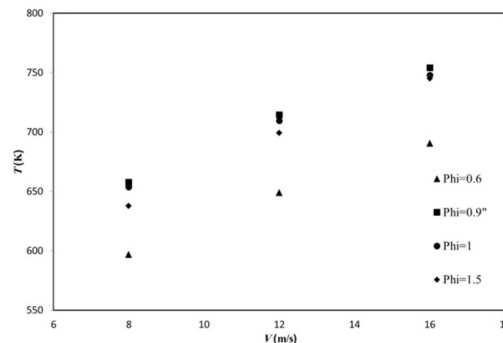
بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۸، با افزایش سرعت مخلوط ورودی، متوسط دمای دیواره خارجی افزایش یافته که در نتیجه آن راندمان تابشی افزایش می‌یابد. برای اثبات این ادعا، بر اساس رابطه (۱۶) راندمان تابشی برای محفظه با مواد متخلخل و بدون آن محاسبه شده است. در شکل ۹ مقایسه‌ای برای راندمان تابشی محفظه احتراق در حضور و عدم حضور ماده متخلخل انجام شده است. بر اساس این شکل در محفظه احتراق بدون مواد متخلخل اگرچه با افزایش سرعت مخلوط ورودی به علت افزایش نرخ آزاد شدن انرژی، دمای خارجی محفظه افزایش یافته است، ولی طبق رابطه این افزایش دما به حدی نیست که بتواند طبق رابطه (۱۶) راندمان تابشی را افزایش دهد. اما در محفظه احتراق با مواد متخلخل با افزایش سرعت علاوه بر دمای متوسط دیواره خارجی، راندمان تابشی افزایش معناداری پیدا کرده است. این شکل بخوبی تاثیر استفاده از مواد برای افزایش راندمان تابشی محفظه احتراق میکرو را نشان می‌دهد. اگرچه که در شکل ۸ در سرعت ۶ متر بر ثانیه اختلاف دمای متوسط بسیار کم است، ولی از آنجا که طبق رابطه (۱۶) تاثیر دما از مرتبه ۴ می‌باشد، این افزایش دمای ناچیز تاثیر قابل توجهی در افزایش راندمان تابشی ایفا کرده است. علاوه بر موارد فوق نقش محل تشکیل شعله و همچنین ضخامت شعله از موارد دیگر تاثیر بر راندمان تابشی می‌باشد که مطالعات آتی لحاظ خواهد گردید. نکته حائز اهمیت دیگر که با توجه به شکل ۹ حاصل می‌شود این است که در محفظه بدون مواد متخلخل، با افزایش سرعت راندمان تابشی در حین افزایش دما، کاهش می‌یابد. در حالی که بعد از اضافه شدن مواد متخلخل به محفظه، با افزایش سرعت مخلوط ورودی، راندمان تابشی افزایش می‌یابد. این نمودار کارایی استفاده از مواد متخلخل در میکرو CHP را تایید می‌کند. زیرا این ژنراتور علاوه بر تامین تابش برای صفحات فتوسل، می‌تواند گازهای خروجی را از طریق میکرو توربین به توان الکتریکی تبدیل کند.

