



## Numerical study of hydrogen-air premixed mixture in radial micro combustors for usage in a micro thermophotovoltaic system

Alireza Alipoor<sup>1\*</sup>, Arian Kakhoda<sup>2</sup>, Pouyan Abbaspour<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

\* P.O.B. 71348-51154, Shiraz, Iran, a.alipoor@shirazu.ac.ir

### Article info

#### Article history:

Received: 19 Nov 2020

Revised: 6 Feb 2021

Accepted: 5 May 2021

Available online: 2 Feb 2022

#### Keywords:

Hydrogen

Micro thermophotovoltaic

Radial micro combustor

Radiation efficiency

<https://doi.org/10.22077/AEC.2021.3910.1001>

### Abstract

The purpose of this research is investigation of performance and potential of a radial micro combustion chamber which is designed for a micro thermophotovoltaic system as well as, study of combustion characteristics of premixed H<sub>2</sub>-air mixture. Conservation equations of flow, energy and species are solved in a three-dimensional geometry with into account detailed chemical kinetics for H<sub>2</sub>-air mixture with CFD approach. Investigated parameters in this research contain inlet velocity, gap distance and wall thickness. Achieved results showed that inlet velocity enhancement causes to approach the combustion zone to the wall and stretch that to the downstream. It causes to increase wall temperature and consequently, increase the micro thermophotovoltaic efficiency. Upon increasing of inlet velocity, circulation zone inside the micro combustor will be stronger and also, temperature distribution on the outer surface of the bottom wall becomes more uniform. Result indicates increasing of inlet velocity to 15 m/s is not reasonable and it has revers effect on efficiency. Results proved that decrease of the gap distance and enhancement of the wall thickness have desirable effect on the micro thermophotovoltaic efficiency enhancement. The micro efficiency calculated for all cases, and resulted that maximum accessible efficiency is 2.63%. In this research, obtained results are unique for the radial micro combustors, and indicated that radial micro combustors have ability of competition with other micro combustors in order to usage in the micro thermophotovoltaic systems.

## مطالعه عددی مشخصه‌های احتراقی مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در میکرومحفظه شعاعی به منظور استفاده در یک سیستم میکروترموفتوولتائیک

علیرضا علی‌پور<sup>۱\*</sup>، آریان ککخدا<sup>۲</sup>، پویان عباسپور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

\* a.alipoor@shirazu.ac.ir، شیراز، ایران، ۵۱۱۵۴-۷۱۳۴۸

### چکیده

هدف پژوهش حاضر بررسی عملکرد و پتانسیل یک میکرومحفظه احتراق شعاعی طراحی شده برای یک سیستم میکروترموفتوولتائیک در کنار مطالعه عددی مشخصه‌های احتراقی مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا است. معادلات جریان به همراه معادله بقای انرژی و معادله بقای گونه با استفاده از رویکرد دینامیک سیالات محاسباتی و به صورت سه بعدی با در نظر گرفتن سینتیک شیمیایی جزئی حل گردید. پارامترهای بررسی شده در این پژوهش شامل سرعت ورودی جریان، فاصله صفحه‌های دایره‌ای و ضخامت دیوار هستند. نتایج بدست آمده نشان دادند که افزایش سرعت ورودی جریان موجب نزدیک شدن ناحیه احتراق به دیوار و کشیده شدن آن به پایین دست جریان می‌شود. این مورد سبب می‌شود تا دمای دیوار افزایش یابد و به دنبال آن بازده سیستم میکروترموفتوولتائیک افزایش یابد. با افزایش سرعت ورودی، ناحیه چرخشی قوی‌تر و توزیع دما روی سطح بیرونی دیوار پایین یکنواخت‌تر می‌شود. با این حال، نتایج نشان داد که افزایش سرعت ورودی جریان بیش از مقدار 15 m/s توجه‌پذیر نیست و منجر به کاهش بازده کل سیستم می‌شود. نتایج ثابت کرد که کاهش فاصله صفحه‌های دایره‌ای از هم و همچنین، افزایش ضخامت دیوار در افزایش بازده سیستم نتیجه مطلوب دارند. بازده سیستم برای تمام موارد محاسبه و نتیجه شد که بیشترین بازده قابل دست‌یابی برای سیستم میکروترموفتوولتائیک مورد بررسی 2.63 درصد است. نتایج بدست آمده در این پژوهش برای میکرومحفظه‌های احتراق شعاعی نشان دادند که این محفظه‌ها توانایی رقابت با سایر میکرومحفظه‌های احتراقی به منظور استفاده در سیستم‌های میکروترموفتوولتائیک را دارا هستند.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۹۹/۰۸/۲۹

بازنگری: ۹۹/۱۱/۱۸

پذیرش: ۰۰/۰۲/۱۵

نشر برخط: ۰۰/۱۱/۱۳

کلمات کلیدی:

هیدروژن

میکروترموفتوولتائیک

میکرومحفظه شعاعی

بازده تشعشعی

پژوهش‌ها روی رژیم‌های شعله درون میکروکانال‌های صفحه موازی، مطالعه علی‌پور و مظاهری [۹] منجر به ارائه نقشه‌های جریان بر مبنای سه پارامتر سرعت ورودی، نسبت هم‌ارزی و عرض میکروکانال شد که به موجب آن‌ها شرایط عملکرد پایای محفظه احتراق تعیین شد.

در طراحی محفظه احتراق برای سیستم‌های میکروترموفتولتاییک، توزیع دمای سطح خارجی محفظه احتراق اهمیت فراوانی دارد. به گونه‌ای که هرچه دمای سطح خارجی بیشتر و توزیع دمای آن در نتیجه بازچرخش مطلوب گرما یکنواخت‌تر باشد، عملکرد گرمایی محفظه احتراق مطلوب‌تر است و منجر به افزایش بازده تشعشعی و بازده کلی سیستم میکروترموفتولتاییک می‌شود. بنابراین، یکی از مهمترین اهداف بهبود عملکرد گرمایی محفظه احتراق، دستیابی به بازده بیشتر برای سیستم‌های میکروترموفتولتاییک است. در این راستا، یانگ و همکاران [۱۰] تاثیر استفاده از پله درون محفظه احتراق میکرو جهت افزایش بازده یک سیستم میکروترموفتولتاییک را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که ایجاد پله در محفظه احتراق موجب افزایش مقیاس زمانی جریان سیال در محفظه احتراق شده و منجر به جلوگیری از کندن شعله در سرعت‌های ورودی زیاد می‌شود. بنابراین، امکان استفاده از سرعت‌های ورودی بیشتر برای مخلوط سوخت و هوای ورودی به محفظه احتراق فراهم می‌شود که نتیجه آن افزایش بازده سیستم میکروترموفتولتاییک مربوطه است. با این رویکرد، فرامرزپور و همکاران [۱۱] نشان دادند که وجود پله باعث گسترش حد شعله‌وری شده و با کاهش ارتفاع پله، متوسط دمای دیوار افزایش می‌یابد. کام و همکاران [۱۲] احتراق مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا را به صورت عددی در یک میکرولوله همراه با پله مطالعه کردند. نتایج ایشان نشان دادند که در نسبت هم‌ارزی بین 0.8 تا 1 توزیع دما روی سطح خارجی محفظه احتراق یکنواخت‌تر و در نتیجه، بازده تشعشعی محفظه احتراق بیشتر است.

اختر و همکاران [۱۳] به بررسی تاثیر شکل سطح مقطع میکرو محفظه‌های پله‌ای بر توزیع دما روی دیوار سطح خارجی و بازده سیستم میکروترموفتولتاییک مربوطه پرداختند. ایشان نتیجه گرفتند که میکرو محفظه‌های پله‌ای با مقطع دوزنقه و مثلثی نسبت به نوع دایره‌ای عملکرد بهتری به ترتیب در سرعت جریان‌های ورودی کم، متوسط و زیاد دارند. علت آن، افزایش گردابه‌های ایجاد شده در ناحیه جریان چرخشی (بعد از پله) در این هندسه‌ها گزارش شد. در ادامه با ایجاد تغییرات هندسی بیشتر در محفظه احتراق به منظور افزایش بازده سیستم‌های میکروترموفتولتاییک، اختر و همکاران [۱۴] میکرو محفظه‌های پله‌ای انحنادار را بررسی کردند. نتایج نشان دادند که حدود پایداری شعله وابسته به درجه انحنای محفظه احتراق است و با افزایش درجه انحنای محفظه احتراق، شعله بیشتر مستعد ناپایدار شدن می‌شود. علی پور و سعیدی [۱۵] تاثیر استفاده از میکرو محفظه‌های احتراق لوله‌ای U شکل با ساختار ساده (یک میکرولوله U شکل) و ترکیبی (دو میکرولوله U شکل) را بر بهبود مشخصه‌های احتراق هیدروژن-هوا بررسی کردند. نتیجه شد که استفاده از ساختار ترکیبی در سرعت ورودی یکسان منجر به تشکیل شعله در فاصله نزدیک‌تری از ورودی محفظه احتراق می‌شود. همچنین، با مطالعه تاثیر نسبت انحنای میکرولوله به شعاع آن مشخص شد که در نسبت انحنای کمتر، پیش‌گرمایش مخلوط سوخت و هوای ورودی توسط محصولات احتراق بهتر صورت می‌گیرد و باعث می‌شود تا جبهه شعله به ورودی نزدیک‌تر و توزیع دما درون محفظه احتراق بهتر صورت گیرد. پنگ و همکاران [۱۶] تاثیر ضخامت دیوار محفظه احتراق و طول پله را بر پایداری شعله و عملکرد گرمایی محفظه احتراق میکرو به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. سیستم میکروترموفتولتاییک طراحی شده توسط ایشان موفق به ثبت توان خروجی  $1.20 \text{ W}$  و بازده  $1.14$  درصد شد. نتایج ایشان نشان داد که دمای سطح خارجی دیوار با کاهش ضخامت دیوار افزایش می‌یابد در حالیکه، موقعیت و مقدار بیشینه دما ثابت می‌مانند. همچنین، با مطالعه تاثیر طول پله مشخص شد که کاهش طول پله موجب پایداری بهتر شعله می‌شود. زو و همکاران [۱۷] احتراق مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا را به صورت عددی در محفظه احتراق متشکل از چهار میکروکانال با مقطع دایره‌ای با آرایش جریان‌های مختلف از قبیل جریان همسو و ناهمسو بررسی کردند. نتایج نشان دادند که هر اندازه میزان ناهمسو بودن جریان بیشتر باشد، دمای دیوار محفظه احتراق یکنواخت‌تر است. برای موردی که جریان به صورت یکی در میان در کانال‌ها ناهمسو باشد، دمای دیوار بیشترین میزان یکنواختی را دارد. همچنین، برای دستیابی به دمای بیشتر و یکنواخت‌تر برای دیوار مشخص شد که نسبت

