

بررسی عملکرد گرمایی یک میکرومحفظه احتراق حلزونی جهت کاربردهای میکروترموفتوولتاییک

علیرضا علی پور^{۱*}، پویان عباسپور^۲

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، a.alipoor@shirazu.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، p-abbaspour@stu.scu.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱)

چکیده: در مطالعه حاضر، احتراق مخلوط پیش‌آمیخته هیدروژن- هوا در یک میکرومحفظه حلزونی دو مسیره با هدف استفاده به‌عنوان منبع گرما در سیستم‌های میکروترموفتوولتاییک بررسی شده است. معادلات حاکم با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی به‌صورت سه‌بعدی و پایا با در نظر گرفتن سینتیک شیمیایی جزئی و انتقال گرما در دیوار حل شد. پارامترهای بررسی شده در این پژوهش شامل سرعت ورودی جریان، نسبت هم‌ارزی و رسانش گرمایی دیوار هستند. عملکرد گرمایی محفظه احتراق با محاسبه دمای جریان‌های مسیره‌های رفت و برگشت، پارامترهای مرتبط با توزیع دمای دیوار و بازده ارزیابی شده است. نتایج نشان دادند که با افزایش سرعت ورودی، تبادل گرما میان مسیره‌های رفت و برگشت از حالت بهینه خود فاصله می‌گیرد و روی توزیع دمای دیوار تأثیر می‌گذارد. اگرچه میانگین دمای سطح خارجی دیوار با سرعت ورودی افزایش می‌یابد ولی توزیع دما غیریکنواخت‌تر می‌شود. این افزایش در شاخص یکنواختی دمای دیوار موجب کاهش بازده با افزایش سرعت ورودی می‌شود. در مورد تأثیر نسبت هم‌ارزی مشخص شد که با افزایش آن، تبادل گرما بین جریان مسیره‌های رفت و برگشت بهینه‌تر و بازده سیستم افزایش می‌یابد. تأثیر افزایش ضریب رسانش گرمایی دیوار تا مقدار ۱۲ وات بر مترکلون بر بررسی و نتیجه شد که تأثیر مطلوبی روی همه پارامترهای مرتبط با عملکرد گرمایی محفظه احتراق و بازده دارد. بیشترین بازده سیستم مقدار ۱۰/۱۸ درصد محاسبه شد که با مقایسه آن با بازده سایر هندسه‌های محفظه احتراق مشخص شد که میکرومحفظه‌های حلزونی از نظر بازده توانایی رقابت با سایر میکرومحفظه‌های احتراق را به‌منظور استفاده در سیستم‌های میکروترموفتوولتاییک دارا هستند.

کلیدواژگان: احتراق، هیدروژن، میکرومحفظه حلزونی، میکروترموفتوولتاییک، بازده

مقدمه

با افزایش تقاضا برای ساخت و طراحی تجهیزات میکروالکترومکانیکی، اهمیت موضوع احتراق در مقیاس‌های کوچک به‌وضوح ظاهر شده است. این تجهیزات میکروالکترومکانیکی به یک منبع قدرت دارای ولتاژ بالا، سبک، کوچک و دارای قابلیت شارژ سریع نیاز دارند. در حال حاضر، باتری‌های یون لیتیوم به‌طور عمده به‌عنوان منبع اصلی انرژی برای این تجهیزات استفاده می‌شوند. این باتری‌ها دارای چگالی انرژی کم و فاقد قابلیت شارژ سریع هستند. درحالی‌که چگالی انرژی سوخت‌های هیدروکربنی حدود ۲۰ تا ۵۰ برابر و سوخت هیدروژن حدود ۱۰۰ برابر بیشتر از باتری‌های شیمیایی امروزی است. بنابراین، استفاده از انرژی شیمیایی سوخت‌های هیدروکربنی و هیدروژن به‌جای باتری‌ها در این تجهیزات کوچک، می‌تواند بازدهی سیستم‌های تولید توان در مقیاس کوچک را افزایش دهد. در این فرآیند، انرژی شیمیایی در سوخت‌های هیدروکربنی طی

فرآیند احتراق درون یک محفظه احتراق کوچک به شکل گرما آزاد می‌شود و به محیط اطراف منتقل می‌شود. با قرار دادن مجموعه‌ای از سلول‌های ترموفتولتاییک اطراف دیواره خارجی محفظه احتراق، امکان تبدیل این گرما به الکتریسیته فراهم می‌شود. به‌علاوه، محفظه‌های احتراق میکرو نسبت به باتری‌ها راحت‌تر با تغییر اندازه تطبیق می‌یابند که این امر امکان کاهش اندازه این سیستم‌های تولید توان را به یک‌دهم از اندازه باتری‌های شیمیایی سنتی می‌دهد [۱]. به‌عنوان مثال، یک نمونه آزمایشی از محفظه احتراق میکرو با حجم ۰/۱۱۳ مترمکعب، توسط یانگ و همکاران [۲] توسعه داده شد. هنگامی که میکرومحفظه در یک سیستم میکروترموفتولتاییک به‌عنوان منبع گرما مورد استفاده قرار گرفت، توان خروجی به مقدار ۰/۹۲ وات را ارائه داد.