میکرو ایفا می‌کند [۱]. رسانایی گرمایی در راستای محوری محفظه احتراق، باعث نفوذ حرارتی شده و به پیشگرم کردن مخلوط ورودی کمک می‌کند. از طرف دیگر انتقال گرمای شعاعی باعث افزایش افت حرارتی محفظه احتراق می‌شود. در شکل ۱۴ تأثیر رسانایی گرمایی دیواره بر مکان شعله و همچنین حداکثر دمای شعله در محور مرکزی محفظه احتراق نشان داده شده است. در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود در مقادیر پایین رسانایی گرمایی و در سرعت های جریان ورودی بالا قابلیت تشکیل شعله در داخل میکرو برن وجود ندارد. این شرایط را با شرایط محفظه آدیاباتیک می‌توان برابر فرض کرد. در این شکل مشاهده می‌شود که مقادیر بالاتر ضریب انتقال حرارت رسانشی، شعله را در مکانی داخل محفظه و نزدیکتر به ورودی تشکیل می‌دهد. در شکل ۱۵ تأثیر این ضریب بر دمای دیواره خارجی نشان داده شده است. دیده می‌شود که با افزایش رسانایی گرمایی، توزیع دما در دیواره خارجی محفظه احتراق حالت یکنواختی پیدا می‌کند. همچنین دمای متوسط دیواره با افزایش این ضریب افزایش یافته و در مقادیر بالا خود نشان نمی‌دهد. افزایش دمای متوسط دیواره خارجی در سیستمهای تابشی (ترموپوتولتایی ژنراتورها) باعث افزایش راندمان به صورت قابل توجهی خواهد شد.

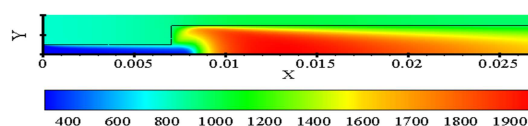


شکل ۱۴- دما در محور مرکزی محفظه احتراق در رسانایی گرمایی متفاوت محفظه احتراق، مخلوط استوکیومتری هیدروژن و هوا - $h=5$ W/m²/K

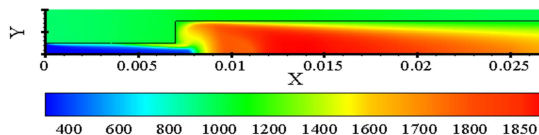
شکل ۱۶ راندمان تابشی میکرو محفظه در ضرایب انتقال حرارت رسانشی متفاوت را نشان می‌دهد. در شکل ۱۶ راندمان تابشی میکرو برن در ضریب رسانایی گرمایی متفاوت رسم گردیده است. مشاهده می‌شود که راندمان تابشی میکرو برن تا مقداری معینی افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد در موارد مختلف، مقدار بهینه این ضریب متفاوت باشد.



شکل ۱۰- دمای متوسط دیواره خارجی محفظه احتراق میکرو (مخلوط هیدروژن-هوا در نسبت هم‌ارزی های مختلف)، قطر محفظه پله ۲ mm و ارتفاع پله ۰/۵ mm، $K=20$ W/m/K و $h=5$ W/m²/K

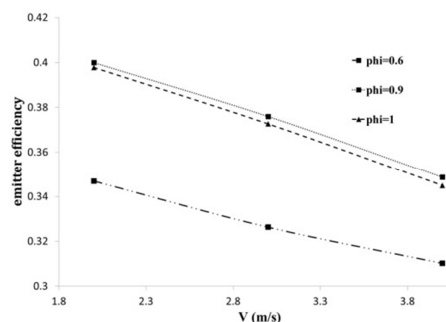


شکل ۱۱- کانتور دما در محفظه احتراق با پله، نسبت هم‌ارزی ۱، $h=5$ W/m²/K و $K=20$ W/m/K



شکل ۱۲- کانتور دما در محفظه احتراق با پله، نسبت هم‌ارزی ۰/۹، $K=20$ W/m/K و $h=5$ W/m²/K

در شکل ۱۳ مقایسه‌ای بین راندمان تابشی میکرو برن در سه نسبت هم‌ارزی مختلف نشان داده شده است. طبق انتظار از نتایج حاصله از شکل ۱۱ و ۱۲، باید راندمان تابشی بیشینه در نسبت هم‌ارزی ۰/۹ حاصل شود. همانگونه که مشاهده می‌شود، راندمان تابشی در نسبت هم‌ارزی رقیق بیشترین مقدار را دارد.