افزایش تقاضا برای ساخت و طراحی تجهیزات کوچک جهت تولید توان الکتریکی نظیر سیستم‌های میکروترموفتولتاییک منجر به اهمیت پیدا کردن موضوع احتراق در مقیاس‌های کوچک شده است. انرژی شیمیایی ذخیره شده در سوخت هیدروکربنی طی فرآیند احتراق درون یک محفظه احتراق کوچک به صورت گرما آزاد می‌شود. با توجه به کوچک بودن طول مشخصه محفظه احتراق (یا بالا بودن نسبت سطح جانبی به حجم آن)، کسر زیادی از گرمای آزاد شده طی فرآیند احتراق به محیط اطراف اتلاف می‌شود. با قرار دادن آرایه‌ای از سلول‌های ترموفتولتاییک اطراف محفظه احتراق، امکان تولید الکتریسیته از گرمای حاصل از احتراق فراهم می‌شود. چگالی انرژی سوخت‌های هیدروکربنی حدود  $20$  الی  $50$  برابر و سوخت هیدروژن حدود  $100$  برابر بیشتر از باتری‌های یون-لیتیوم متداول امروزی است. بنابراین، استفاده از انرژی شیمیایی سوخت هیدروژن و سایر سوخت‌های هیدروکربنی به‌جای استفاده از باتری‌ها در این تجهیزات کوچک، موجب افزایش بازده سیستم‌های تولید توان در مقیاس کوچک می‌شود. با این حال، کوچک شدن طول مشخصه محفظه احتراق تا مرتبه فاصله (قطر) خاموشی شعله منجر به بروز پدیده‌های ناپایداری، بیرون زدن یا کندن شعله از محفظه احتراق و در نهایت خاموشی شعله می‌شود. در نتیجه، بررسی هندسه‌های گوناگون برای محفظه‌های احتراق با ابعاد کوچک به منظور استفاده در سیستم‌های میکروترموفتولتاییک در کنار بررسی انواع پدیده‌های خاموشی و ناپایداری شعله موضوع پژوهش‌های رایج در این زمینه بوده است.

رونی [۱] احتراق غیر آدیاباتیکی در محفظه احتراق با ابعاد میکرو را با در نظر گرفتن بازچرخش گرما از طریق دیوار بررسی کرد. دیوار علاوه بر اتلاف گرما، می‌تواند با جذب گرمای آزاد شده احتراق و انتقال آن به بالادست جریان از طریق رسانش طولی، موجب پیش‌گرم کردن مخلوط سوخت و هوای ورودی به محفظه احتراق تا رسیدن به دمای اشتعال و در نتیجه خوداتکاپی و پایداری احتراق شود. این ویژگی دیوار، بازچرخش گرما نامیده می‌شود. نتایج نشان دادند زمانیکه مقیاس زمانی جریان سیال با مقیاس زمانی انجام واکنش احتراق قابل مقایسه باشد، حد شعله‌وری بالا در دی‌های جری زیاد مشاهده می‌شود. همچنین، یک حد شعله‌وری پایین در دی‌های جری کم وجود دارد. نورتن و لاکوس مطالعه عددی مشخصه‌های احتراقی متان-هوا [۲] و پروپان-هوا [۳] را به منظور بررسی تاثیر پارامترهای فیزیکی محفظه احتراق، ضریب رسانش گرمایی دیوار، ضریب انتقال گرمای جابجایی از سطح خارجی دیوار و سرعت جریان ورودی برای مخلوط استوکیومتری مورد بررسی قرار دادند. مطالعه عددی ایشان منجر به تعیین حدود شعله‌وری برای سوخت‌های نامبرده شد. لیچ و همکاران [۴] از یک مدل یک بعدی برای معادلات بقای گونه‌ها و بقای انرژی در سیال و دیوار جامد به منظور بررسی تاثیر انتقال حرارت محوری از ناحیه بعد از احتراق به ناحیه پیش‌گرمایش استفاده کردند. نتایج نشان دادند که انتقال گرمای محوری بر روی حد شعله‌وری و افزایش نرخ سوختن از طریق پیش‌گرمایش مخلوط سوخت و هوای ورودی تاثیر فراوانی دارد. در ادامه، کیم و همکاران [۵] و ژنگ و همکاران [۶] به صورت تجربی نشان دادند که با استفاده از بازچرخش گرما امکان ایجاد احتراق پایدار در فاصله‌های کمتر از فاصله خاموشی شعله در میکرومحفظه‌های احتراق حلزونی به ترتیب برای مخلوط پروپان-هوا و متان-هوا امکان‌پذیر است. زروندی و همکاران [۷] به مطالعه تاثیر ضخامت و ضریب رسانش گرمایی دیوار محفظه احتراق بر پایداری شعله پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا درون محفظه احتراق میکرو پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که افزایش رسانش گرمایی و ضخامت دیوار، بازچرخش گرما از طریق دیوار را تسهیل می‌کند. نتیجه آن هموارتر شدن توزیع دما روی سطح خارجی دیوار محفظه احتراق و به‌دنبال آن بهبود شرایط احتراق و عملکرد گرمایی در محفظه احتراق است. علی‌پور و همکاران [۸] به بررسی تاثیر سرعت ورودی مخلوط رقیق و پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا بر رژیم‌های مختلف انتشار شعله درون محفظه احتراق دوبعدی متشکل از دو صفحه موازی پرداختند. مطالعه عددی ایشان نشان داد با تغییر سرعت ورودی، سه رژیم خاموشی-اشتعال مکرر، پایای متقارن و پایای نامتقارن در محفظه احتراق ایجاد می‌شود. ایجاد رژیم اشتعال-خاموشی مکرر ناشی از عدم برقراری تعادل بین مقیاس‌های زمانی جریان سیال و واکنش شیمیایی گزارش و نتیجه شد که باعث عدم عملکرد گرمایی مطلوب محفظه احتراق می‌شود. با افزایش سرعت جریان ورودی، مقیاس زمانی جریان سیال درون محفظه احتراق کاهش یافته و تعادل میان مقیاس زمانی جریان سیال و زمان واکنش شیمیایی برقرار می‌شود. نتیجه آن تشکیل شعله پایا ولی نامتقارن در محفظه احتراق گزارش شد. در ادامه

هم‌ارزی باید بیشتر از 0.7 و ضریب رسانش گرمایی دیوار محفظه احتراق بزرگتر از مقدار 1 W/m. K باشد.

صابری مقدم و همکاران [۱۸] تاثیر جسم مانع بر دمای خارجی محفظه احتراق میکرو را برای مخلوط پیش‌آمیخته و رقیق هیدروژن-هوا بررسی کردند. مطالعه عددی ایشان شامل بررسی شکل و تعداد جسم مانع در مسیر جریان واکنشی بود. نتیجه شد که بیشینه دمای سطح خارجی محفظه احتراق برای جسم مانع مثلی اندکی بیشتر از جسم مانع مربعی است در حالیکه، بازده تشعشعی محفظه احتراق برای جسم مانع مربعی بیشتر است. همچنین، نتیجه شد که با افزایش تعداد جسم مانع در مسیر جریان، دمای سطح خارجی محفظه احتراق به علت ایجاد یک میدان حرارتی نسبتاً یکنواخت افزایش می‌یابد. انصاری و امانی [۱۹] مطالعه‌ای با هدف بررسی استفاده از جسم مانع و بافل در یک محفظه احتراق میکرو انجام دادند. در حالت کلی نتیجه شد که بدون جسم میانی، شعله در بعضی از شرایط پایدار نیست. همچنین، در غیاب استفاده از بافل، بازده احتراق حدود 4 درصد کاهش می‌یابد. کیان و همکاران [۲۰] به بررسی تاثیر ایجاد جسم مانع در محفظه احتراق متخلخل بر افزایش بازده یک سیستم میکروترموفتولتاییک پرداختند. مطالعه عددی ایشان نشان داد که پایداری شعله کاملاً تحت تاثیر بازچرخش گرما و جریان چرخشی ایجاد شده در ناحیه پشت جسم مانع است. همچنین، نتایج نشان دادند که بازده سیستم با اضافه کردن جسم مانع در نسبت‌های هم‌ارزی 0.6، 0.8، 1، و 1.2 به ترتیب 33%، 19%، 12% و 20% افزایش می‌یابد. بانی و همکاران [۲۱] موفق به طراحی یک میکرومحفظه احتراق با استفاده از محیط متخلخل با ساختار شبکه‌ای شدند. با احتساب مقدار بازده درصد برای بازده تبدیل میکروترموفتولتاییک، میکرومحفظه مورد نظر ایشان موفق به ثبت بازده کل 4.37% شد. پنگ و همکاران [۲۲] نشان دادند با اضافه کردن پرویان به مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در یک میکرولوله همراه با پله که به صورت جزئی توسط محیط متخلخل پر شده است، می‌توان به حداکثر بازده کل 2% دست یافت. نتایج ایشان نشان دادند که ناحیه چرخشی ایجاد شده در قسمت بعد از پله و قبل از محیط متخلخل موجب گسترش ناحیه احتراق، افزایش دمای گازها و در نتیجه، افزایش بازده سیستم می‌شود.