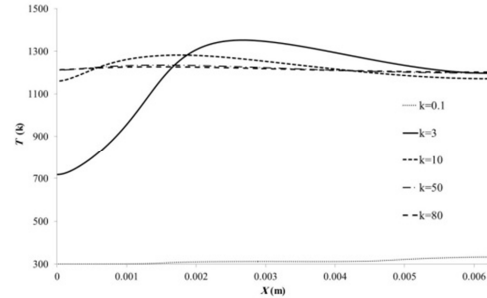
شکل ۱۳- راندمان تابشی میکرو برن - قطر محفظه ۲ میلی‌متر، ارتفاع پله ۰/۵ میلی‌متر - $K=20$ W/m/K و $h=5$ W/m²/K

تأثیر ضریب انتقال حرارت رسانشی دیوار (جنس دیوار) رسانایی گرمایی دیوار تأثیری دوگانه در پایداری احتراق در ابعاد

مخلوط ورودی، نتایج بدست آمده استفاده از مخلوط رقیق را برای بدست آوردن حداکثر راندمان حرارتی تایید کرد. در بخش دیگر تاثیر جنس محفظه احتراق بر عملکرد محفظه احتراق بررسی شد. مشاهده شد که مقدار رسانایی گرمایی برای بدست آوردن حداکثر راندمان باید مقداری بهینه انتخاب شود. در مقادارهای پایین و مقادارهای بالا عملا امکان تشکیل شعله فراهم نمی‌باشد.

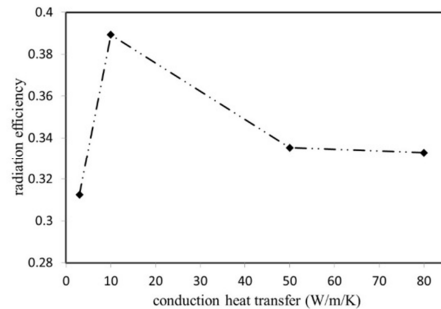
۶-مراجع

- [1] Weinberg F.J., Combustion temperatures: the future?. *Nature* Vol. 233, PP. 239–241, 1971 .
- [2] Takeno T., Sato K., An excess enthalpy flame theory. *Combust. Sci. Technol.* Vol. 20, PP. 73–84, 1979.
- [3] Ju Y and Maruta. K., Microscale combustion: Technology development and fundamental research. *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 37, No. 6, pp. 669–715, Dec. 2011.
- [4] Jun Li, Yuantao Wang, Junrui Shi, Xuelling Liu, Dynamic behaviors of premixed hydrogen-air flames in a planar micro-combustor filled with porous medium. *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 37, No. 6, pp. 669–715, Dec. 2011.
- [5] Hongmin Wang, Chunzhi Wei, Pinghui Zhao, Taohong Ye, Experimental study on temperature variation in a porous inert media burner for premixed methane air combustion. *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 37, No. 6, pp. 669–715, Dec. 2011.
- [6] Pan J. F., Wu D., Liu Y. X., Zhang H. F., Tang A. K., Xue H., Hydrogen/oxygen premixed combustion characteristics in micro porous media combustor. *Energy Procedia*. Vol. 61, PP. 1279 – 1285, 2014.
- [7] Li J., Chou S.K., Li Z.W., Yang W. M., potential heat source for the micro-thermo photovoltaic (TPV) system. *Chemical Engineering Science*. Vol. 64, PP.3282 – 3289, 2009.
- [8] Valerio Giovannoni, Rajnish N. Sharma, Robert R. Raine., Premixed combustion of methane-air mixture stabilized over porous medium: A 2D numerical study. *Chemical Engineering Science, Volume*. Vol. 152, PP. 591-605, 2016.
- [9] Chou S. K., Yang W. M., Li J., Li Z. W., Porous media combustion for micro thermophotovoltaic system applications., *Applied Energy*. Vol. 87, PP. 2862–2867, 2010.
- [10] Daoguan Ning., Yi Liu., Ying Xiang., Aiwu Fan., Experimental investigation on non-premixed methane/air combustion in Y-shaped meso-scale combustors with/without fibrous porous media., *Energy Conversion and Management*. Vol. 138, PP. 22–29, 2017.
- [11] Yuqing Wang., Hongyu Zeng., Yixiang Shi., Tianyu Cao., Ningsheng Cai., Xiaofeng Ye., Shaorong Wang., Power and heat co-generation by micro-tubular flame fuel cell on a porous media burner., *Energy*. Vol. 109, PP.117e123, 2016.
- [12] Yuqing Wang., Yixiang Shi., Tianyu Cao., Hongyu Zeng., Ningsheng Cai., Xiaofeng Ye., Shaorong Wang., A flame fuel cell stack powered by a porous media combustor., *international journal of hydrogen energy*. PP. 1-5, 2017.
- [13] Li J., Li S. K. J., Chou S. K., Li Z. W. and Yang W. M., Characterization of Wall Temperature and Radiation Power Through Cylindrical Dump Micro-Combustors. *Combustion and Flame*., Vol. 156, pp. 1587-1593, 2009.
- [14] Baigmohammadi M., Tabejamaat S., Zarvandi J., Numerical Study of The Behavior of Methane-Hydrogen/Air Pre-Mixed Flame in a Micro Reactor Equipped with Catalytic Segmented Bluff Body. *Energy*, Vol. 85, pp. 117-144, 2015.
- [15] Baigmohammadi M., Tabejamaat S., Kashir B., Numerical Study on The Effects of Hydrogen Addition Levels, Wall Thermal Conductivity and Inlet Velocity on Methane/Air Pre-Mixed Flame in a Micro Reactor. *Energy Equipment and Systems*., Vol. 2, Vo. 2, pp. 117-144, 2015.
- [16] Baigmohammadi M., Sadeghi S., Tabejamaat S. and Zarvandi J., Numerical Study of The Effects of Wire