از جمله هندسه‌های دیگری که جهت مطالعه مشخصه‌های احتراقی مورد توجه قرار گرفته‌اند، می‌توان به میکرومحفظه‌های شعاعی اشاره کرد. این محفظه‌ها از دو صفحه دایره‌ای تشکیل شده‌اند که با یک فاصله مشخص، به موازات هم قرار گرفته‌اند [۲۳]. مخلوط سوخت و هوا از طریق یک میکرولوله که به صفحه دایره‌ای بالا متصل شده، وارد فضای میان صفحه‌های دایره‌ای می‌شود. احتراق می‌تواند هم در قسمت میکرولوله و هم در فضای میان صفحه‌ها تحت شرایط خاصی ایجاد شود. به منظور ایجاد جرقه و آغازش فرآیند احتراق، صفحه دایره‌ای پایینی توسط یک مشعل متخلخل حرارت داده می‌شود. پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه متمرکز بر مطالعه دینامیک شعله بوده که منجر به ثبت شکل‌های پایدار و ناپایدار انتشار شعله در فضای میان صفحات به صورت تجربی بوده است [۲۴-۲۵]. مطابق مشاهدات تجربی صورت گرفته در مراجع نام برده، ایجاد احتراق پایدار در میکرومحفظه‌های شعاعی امکان‌پذیر است. با شتاب گرفتن پژوهش‌های مرتبط با کاربرد میکرواحتراق در سیستم‌های میکروترموفتولتاییک به ویژه در سال‌های اخیر و نیاز به میکرو محفظه‌های احتراقی با عملکرد گرمایی مطلوب‌تر، نویسندگان پژوهش حاضر بر این باور هستند که جایگاه میکرو محفظه‌های شعاعی در توسعه سیستم‌های میکروترموفتولتاییک خالی مانده است. بنابراین، هدف پژوهش حاضر مطالعه عددی مشخصه‌های احتراقی مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در میکروکانال‌های شعاعی به صورت سه‌بعدی و پایا و بررسی پتانسیل این محفظه‌ها جهت استفاده در سیستم‌های میکروترموفتولتاییک است. پارامترهای مورد بررسی شامل سرعت جریان ورودی، فاصله صفحه‌های دایره‌ای و ضخامت هستند. همچنین، لازم به توضیح است که داده‌های استخراج شده از نتایج در پژوهش حاضر برای میکرومحفظه‌های احتراق شعاعی یکتا هستند.

## ۲ - معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی، بقای تکانه، انرژی، بقای گونه‌ها و معادله حالت گاز کامل برای سیال هستند. همچنین، معادله بقای انرژی در دیوار به منظور در نظر گرفتن تاثیر دیوار (بازچرخش گرما و اتلاف گرما) بر ناحیه احتراق در معادلات حاکم لحاظ شده است. معادلات حاکم توسط رابطه‌های (۱) تا (۶) ارائه شده‌اند.

پیوستگی:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

بقای تکانه:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( -\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (2)$$

در رابطه‌های بالا،  $\rho$ ،  $u$ ،  $P$  و  $\mu$  به ترتیب چگالی، بردار سرعت، فشار و لزجت دینامیکی سیال هستند. معادله انرژی در سیال:

$$\frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_f \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho \sum_{k=1}^N h_k Y_k V_{k,i} \right) + \sum_{i=1}^N h_i \dot{\omega}_i \quad (3)$$

در این رابطه،  $k_f$  ضریب رسانش گرمایی سیال و  $h_k$  آنتالپی گونه است. همچنین،  $h$ ،  $V_k$ ،  $Y_k$  و  $\dot{\omega}_T$  به ترتیب آنتالپی کل، کسر جرمی گونه، سرعت نفوذی گونه و نرخ گرمای آزاد شده واکنش می‌باشند. معادله بقای گونه‌ها:

$$\frac{\partial(\rho u_i Y_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_i \quad (4)$$

در این رابطه،  $D_{i,m}$  و  $\dot{\omega}_i$  به ترتیب ضریب نفوذ جرمی گونه  $i$  ام در مخلوط و نرخ تولید و مصرف گونه‌های شیمیایی است. معادله حالت گاز ایده‌آل:

$$P = \rho \frac{R_u}{W} T \quad (5)$$

در این رابطه،  $\bar{W}$  و  $R_u$  به ترتیب وزن مولکولی میانگین مخلوط و ثابت جهانی گازها می‌باشند. معادله انرژی در دیوار:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (6)$$

در این رابطه،  $k_s$  ضریب رسانش گرمایی دیوار است.  $V_k$  در معادله (۳) از رابطه (۷) محاسبه می‌شود. همچنین،  $D_{i,m}$  از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$V_k = - \left( \frac{D_{i,m}}{X_i} \right) \nabla X_i \quad (7)$$

در این رابطه،  $X_i$  کسر مولی گونه  $i$  است.

$$D_{im} = \frac{1 - x_i}{\sum_{j \neq i} \left( \frac{x_j}{D_{ij}} \right)} \quad (8)$$

در این رابطه،  $D_{ij}$  ضریب نفوذ دوتایی گونه  $i$  و  $j$  است که از رابطه چاپمن-انساکاک به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۶].

$$\eta_{Rad} = \frac{\dot{Q}_{Rad}}{\dot{Q}_R} \quad (15)$$

در رابطه بالا  $\dot{Q}_R$  و  $\dot{Q}_{Rad}$  به ترتیب نرخ گرمای تشعشی و نرخ انرژی شیمیایی آزاد شده هستند که توسط رابطه‌های زیر تعریف می‌شوند.

$$\dot{Q}_{Rad} = \sigma \varepsilon A (T_w^4 - T_{sur}^4) \quad (16)$$

$$\dot{Q}_R = \dot{m}_{H_2} Q_{LHV} \quad (17)$$

در رابطه‌های بالا  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $T_w$  و  $A$  به ترتیب ثابت استفان-بولتزمن، ضریب صدور سطح، دمای دیوار، سطح انتقال گرما و دمای محیط اطراف هستند.  $\dot{m}_{H_2}$  دبی جرمی هیدروژن و  $Q_{LHV}$  ارزش حرارتی پایین سوخت هیدروژن است که مقدار 119 MJ/Kg در نظر گرفته شده است [26]. بازده کل سیستم میکروترموفتوتولتاییک به صورت حاصلضرب بازده تشعشی در بازده تبدیل میکروترموفتوتولتاییک  $\eta_{MTPV}$  مطابق رابطه (18) تعریف می‌شود که با توجه به مراجع موجود مقدار 15% برای بازده تبدیل میکروترموفتوتولتاییک در نظر گرفته می‌شود.

$$\eta_{Total} = \eta_{Rad} \eta_{MTPV} \quad (18)$$

### ۳ - هندسه مسئله

هندسه مسئله شامل یک میکروکانال شعاعی است که ابعاد آن مشابه ابعاد هندسه مرجع [29] انتخاب شده و در شکل‌های (الف) و (ب) به ترتیب در نمای دوبعدی و سه‌بعدی نشان داده شده است. مطابق شکل، قطر قسمت میکرولوله 4 mm، قطر صفحه‌های دایره‌ای 50 mm، فاصله صفحه‌ها 2 mm و ضخامت دیوار 1 mm تعیین شده است. جهت بررسی تاثیر فاصله صفحه‌ها و ضخامت دیوار، اندازه آن‌ها تغییر خواهد کرد.

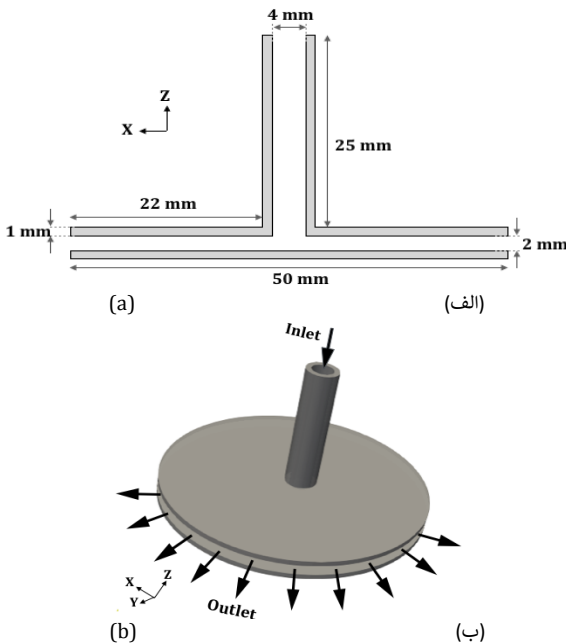


Fig. 1. (a) Schematic of radial micro channel with dimension, (b) 3-D view of radial micro channel.

شکل ۱. (الف) نمای برش‌خورده از میکروکانال شعاعی به همراه ابعاد آن، (ب) نمای سه‌بعدی میکروکانال شعاعی.

$$D_{ij} = 10.1325 \frac{0.001858T^{1.5}(W_{ij})^{-0.5}}{p\sigma_{ij}^2\Omega_D}$$

$$\sigma_{ij} = \frac{\sigma_i + \sigma_j}{2}, W_{ij} = \left(\frac{1}{W_i} + \frac{1}{W_j}\right)^{-1}$$

$$\Omega_D = \frac{1.06036}{T_N^{0.15610}} + \frac{0.193}{\exp(0.47635T_N)} + \frac{1.03587}{\exp(1.52996T_N)} + \frac{1.76474}{\exp(3.89411T_N)}$$

$$T_N = \frac{T}{E_{ij}}, E_{ij} = \frac{\varepsilon_{ij}}{k_B}$$

$$\varepsilon_{ij} = (\sqrt{\varepsilon_i \varepsilon_j}) \quad (9)$$

در روابط بالا  $W_i$ ,  $\sigma_i$ ,  $k_B$  و  $\varepsilon_{ij}$  به ترتیب وزن مولکولی گونه  $i$  ام، قطر برخورد، ثابت بولتزمن و انرژی (پتانسیل) لندارد-چونز هستند. برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل K- $\varepsilon$  Realizable به دلیل توانایی بالای آن در ثبت جریان‌های چرخشی و اختلاط [27] استفاده شده است و معادلات انتقالی آن مطابق مرجع [12] به صورت زیر نمایش داده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - \gamma_M + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (11)$$

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon},$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (12)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (13)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}}, U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \bar{\Omega}_{ij} \bar{\Omega}_{ij}}$$

$$\bar{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k, \quad \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k$$

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \phi$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W), \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\bar{S}^3}$$

$$\bar{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (14)$$

در معادلات فوق  $\mu_t$  لزجت آشفته‌گی است.  $k$  انرژی جنبشی توربولانسی،  $\varepsilon$  نرخ اتلاف آشفته‌گی،  $G_k$  انرژی جنبشی تولید شده در اثر آشفته‌گی،  $G_b$  انرژی جنبشی ناشی از اثرات شناوری،  $\gamma_M$  نوسانات تاخیر در آشفته‌گی،  $C_{1\varepsilon}$  و  $C_2$  ثابت‌های مدل هستند.  $\bar{\Omega}_{ij}$  نرخ متوسط تانسور چرخش است که در یک مرجع متحرک با سرعت زاویه‌ای  $\omega_k$  در نظر گرفته می‌شود.

همچنین،  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  اعداد پرانتل مربوط به  $k$  و  $\varepsilon$  و  $S_k$  به همراه جمله‌های چشمه هستند. برای بررسی بازده سیستم میکروترموفتوتولتاییک، دو بازده به نام‌های بازده تشعشی  $\eta_{Rad}$  و بازده کل  $\eta_{total}$  در نظر گرفته شده و به صورت رابطه‌های زیر برمی‌نمای مرجع [28] تعریف می‌شوند.



سلول‌های بیشتر از 456000 مستقل از تعداد سلول‌ها است. بنابراین، در ادامه کار از شبکه با تعداد سلول‌های 456000 برای ادامه حل عددی و بررسی پارامترها استفاده شده است.

۴ - شرایط مرزی و روش حل عددی

در ورودی برای سرعت، دما و کسر جرمی گونه‌ها از شرط مرزی دیریکله استفاده شده است. دمای مخلوط پیش‌آمیخته ورودی 300 کلوین در نظر گرفته شده است و مقدار کسر جرمی گونه‌ها در ورودی با توجه به نسبت هم‌ارزی تعیین می‌شود. برای فشار در مرز ورودی از شرط مرزی نیومان برابر با گرادیان فشار صفر استفاده شده است. برای سرعت روی دیوار درونی محفظه احتراق شرط عدم لغزش و برای فشار و کسر جرمی گونه‌ها شرط مرزی نیومان برابر با گرادیان صفر استفاده شده است. برای دما از شرط مرزی کوپل دمایی در سطح مشترک گاز و دیوار درونی استفاده شده است. در مرز خروجی از شرط مرزی نیومان برای سرعت، دما و کسر جرمی گونه‌ها استفاده شده است. همچنین، برای فشار از شرط مرزی دیریکله استفاده شده است. برای سطح خارجی دیوار محفظه احتراق، هر دو مکانیزم انتقال گرمای جابجایی و تشعشع در نظر گرفته شده است. همچنین، دمای محیط اطراف 300 کلوین فرض شده است.

برای حل عددی معادلات حاکم از نرم‌افزار تجاری Fluent 18.2 استفاده شده است. در این نرم‌افزار تنظیماتی از قبیل مدل Realizable K-ε برای جریان آشفتنه، مدل Discrete Ordinate (DO) برای تابش گرمایی و الگوریتم سیمپل برای کوپل میدان‌های سرعت و فشار در نظر گرفته شده است. مرتبه بزرگی باقیمانده‌ها جهت بررسی همگرایی مقدار  $10^{-6}$  تنظیم شده است. برای سینتیک احتراق هیدروژن و هوا از مکانیزم احتراق مرجع [۳۰] شامل 9 گونه شیمیایی و 21 واکنش مقدماتی استفاده شده و از واکنش‌های سطحی صرف نظر شده است.

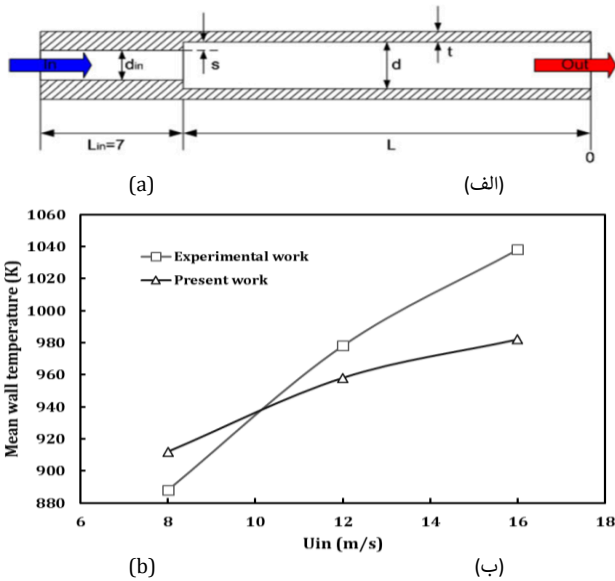


Fig. 3. (a) Schematic of combustor for validation, (b) Validation of the present results with experiment data.

شکل ۳. الف) شماتیک محفظه احتراق برای صحت‌سنجی؛  $d_{in} = 1 \text{ mm}$ ;  $t = 0.5 \text{ mm}$ ;  $d = 2 \text{ mm}$ ;  $L = 20 \text{ mm}$ ;  $s = 0.5 \text{ mm}$  (ب) صحت‌سنجی نتایج عددی کار حاضر با نتایج تجربی.

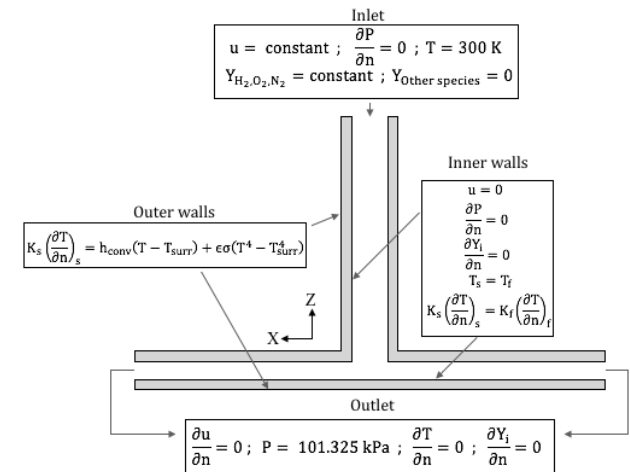


Fig. 2. Boundary conditions of simulation.

شکل ۲. شرایط مرزی به کار گرفته شده برای حل عددی.

۵ - صحت‌سنجی و مطالعه دقت شبکه محاسباتی

نتایج آزمایشگاهی مرجع [۳۱] جهت بررسی صحت‌سنجی حلگر انتخاب شده است. در این مرجع، توزیع دما و بازده تشعشعی احتراق پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا درون میکرولوله‌های پله‌ای به صورت تجربی بررسی شده است. در شکل (۳-الف) هندسه در نظر گرفته شده برای صحت‌سنجی و در شکل (۳-ب) نمودار مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. مطابق شکل (۳-ب)، بیشترین اختلاف با نتایج تجربی برابر با 39.5 درصد و مربوط به سرعت ورودی 16 m/s است. بنابراین، حلگر موردنظر از دقت قابل قبولی برخوردار است. جهت بررسی دقت شبکه محاسباتی، سه شبکه با تعداد سلول‌های متفاوت تولید شدند و مورد حل قرار گرفتند.

برای ارائه سازمان‌یافته‌تر نتایج، تعدادی خط راهنما مطابق شکل (۴-الف) درون هندسه تعریف شده است. مطابق شکل، خط A-A' در امتداد محور قسمت میکرولوله، خط B-B' در امتداد قطر قسمت دایره‌ای و در وسط فاصله بین دو صفحه دایره‌ای، خط C-C' روی دیوار میکرولوله و در امتداد محور آن و خط E-E' روی دیوار صفحه دایره‌ای پایین و در امتداد قطر آن تعریف شده است. در شکل (۴-ب) نمودار تغییرات دما روی خط B-B' برای شبکه‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل، نتیجه می‌شود که تغییرات دما برای شبکه با تعداد

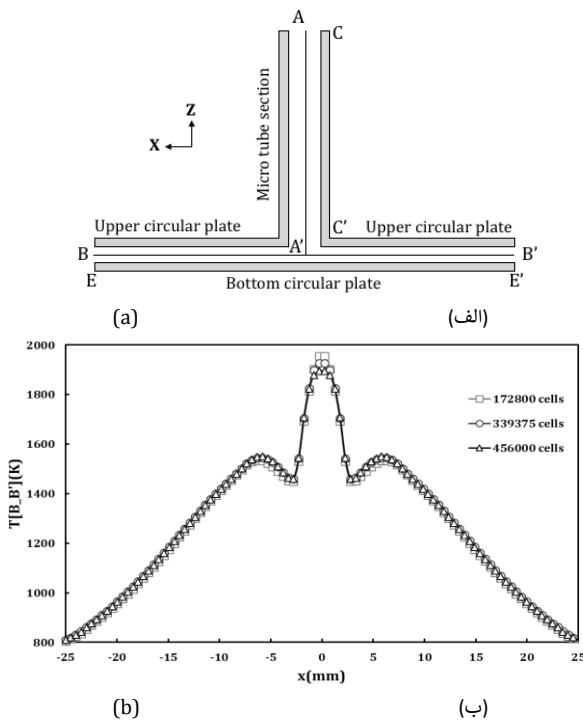


Fig. 4. (a) Schematic geometry with considered line for extracting data. (b) Temperature variation along B – B' line for different grids.

شکل ۴. الف) خط‌های راهنما در میدان جریان و سطوح خارجی، (ب) تغییرات دما در امتداد خط B – B' برای شبکه‌های مختلف.