شکل ۱۵- دما در دیواره خارجی محفظه احتراق در رسانایی گرمایی متفاوت - ضخامت ۰/۲ میلیمتر - مخلوط استوکیومتری هیدروژن و هوا - $h=5 \text{ W/m}^2/\text{K}$

دلیل وجود این نقطه بهینه راندمان در شکل ۱۶، دوگانه بودن رفتار نفوذی گرمایی دیواره محفظه است. ملاحظه می‌گردد تا اندازه‌ای که مقدار پیشگرم شدن سوخت بیشتر از افت حرارتی باشد، راندمان افزایش می‌یابد. ولی پس از مقدار مشخص، اتلاف حرارت مقدار راندمان تابشی را کاهش می‌دهد. در شکل ۱۶ راندمان تابشی پس از مقدار $50 \text{ W/m}^2/\text{K}$ کاهش بسیار کمی را نشان می‌دهد. این رفتار با توجه به شکل ۱۶ و بررسی پروفیل دمایی بر روی دیواره خارجی محفظه قابل توجیه می‌باشد. بر اساس این شکل حداکثر دمای متوسط دیواره در ضریب خاصی از انتقال گرمایی حاصل می‌شود. این موضوع لزوم به کار بردن جنس مناسب برای ساخت میکرو برنرها برای بدست آوردن حداکثر راندمان تشعشی را تایید می‌کند.



شکل ۱۶- راندمان تابشی برای رسانایی گرمایی متفاوت

۵-نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، معادلات ناوبر- استوکس واکنشی به منظور شبیه‌سازی احتراق در ابعاد میکرو بصورت دوبعدی حل گردید. پس از اعتبار سنجی نتایج و انتخاب مدل مغشوش، تاثیر وجود محیط متخلخل، نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی و جنس دیواره محفظه بر راندمان تابشی میکرو محفظه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که وجود مواد متخلخل در میکرو برنر راندمان تابشی میکرو برنر را افزایش می‌دهد. همچنین وجود مواد متخلخل علاوه بر افزایش حد بیرون زدگی شعله، کاهش راندمان راندمان تابشی ناشی از افزایش شعله را برطرف می‌کند. علاوه بر این مشخص شد که وجود مواد متخلخل در سرتهای بالاتر مخلوط ورودی، تاثیر بیشتری بر راندمان تابشی میکرو برنر ایفا می‌کند. همچنین در بحث تاثیر نسبت هم‌ارزی

Insertion on CH₄ (Methane)/AIR Pre-Mixed Flame in a Micro Combustor. *Energy*, Vol. 54, pp. 271-284, 2012.