۶ - ارائه نتیجه‌ها و تفسیر داده‌ها

این بخش به ارائه نتیجه‌ها و تفسیر داده‌های حاصل از حل عددی اختصاص می‌یابد. در تمامی موارد این بخش نسبت هم‌ارزی مقدار ثابت 0.8 انتخاب شده است. دلیل آن به نتایج حاصل شده از پژوهش‌های پیشین در این زمینه برمی‌گردد. با توجه به

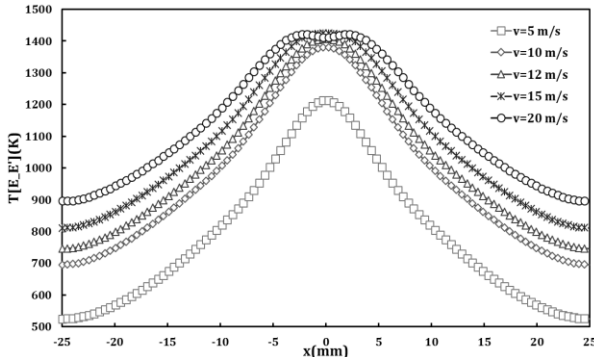


Fig. 6. Variation of temperature on E – E' line for different inlet velocities.  
شکل ۶. تغییرات دما روی خط E – E' برای سرعت‌های ورودی مختلف.

گونه OH یک گونه فعال در جبهه شعله است. زیرا واکنش احتراق در دماهای بالا به سمت تولید گونه‌های سبک مانند OH، O، و H حرکت می‌کند. بنابراین، کسر جرمی OH می‌تواند به عنوان شاخصی برای تعیین موقعیت جبهه شعله استفاده شود. شکل (V) نمودار تغییرات کسر جرمی OH را با سرعت ورودی در امتداد خط B – B' در قسمت دایره‌ای نشان می‌دهد. مطابق شکل، تولید گونه OH با افزایش سرعت ورودی افزایش می‌یابد. دلیل آن کشیدگی ناحیه احتراق به قسمت دایره‌ای در اثر افزایش سرعت ورودی است که موجب می‌شود ناحیه احتراق در قسمت دایره‌ای در سرعت‌های ورودی بالا گسترده‌تر شود. در نتیجه، دمای دیوار مطابق شکل (۶) یکنواخت‌تر شود.

مطابق شکل (V)، نمودارها در نقطه  $X = 0$  به غیر از سرعت ورودی 20 m/s دارای بیشینه مقدار هستند. دلیل آن، شدت گرفتن واکنش‌ها در اثر برخورد جریان به صفحه پایین است. زیرا در اثر برخورد جریان به صفحه پایین، یک ناحیه سکون ایجاد می‌شود. ناحیه سکون باعث افزایش مقیاس زمانی جریان در مقایسه با مقیاس زمانی واکنش و در نتیجه، افزایش تولید OH در اثر شدت گرفتن واکنش‌ها می‌شود. در سرعت ورودی 5 m/s، میزان تولید OH کمتر از سایر سرعت‌ها است. دلیل آن قرار گرفتن قسمت عمده ناحیه احتراق در نزدیکی مرز ورودی با توجه به شکل (۵) است. مطابق شکل (V)، نمودار در سرعت ورودی 20 m/s دارای دو نقطه بیشینه است. دلیل آن جدا شدن ناحیه احتراق از محور مرکزی قسمت میکرولوله مطابق شکل (۵) است. در سرعت‌های ورودی 10 m/s تا 20 m/s رفتار نمودارها با فاصله گرفتن از نقطه  $X = 0$  کاهش و سپس تا اطراف شعاع 5 mm افزایشی است. دلیل آن، گردابه‌های به وجود آمده در میدان جریان حاصل از برخورد جریان با صفحه پایینی است که منجر به ایجاد یک جریان چرخشی مطابق شکل (۸) در میدان جریان می‌شوند. این گردابه‌ها با ایجاد یک ناحیه کم‌سرعت در میدان جریان، مقیاس زمانی جریان را افزایش داده و با ایجاد تعادل میان مقیاس‌های زمانی جریان و واکنش شیمیایی منجر به شدت گرفتن واکنش‌ها می‌شوند. علاوه بر آن، انرژی گرمایی آزاد شده طی فرآیند احتراق را در خود ذخیره می‌کنند و به پایداری و خودانگیزی احتراق کمک می‌کنند. با افزایش سرعت ورودی جریان و به تبع آن افزایش سرعت برخورد جریان به صفحه پایینی، قدرت و گستردگی گردابه‌ها بیشتر می‌شود. به عبارتی، ناحیه وسیع‌تری از میدان جریان در قسمت دایره‌ای تحت تاثیر گردابه‌ها قرار می‌گیرد. در نتیجه، تولید OH جبهه شعله در اطراف شعاع 5 mm مطابق شکل (V) افزایش می‌یابد.

نتایج مراجع [۱۱-۱۲] و [۳۱]، بیشترین راندمان تشعشعی محفظه احتراق در نسبت هم‌ارزی 0.8 و نزدیک به آن حاصل شده است. همچنین، مقدار ضریب رسانش گرمایی و ضریب صدور تشعشعی دیوار محفظه احتراق به ترتیب 1 W/m.K و 0.93 انتخاب شده است. این مقادیر مربوط به ماده کوارتز<sup>۱</sup> هستند که به وفور در پژوهش‌های عددی و تجربی پیشین مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل (۵) کانتورهای تغییرات دما برحسب تغییرات سرعت ورودی نشان داده شده است. با توجه به شکل، با افزایش سرعت ورودی، ناحیه احتراق علاوه بر اینکه به سمت بالادست جریان کشیده می‌شود، از محور مرکزی قسمت میکرولوله فاصله می‌گیرد و به سمت دیوار میکرولوله منتقل می‌شود. دلیل آن کاهش مقیاس زمانی جریان در میکروکانال با توجه به افزایش سرعت جریان است. این مورد سبب ایجاد عدم تعادل میان مقیاس‌های زمانی واکنش شیمیایی و جریان سیال به ویژه در امتداد محور مرکزی قسمت میکرولوله می‌شود. نتیجه آن دور شدن ناحیه احتراق از محور مرکزی میکرولوله به سمت دیوار و کشیدگی شعله به سمت پایین‌دست جریان و قسمت دایره‌ای است. با توجه به شکل، کشیدگی ناحیه احتراق به سمت قسمت دایره‌ای موجب افزایش دمای سیال در این ناحیه شده است. مطابق شکل، در سرعت ورودی 20 m/s ناحیه احتراق کاملاً از محور مرکزی قسمت میکرولوله جدا شده و به طرف ناحیه نزدیک دیوار جایی که سرعت جریان سیال کمتر است، منتقل شده است. همچنین، در سرعت ورودی 5 m/s به دلیل قرار گرفتن ناحیه احتراق در نزدیکی مرز ورودی قسمت میکرولوله، دمای جریان در قسمت دایره‌ای کمتر است. بنابراین، در سرعت‌های ورودی کم، جریان سیال در پایین‌دست به علت افزایش مسیر انتقال گرما با دیوار، دمای کمتری دارد. در شکل (۶) توزیع دما روی دیوار پایینی قسمت دایره‌ای برای انواع سرعت‌های مورد بررسی رسم شده است. مطابق شکل، کمترین دمای دیوار در سرعت ورودی 5 m/s است. علت آن پایین بودن دمای سیال در قسمت دایره‌ای مطابق شکل (۵) است. با افزایش سرعت جریان، دمای دیوار مطابق شکل (۶) متاثر از کشیدگی ناحیه احتراق به سمت پایین‌دست جریان افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین مقدار دمای دیوار مربوط به سرعت ورودی 20 m/s است. در سرعت ورودی 5 m/s نمودار دما بیشترین اختلاف و در سرعت ورودی 20 m/s کمترین اختلاف یا غیریکنواختی را دارد. بنابراین، هرچه سرعت ورودی جریان بیشتر باشد، دمای دیوار محفظه احتراق بیشتر و توزیع دما روی سطح خارجی آن هموارتر است.

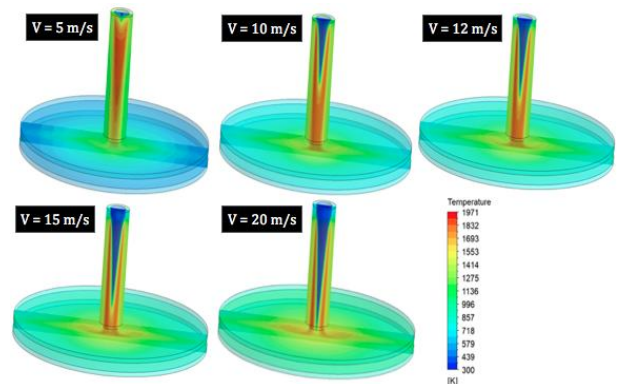


Fig. 5. Temperature contours for different inlet velocities.  
شکل ۵. کانتورهای دما برای سرعت‌های ورودی مختلف در میکرومحفظه احتراق.

<sup>1</sup> Quartz

کوچکتر شدن مجرای عبور سیال است. این مورد سبب می‌شود تا مقیاس زمانی جریان کاهش یابد و جریان زمان کمتری برای انتقال گرما با دیوار در نزدیکی مرز خروجی داشته باشد. در نتیجه، دیوار اطراف مرز خروجی دمای کمتری دارد. دلیل دیگر آن پایین بودن دمای جریان اطراف مرز خروجی مطابق شکل (۱۰) و اثرپذیری دمای دیوار از آن است.

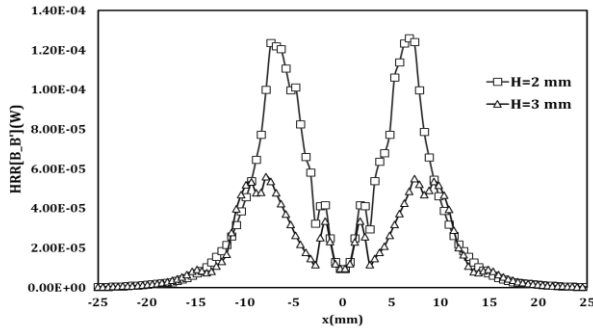


Fig. 9. Variation of Heat release rate on B – B' line for different plate distance for 10 m/s inlet velocity.

شکل ۹. تغییرات نرخ گرمای آزاد شده روی خط B – B' برای فاصله صفحات مختلف در سرعت ورودی 10 m/s.

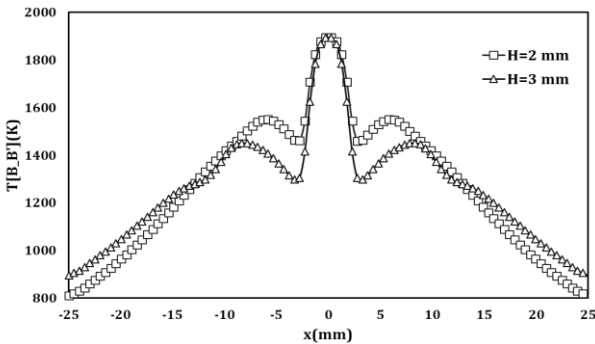


Fig. 10. Variation of temperature on B – B' line for different plate distance for 10 m/s inlet velocity.

شکل ۱۰. تغییرات دمای سیال روی خط B – B' برای فاصله صفحات مختلف در سرعت ورودی 10 m/s.

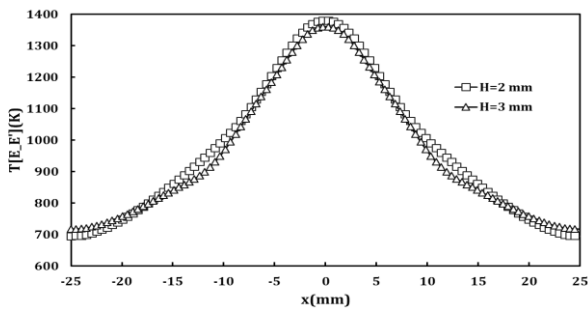


Fig. 11. Variation of temperature on E – E' line for different plate distance for 10 m/s inlet velocity.

شکل ۱۱. تغییرات دما روی خط E – E' برای فاصله صفحات مختلف در سرعت ورودی 10 m/s.

برای بررسی تاثیر ضخامت دیوار بر توزیع دما روی دیوار، سه ضخامت مختلف برای دیوارهای محفظه احتراق شامل 0.4 mm و 0.7 mm و 1 mm، در نظر گرفته شد. در شکل (۱۲) نمودار تغییرات دما روی دیوار قسمت میکرولوله برحسب ضخامت دیوار در سرعت ورودی 10 m/s نشان داده شده است. مطابق شکل، دمای دیوار با کاهش ضخامت افزایش می‌یابد. دلیل آن کاهش مقاومت حرارتی دیوار است که موجب می‌شود دمای دیوار با دریافت گرمای احتراق افزایش دمای بیشتری بویژه در ناحیه احتراق و بعد از آن در قسمت میکرولوله پیدا کند. در حالیکه مقدار

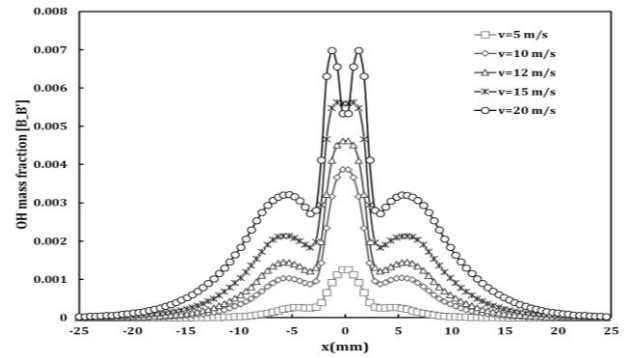


Fig. 7. Variation of OH mass fraction on B – B' line for different inlet velocities.

شکل ۷. تغییرات کسر جرمی OH روی خط B – B' برای سرعت‌های ورودی مختلف.

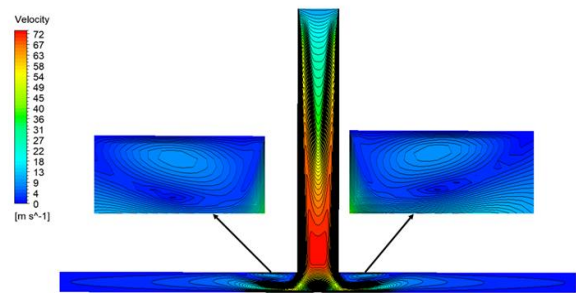


Fig. 8. Vorticities in the flow field for 10 m/s inlet velocity.

شکل ۸. گردابه‌ها در میدان جریان برای سرعت ورودی 10 m/s.

برای مطالعه تاثیر فاصله صفحه‌های دایره‌ای، یک هندسه با ابعاد مشابه ولی فاصله صفحه 3 mm ایجاد و بررسی شد. در شکل (۹) نمودار تغییرات گرمای آزاد شده در قسمت دایره‌ای برحسب فاصله صفحه‌های دایره‌ای در سرعت ورودی 10 m/s رسم شده است. مطابق این شکل، با افزایش فاصله صفحه‌ها در سرعت جریان ورودی ثابت، گرمای آزاد شده در قسمت دایره‌ای کاهش می‌یابد. به نحوی که بیشینه مقدار آن برای فاصله 3 mm حدود 2.3 برابر کمتر از فاصله 2 mm است. دلیل آن کاهش قدرت گردابه‌ها در قسمت دایره‌ای است. با افزایش فاصله صفحه‌های دایره‌ای، مجرای عبور جریان بزرگتر می‌شود. افزایش مجرای عبور جریان باعث فاصله گرفتن مرکز جریان از دیوار می‌شود. در نتیجه از قدرت و اثرپذیری گردابه کاسته می‌شود. نتیجه آن کاسته شدن از شدت واکنش‌ها است. بنابراین، جریان مقدار کمتری از گرمای خود را در قسمت دایره‌ای آزاد می‌کند.

شکل (۱۰) نمودار تغییرات دمای سیال در قسمت دایره‌ای را برحسب فاصله صفحه‌ها نشان می‌دهد. در اطراف موقعیت  $X = 0$  دما برای هر دو فاصله برابر است. دلیل آن سکون جریان در این ناحیه در اثر برخورد آن با صفحه پایینی است. با دور شدن از مرکز، دمای مربوط به فاصله 2 mm افزایش می‌یابد. دلیل آن افزایش قدرت گردابه‌ها در آن ناحیه است. با افزایش قطر گردابه‌ها ناحیه وسیع‌تری از جریان دچار کاهش سرعت می‌شود. کاهش سرعت جریان موجب افزایش مقیاس زمانی جریان در محفظه احتراق می‌شود. نتیجه آن افزایش دمای جریان در قسمت دایره‌ای است. مطابق شکل (۱۰)، دمای جریان برای فاصله 2 mm در مرز خروجی کمتر است. دلیل آن کوچکتر شدن محفظه احتراق و به تبع آن افزایش شار اتلاف گرما به دیوار است. بنابراین، در این مورد دیوار گرمای بیشتری از ناحیه احتراق جذب کرده است.

نمودار توزیع دما روی صفحه دایره‌ای پایین برحسب فاصله صفحه‌ها برای سرعت 10 m/s در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مطابق شکل، در فاصله 2 mm، در بیشتر موقعیت‌ها دیوار دمای بیشتری دارد. دلیل آن افزایش گرمای آزاد شده و دمای جریان به ویژه در ناحیه اطراف گردابه‌ها است که منجر به این می‌شود تا انتقال گرما به دیوار مطلوب‌تر انجام شود و دیوار دمای بیشتری داشته باشد. دمای صفحه دایره‌ای پایین در نزدیکی مرز خروجی با کاهش فاصله دو صفحه کاهش می‌یابد. دلیل آن افزایش بیشتر سرعت جریان با دور شدن از ناحیه اطراف گردابه‌ها به علت

داشته باشد و میانگین دمای دیوار افزایش یابد. با افزایش سرعت جریان از 15 m/s به 20 m/s، اگرچه دمای میانگین دیوار و آهنگ انتقال گرما از دیوار افزایش می‌یابند، ولی با توجه به رابطه‌های (۱۵) تا (۱۸)، دبی جرمی و به دنبال آن آهنگ گرمای آزاد شده افزایش می‌یابند. به نحوی که منجر می‌شوند تا افزایش سرعت جریان ورودی به 20 m/s باعث کاهش بازده کل و بازده تشعشعی شود. بنابراین، در نسبت هم‌ارزی 0.8 برای ماده کوارتز افزایش سرعت بیشتر از 15 m/s توصیه نمی‌شود. در ارتباط با فاصله صفحه‌ها، اگرچه تغییر چندانی در دمای میانگین دیوار حاصل نمی‌شود، ولی آهنگ اتلاف گرمای تابشی و گرمای کل کاهش می‌یابند. همچنین، بازده تشعشعی و بازده کل نیز کاهش می‌یابند. دلیل آن کاهش نسبت سطح جانبی به حجم محفظه احتراق است که سبب می‌شود شار اتلاف گرما کاهش یابد و بازده محفظه احتراق کم شود. بنابراین، هرچه فاصله دو صفحه دایره‌ای کمتر شود، بازده سیستم افزایش می‌یابد. هرچند که با کاهش فاصله صفحه‌ها به مقدار کمتر از فاصله خاموشی و نزدیک به آن، انتظار می‌رود که پدیده‌های ناپایداری ظاهر شوند. مطابق جدول، با کاهش ضخامت دیوار، دمای میانگین دیوار تقریباً ثابت است ولی آهنگ انتقال گرمای تابشی کاهش می‌یابد. بنابراین، کاهش ضخامت محفظه احتراق، بازده سیستم را کاهش می‌دهد. البته که ممکن است برای کاهش ضخامت دیوار محفظه احتراق محدودیت متالورژیکی وجود داشته باشد.

جدول ۱. مقایسه پارامترهای محاسبه شده از حل عددی برای بررسی پتانسیل استفاده از میکرومحفظه احتراق شعاعی در سیستم‌های میکروترموفتولتائیک.

Tabal 1. Comparison of calculated parameters in order to investigation of the potential of radial micro combustor for using in thermophotovoltaic devices.