[17] Wan J., Fan A., Maruta K., Yao H. and Liu W., Experimental and Numerical Investigation on Combustion Characteristics of Premixed Hydrogen/Air Flame in a Micro-Combustor With a Bluff Body. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, pp. 19190-19197, 2012.

[18] Yang W. M., Chou S. K., Shu C., Li Z. W. and Xue H., Combustion in Micro-Cylindrical Combustors with and Without a Backward Facing Step. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, pp. 1777-1787, 2002.

[19] Jianlong Wan., Aiwu Fan., Hong Yao., Wei Liu., Experimental Investigation and Numerical Analysis on the Blow-off Limits Of Premixed CH₄/Air Flames In A Mesoscale Bluff-Body. *Energy*. Vol. 113, PP. 193-203, 2016.

[20] Juntian Niu., Jingyu Ran., Liya Li., Xuesen Du., Ruirui Wang., Mingchu Ran., effect of trapezoidal bluff bodies on blow out limit of methan/air combustion in a micro chanel. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 95, PP. 454-461, 2016.

[21] Li Zhang., Junchen Zhu., Yunfei Yan., Hongliang Guo., Zhongqing Yang., numerical investigation on the combustion characteristic of methan/air in a micro-combustor with a hollow hemispherical bluff body. *Energy Conversion and Management*. Vol.94,PP. 293-299, 2015.

[22] Seyed Ehsan Hosseini., Mazlan Abdul Wahid., Investigation of bluff-body micro-flameless combustion. *Applied Energy Conversion and Management*. Vol. 88, PP. 120-128, 2014.

[23] Ghobad Bagheri., Seyed Ehsan Hosseini., Mazlan Abdul Wahid., Effects of bluff body shape on the flame stability in premixed micro-combustion of hydrogen/air mixture. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 67, PP. 266-272, 2014.

[24] Alipoor A., Mazaheri K., shamounipour A., Dynamic of Lean Hydrogen/Air Flame Regims in Micro Scale Combustion. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 94-102, 2014. (in persian)

[25] Alipoor A., Mazaheri K., Faramarzpour H., Numerical Study of Asymmetric Flame in Micro Scale Combustion. *AERO2013-18375*. (in persian)

[26] Tsai C. H., The Asymmetric Behavior of steady laminar flame propagation in ducts. *Combustion Science and Technology*, Vol. 180, No. 3, pp. 533-545, Jan. 2008.

[27] Pizza G., Frouzakis C. E., Mantzaras j., Tomboulides J. A. G. and Boulouchos K., three dimensional simulation of premixed hydrogen /air flames in micro tubes. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 658, pp. 463-491, Aug. 2010.

[28] Atashafrooz M., Gandjalikhan Nassab S. A. and Lari K., Coupled thermal radiation and mixed convection step flow of non-gray gas. *Journal of Heat Transfer (ASME)*, Vol. 138, No.7, 072701, 2016.

[29] Cao J. H. L. and Xu J. L., Thermal Performance of A Micro-Combustor for Micro-Gas Turbine System. *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 1569-1578, 2007

[30] Fluent Inc., "FLUENT 6.3 User's Guide," Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, 2006.

[31] Edwards R.V., A new look at porous media fluid mechanics Darcy to turbulent. *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. Vol. 82 of the series NATO ASI Series, pp. 199-256, 1984.

[32] jun Li., Qingqing Li., Junrui Shi., Xueling Liu., Zhaoli Guo., Numerical Study on Heat Recirculation In A Porous Micro- Combustor. *Combustion and Flame*, Vol. 171, PP. 152-161, 2016.