	$\dot{Q}_{Rad}(W)$	$\eta_{Rad}(\%)$	$\eta_{tot}(\%)$	$T_{w,max}(K)$	$T_{w,ave}(K)$
$\varphi=0.8, k_s=1 (W/m.K), h_{conv}=20 (W/m^2.K), H=2 \text{ mm},$					
$b=1 \text{ mm}, \epsilon=0.93$					
V (m/s)					
5	21.48	13.9	2.09	1243	712
10	52.06	16.9	2.53	1380	888
12	63.72	17.2	2.58	1406	934
15	80.91	17.5	2.63	1425	989
20	107.45	17.46	2.61	1422	1058
$\varphi=0.8, k_s=1 (W/m.K), h_{conv}=20 (W/m^2.K), V=10 \text{ m/s},$					
$b=1 \text{ mm}, \epsilon=0.93$					
H (mm)					
2	52.06	16.9	2.53	1380	888
3	48.15	15.65	2.34	1361	884
$\varphi=0.8, k_s=1 (W/m.K), h_{conv}=20 (W/m^2.K), V=10 \text{ m/s},$					
$H=2 \text{ mm}, \epsilon=0.93$					
b (mm)					
0.4	27.32	8.88	1.33	1452	883
0.7	41.27	13.41	2.01	1415	885
1	52.06	16.92	2.53	1380	888

با توجه به داده‌های جدول (۱)، بیشترین بازده قابل دست‌یابی از محفظه احتراق مورد بررسی، 2.63 درصد است. این بازده در سرعت ورودی 15 m/s، نسبت هم‌ارزی 0.8، ضخامت دیوار 1 mm و فاصله صفحه 2 mm به دست می‌یابد. همچنین، نتایج به دست آمده نشان دادند که وجود قسمت دایره‌ای در انتهای قسمت میکرولوله تأثیر زیادی در ایجاد احتراق پایدار در چنین محفظه‌هایی دارد. به نحوی که باعث کاهش سرعت و ایجاد ناحیه‌های سکون و گردابی در جریان می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده، وجود این ناحیه‌ها به ویژه در سرعت‌های ورودی زیاد موجب شدت گرفتن واکنش‌ها و در نتیجه تقویت جبهه شعله در پایین دست جریان می‌شوند.

جدول (۲) برای مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده توسط سایر پژوهشگران تدوین شده است. ردیف‌های ۱ تا ۵ شامل پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با میکرومحفظه‌های احتراق در سیستم‌های ترموالکتریک است. ردیف‌های ۵ تا ۹ مربوط به سیستم‌های میکروترموفتولتائیک است و ردیف آخر مربوط به پژوهش حاضر است. در این جدول، بیشترین بازده‌ای که برای این سیستم‌های نامبرده به روش‌های تجربی یا عددی محاسبه شده، ارائه شده است. با توجه به این جدول، میکرومحفظه‌های شعاعی توانایی رقابت با سایر میکرومحفظه‌های احتراق را هم در

گرمای آزاد شده در ناحیه احتراق با توجه به ثابت بودن سرعت و نسبت هم‌ارزی، ثابت است. به عبارتی، میزان حساسیت یا اثرپذیری دمای دیوار میکرولوله از دمای جریان با کاهش ضخامت دیوار بیشتر می‌شود. همچنین، با کاهش ضخامت دیوار توزیع دما روی سطح خارجی قسمت میکرولوله غیریکنواخت‌تر می‌شود.

در شکل (۱۳) نمودار تغییرات دمای صفحه دایره‌ای پایینی برحسب ضخامت دیوار رسم شده است. مطابق این شکل، مقدار دما در مرکز صفحه دایره‌ای با کاهش ضخامت دیوار افزایش می‌یابد. با دور شدن از مرکز صفحه دایره‌ای به سمت مرز خروجی، تغییرات دما با ضخامت دیوار ناچیز می‌شود. اما مشابه قسمت میکرولوله با کاهش ضخامت دیوار، توزیع دما روی دیوار غیر یکنواخت‌تر می‌شود. با مقایسه شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مشخص می‌شود که میزان تأثیرپذیری توزیع دما روی دیوار با تغییر ضخامت در قسمت میکرولوله بیشتر از قسمت دایره‌ای است.

برای بررسی پتانسیل هندسه مورد نظر برای استفاده به عنوان منبع گرما در سیستم میکروترموفتولتائیک، نیاز است که پارامترهایی نظیر دمای میانگین سطح، آهنگ اتلاف گرما از سطح، بازده تشعشعی و بازده کل سیستم که قبلاً در رابطه‌های (۱۴) تا (۱۷) تعریف شدند، محاسبه شوند. برای مقایسه بهتر و سازمان‌یافته‌تر این پارامترها، جدول (۱) ارائه شده است. در این جدول پارامترهای مورد بررسی شامل سرعت جریان ورودی، فاصله صفحه‌های دایره‌ای و ضخامت دیوار به همراه مقادیر آن‌ها در اولین ستون سمت چپ ارائه شده‌اند. در سطر اول جدول، پارامترهای محاسبه شده از حل عددی شامل آهنگ تابش گرما از دیوار، بازده تشعشعی، بازده کل سیستم، بیشینه دمای دیوار و دمای میانگین دیوار قرار گرفته‌اند. بیشترین و کم‌ترین مقدار هر یک از پارامترهای محاسبه شده از حل عددی در هر ستون جدول به صورت درشت مشخص شده است.

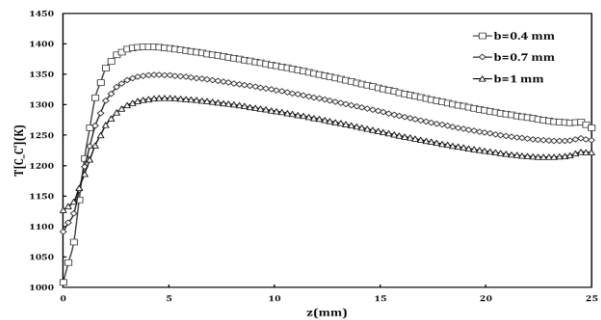


Fig. 12. Temperature variation on C – C' line for different wall thickness for 10 m/s inlet velocity.

شکل ۱۲. تغییرات دما روی خط C – C' برای ضخامت‌های دیوار مختلف در سرعت ورودی 10 m/s.

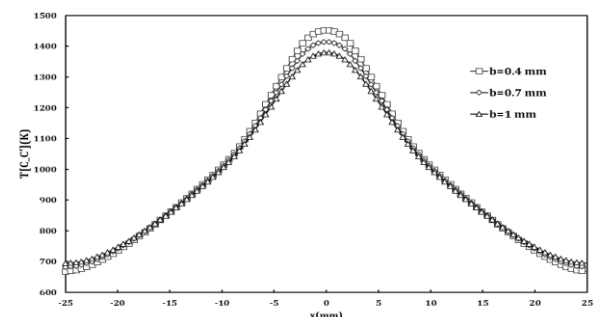


Fig. 13. Temperature variation on C – C' line for different wall thickness for 10 m/s inlet velocity.

شکل ۱۳. توزیع دما روی خط C – C' برای ضخامت‌های دیوار مختلف در سرعت ورودی 10 m/s.

مطابق جدول، با افزایش سرعت جریان ورودی، آهنگ تابش گرما و به تبع آن آهنگ انتقال گرما می‌کند و محیط اطراف افزایش می‌یابد. دلیل آن نزدیک شدن ناحیه احتراق به دیوار محفظه احتراق است. این مورد سبب می‌شود تا دیوار گرمای بیشتری از ناحیه احتراق جذب کند و دمای آن با افزایش سرعت ورودی افزایش یابد. به علاوه، کشیدگی ناحیه احتراق سبب می‌شود تا ناحیه وسیع‌تری از دیوار دمای بالا



## ۸ - مراجع

- [1] P. D. Ronney, "Analysis of non-adiabatic heat recirculating combustors", *Combustion and Flame*, 135, 2003, pp. 421-439.
- [2] D. G. Norton and D. G. Vlachos, "Combustion characteristics and flame stability at the microscale: a CFD study of premixed methane/air mixtures", *Chemical Engineering Science*, 58, 2003, pp. 4871-4882.
- [3] D. G. Norton and D. G. Vlachos, "A CFD study of propane/air microflame stability", *Combustion and Flame*, 138, 2004, pp. 97-107.
- [4] T. Leach, C. Cadou and G. Jackson, "Effect of structural conduction and heat loss on combustion in micro-channels", *Combustion theory and modeling*, 10, 2006, pp. 85-103.
- [5] N. Kim, S. Kato, T. Kataoka, T. Yokomori, S. Maruyama, T. Fujimori and K. Maruta, "Flame stabilization and emission of small swiss-roll combustors", *Combustion and Flame*, 141, 2005, pp. 229-240.
- [6] B. Zhong and J. Wang, "Experimental study on premixed CH<sub>4</sub>/air mixture combustion in micro swiss-roll combustors", *Combustion and Flame*, 157, 2010, pp. 2222-2229.
- [7] J. Zarvandi, S. Tabejammal and M. R. Baig Mohammadi, "Numerical simulation of the effective parameters on the stability of stoichiometric CH<sub>4</sub>/air premixed combustion in a micro - combustion chamber", *Fuel and Combustion*, 3, No. 2, 2010, pp. 31- 45, [ in Persian فارسی ].
- [8] A. Alipoor, K. Mazaheri and A. Shamoopour, "Dynamics of lean hydrogen/air flame regimes in micro scale combustion", *Modares Mechanical Engineering*, 14, No. 3, 2014, pp. 94 - 102, [ in Persian فارسی ].
- [9] A. Alipoor and K. Mazaheri, "Maps of flame dynamics for premixed lean hydrogen-air combustion in a heated microchannel", *Energy*, 194, 2020, 116852.
- [10] W. M. Yang, S. K. Chou, C. Shu, Z. W. Li, and H. Xue, "Combustion in micro-cylindrical combustors with and without a backward facing step", *Appl. Thermal Engineering*, 22, 2002, pp. 1777-1787.
- [11] H. Faramarzpour, K. Mazaheri and A. Alipoor, "Effect of backward facing step on radiation efficiency in a micro combustor", *Int. J. Therm. Sci.*, 132, 2018, pp. 129-136.
- [12] O. Cam, H. Yilmaz, S. Tangoz and I. Yilmaz, "A numerical study on combustion and emission characteristics of premixed hydrogen air flames", *Int. J. Hydrogen Energy*, 42, 2017, pp. 25801-25811.
- [13] S. Akhtar, J.C. Kurnia, T. Shamim, "A three-dimensional computational model of H<sub>2</sub>-air premixed combustion in non-circular micro-channels for a thermo-photovoltaic (TPV) application", *Appl. Energy*, 152, 2015, pp. 47-57.
- [14] S. Akhtar, M.N. Khan, J.C. Kurnia and T. Shamim, "Investigation of energy conversion and flame stability in a curved micro-combustor for thermo-photovoltaic (TPV) applications", *Appl. Energy*, 192, 2017, pp. 134-145.
- [15] A. Alipoor and M.H. Saidi, "Improvement of combustion characteristics for hydrogen-air mixture using modular structure in a novel micro combustor", *Fuel and Combustion*, 12, 2020, pp. 1-13.
- [16] Q. Peng, J. E. W. M. Yang, H. Xu, J. Chen, F. Zhang, T. Meng and R. Qiu, "Experimental and numerical investigation of a micro thermophotovoltaic system with different backward-facing step and wall thickness", *Energy*, 173, 2019, pp. 540-547.

سیستم‌های میکروترموالکترونیک و هم در سیستم‌های میکروترموفتوولتاییک دارا هستند. البته، نیاز است که بازده سیستم‌های میکروترموفتوولتاییک همچنان افزایش یابد. بنابراین، انتظار می‌رود پژوهش‌ها همچنان در این زمینه ادامه یابند.

جدول ۲. مقایسه بیشترین بازده کل بدست آمده از میکرومحفظه شعاعی با بیشترین بازده کل بدست آمده از سایر محفظه‌ها.

Tabal 2. Comparison of maximum total efficiency for radial micro combustor with maximum efficiency available in references.

References	Maximum total efficiency (%)
Li et al. [32]	2.69
Abedi et al. [33]	2.5
Fanciulli et al. [34]	1.4
Aravind et al. [35]	2.5
Peng et al. [22]	2
Bani et al. [21]	4.37
Tang et al. [36]	7.92
Peng et al. [16]	1.14
Alipoor and Saidi [28]	6.3
Present work	2.63

## ۷ - نتیجه گیری

در این پژوهش مطالعه عددی مشخصه‌های احتراق مخلوط رقیق و پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در میکرو محفظه‌های شعاعی به منظور بررسی قابلیت یا پتانسیل استفاده از آن‌ها در سیستم میکروترموفتوولتاییک انجام شده است. پارامترهای مورد بررسی شامل سرعت جریان ورودی، فاصله صفحه‌های دایره‌ای و ضخامت دیوار هستند. نتایج بدست آمده به صورت خلاصه به شرح زیر هستند.

۱- با افزایش سرعت جریان ورودی، ناحیه احتراق از محور مرکزی قسمت میکرولوله فاصله گرفته و به سمت دیوار منتقل می‌شود. علاوه بر آن، ناحیه احتراق به درون قسمت دایره‌ای کشیده می‌شود. حرکت ناحیه احتراق به سمت دیوار و کشیدگی آن منجر به افزایش دمای دیوار محفظه احتراق و در نتیجه افزایش بازده تشعشعی و بازده کل سیستم میکروترموفتوولتاییک می‌شود.

۲- ناحیه چرخشی ایجاد شده در جریان سیال درون قسمت دایره‌ای در اثر برخورد جریان با صفحه پایینی موجب شدت گرفتن واکنش‌های شیمیایی و تقویت جبهه احتراق می‌شود. با افزایش سرعت ورودی، ناحیه چرخشی قوی‌تر و توزیع دما روی سطح بیرونی دیوار پایین یکنواخت‌تر می‌شود.

۳- افزایش سرعت ورودی جریان بیش از مقدار 15 m/s توجه‌پذیر نیست و منجر به کاهش بازده کل سیستم می‌شود. زیرا با افزایش سرعت جریان ورودی به 20 m/s، دبی جرمی هیدروژن افزایش یافته و به دنبال آن نرخ گرمای آزاد شده افزایش شدیدتری نسبت به نرخ گرمای تشعشعی می‌یابد.

۴- در ارتباط با فاصله صفحه‌ها، مشخص شد که کاهش فاصله صفحه‌ها موجب افزایش گرمای آزاد شده در قسمت دایره‌ای به علت افزایش قدرت گردابه‌ها و نهایتاً افزایش دمای دیوار محفظه احتراق و بازده کل می‌شود. در نتیجه، کاهش فاصله صفحه‌ها تأثیر مثبت در افزایش بازده کل سیستم دارد.

۵- در ارتباط با ضخامت دیوار، مشخص شد که تأثیر دمای دیوار قسمت میکرولوله از تغییر ضخامت بیشتر از قسمت دایره‌ای است. بعلاوه، کاهش ضخامت دیوار محفظه احتراق موجب کاهش مقاومت گرمایی دیوار شده و باعث می‌شود دمای دیوار سطح خارجی دیوار افزایش یابد. هرچند که در نهایت منجر به کاهش بازده کل سیستم می‌شود.

۶- در نهایت، بیشترین بازده قابل دست‌یابی برای سیستم میکروترموفتوولتاییک مقدار 2.63 درصد در سرعت جریان ورودی 15 m/s، ضخامت دیوار 1 mm، نسبت هم‌ارزی 0.8 و فاصله صفحه 2 mm تعیین شد. از مقایسه بیشترین بازده بدست آمده در این پژوهش با بازده مربوط به سایر محفظه‌ها، مشخص شد که میکرومحفظه‌های شعاعی توانایی رغابت با سایر میکرومحفظه‌های احتراق به منظور استفاده در سیستم‌های میکروترموفتوولتاییک را دارا هستند.

- Experimental Thermal and Fluid Science, 33, 2009, pp. 764–773.
- [32] G. Li, D. Zhu, Y. Zheng, W. M. Guo, “Mesoscale combustor-powered thermoelectric generator with enhanced heat collection”, Energy Conversion and Management, 205, 2020, 112403.
- [33] H. Abedi, F. Migliorini, R. Donde, S. De luliis, F. Passaretti, C. Fanciulli, “Small size thermoelectric power supply for battery backup”, Energy, 188, 2019, 116061.
- [34] C. Fanciulli, H. Abedi, L. Merotto, R. Donde, S. De luliis, F. Passaretti, “Portable thermoelectric power generation based on catalytic combustor for low power electric equipment”, Appl. Energy, 215, 2018, pp. 300-308.
- [35] B. Aravind, D. K. Saini, S. Kumar, “Experimental Investigations on the role of various heat sinks in developing an efficient combustion based micro power generator”, Appl. Thermal Engineering, 148, 2019, pp. 22-32.
- [36] A. Tang, T. Cai, Q. Huang, J. Deng, J. Pan, “Numerical study on energy conversion performance of micro-thermophotovoltaic system adopting a heat recirculation micro-combustor”, Fuel processing Technology, 180, 2018, pp. 23-31.
- [17] W. Zuo, J. E. R. Lin, Y. Jin and D. Han, “Numerical investigations on different configurations of a four channel meso-scale planar combustor fueled by hydrogen/air mixture”, Energy Conversion and Management, 180, 2018, pp. 1-13.
- [18] M. H. Saberimoghadam, K. Mazaheri and A. Alipoor, “Numerical study of bluff body effect in lean premix hydrogen/air combustion in a micro-scale combustor”, Modares Mechanical Engineering, 14, No. 13, 2015, pp. 86 – 94, [ in Persian فارسی ].
- [19] M. Ansari and E. Amani, “Micro-combustor performance enhancement using a novel combined baffle-bluff configuration”, Chemical Engineering Science, 175, 2018, pp. 243-256.
- [20] P. Qian, M. Liu, X. Li, F. Xie, Z. Huang, C. Luo and X. Zhu, “Effects of bluff-body on the thermal performance of micro thermophotovoltaic system based on porous media combustion”, Appl. Thermal Engineering, 174, 2020, pp. 115281.
- [21] S. Bani, J. Pan, A. Tang, Q. Lu, Y. Zhang, “Micro combustion in a porous media for thermophotovoltaic power generation”, Appl. Thermal Engineering, 129, 2018, pp. 596-605.
- [22] Q. Peng, W. Yang, J. E. Z. Li, H. Xu, G. Fu, S. Li, “Investigation on  $H_2$ /air combustion with  $C_2H_8$  addition in the combustor with part/full porous medium”, Energy Conversion and Management, 228, 2021, 113652.
- [23] S. Kumar, K. Maruta and S. Minaev, “On the formation of multiple rotating Pelton-like flame structures in radial microchannels with lean methane-Air mixtures”, Proc. Combust. Inst, 31, 2007, pp. 3261–3268.
- [24] A. Fan, S. Minaev, E. Sereshchenko, R. Fursenko, S. Kumar, W. Liu and K. Maruta, “Experimental and numerical investigations of flame pattern formations in a radial microchannel”, Proc. Combust. Inst, 32, 2009, pp. 3059–3066.
- [25] A. Fan, K. Maruta, H. Nakamura and W. Liu, “Experimental investigation of flame pattern transitions in a heated radial micro-channel”, Appl. Thermal Engineering, 47, 2012, pp. 111–118.
- [26] S. R. Turns, “An Introduction to Combustion”, Third Edition, New York, McGraw Hill, 2012.
- [27] H. Yilmaz, O. Cam, S. Tangoz and I. Yilmaz, “Effect of different turbulence models on combustion characteristics of hydrogen/air flames”, Int. J. Hydrogen Energy, 42, 2017, pp. 25744–25755.
- [28] A. Alipoor and M.H. Saidi, “Numerical study of hydrogen-air combustion characteristics in a novel micro-thermophotovoltaic power generator”, Appl. Energy, 199, 2017, pp. 382-399.
- [29] A. Fan, S. Minaev, S. Kumar, W. Liu and K. Maruta, “Regime diagrams and characteristics of flame patterns in radial microchannels with temperature gradients”, Combustion and Flame, 153, 2008, pp. 479–489.
- [30] T.J. Kim, R.A. Yetter and F.L. Dryer, “New results on moist CO oxidation: high pressure, high temperature experiments and comprehensive kinetic modeling”, International Symposium on Combustion, 25, 1994, pp. 759–766.
- [31] J. Li, S.K. Chou, G. Huang, W.M. Yang and Z.W. Li, “Study on premixed combustion in cylindrical micro combustors: Transient flame behavior and wall heat flux”,