با این حال، کوچک شدن ابعاد محفظه احتراق تا مرتبه فاصله (قطر) خاموشی شعله، منجر به بروز پدیده‌های ناپایداری [۳،۴]، روشنایی - خاموشی [۵،۶] و بیرون زدن یا کندن شعله [۷] از محفظه احتراق می‌شود. بنابراین، بررسی هندسه‌های مختلف برای محفظه‌های احتراق با ابعاد کوچک، به‌منظور استفاده در سیستم‌های میکروترموفتولتاییک در کنار بررسی انواع پدیده‌های خاموشی و ناپایداری شعله، موضوع تحقیقات پیشین در این زمینه بوده است. از آنجایی‌که ضخامت دیواره محفظه‌های احتراق میکرو هم‌مرتبه با سایر پارامترهای هندسی نظیر قطر هیدرولیکی محفظه احتراق است، نمی‌توان از نقش دیوار در رژیم‌های انتشار شعله در محفظه‌های احتراق میکرو چشم‌پوشی کرد. دیوار علاوه بر اتلاف گرما، با جذب گرمای آزاد شده احتراق و انتقال آن به بالادست جریان از طریق رسانش گرما می‌تواند مخلوط سوخت و هوای ورودی را پیش‌گرم کرده و در نتیجه خوداتکایی و پایداری احتراق را افزایش دهد. از سوی دیگر، چنانچه اتلاف گرمای دیوار زیاد شود، منجر به بروز حالت‌های ناپایدار انتشار شعله و یا خاموشی می‌شود. نورتن و لاکوس [۸]، طی مطالعه‌ای ارتباط سرعت جریان ورودی و ضریب رسانش گرما در دیوار با مکانیزم‌های خاموشی حرارتی و کندن شدن شعله را بررسی کردند. زروندی و همکاران [۹] نشان دادند که افزایش ضریب رسانش گرمایی دیوار و ضخامت دیواره باعث تسهیل در بازچرخش گرما از طریق دیوار و یکنواخت‌تر شدن توزیع دما روی سطح خارجی محفظه احتراق می‌شود که نتیجه آن بهبود شرایط احتراق در محفظه احتراق بود. همچنین، مشخص شد که علاوه بر ضریب رسانش گرمایی دیوار، عرض کانال و ضریب انتقال گرمایی جابه‌جایی از سطح خارجی دیوار به محیط اطراف در پایداری شعله مؤثرند. به‌گونه‌ای که افزایش عرض محفظه احتراق و ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی خارجی باعث کاهش و تضعیف پایداری احتراق می‌شود.

یانگ و همکاران [۱۰] به بررسی میکرولوله‌های پله‌ای با هدف طولانی‌تر کردن زمان ماندگاری جریان واکنشی در میکرولوله‌ها پرداختند. گرده‌های تولید شده در ناحیه ایجاد پله به‌طور قابل توجهی بر محل شعله تأثیر گذاشتند و محفظه احتراق را قادر ساختند تا دبی‌های جریان جرمی بالاتری را بپذیرد. فرامرزپور و همکاران [۱۱] طی مطالعه‌ای به بررسی تأثیر وجود پله بر حد بیرون‌زدگی شعله و دمای دیواره بیرونی محفظه احتراق میکرو پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که قطر محفظه بعد از پله نقش قابل توجهی بر دمای متوسط دیواره بیرونی ایفا می‌کند. به‌گونه‌ای که ارتفاع کمتر پله در قطر یکسان، دمای بالاتری برای دیواره بیرونی ایجاد می‌کند. عباسپور و همکاران [۱۲] نشان دادند که افزایش زاویه همگرایی-واگرایی در یک میکرولوله باعث افزایش حد شعله‌وری نسبت به میکرولوله‌های ساده می‌شود. همچنین، با افزایش زاویه همگرایی-واگرایی حد شعله‌وری بالا در میکرولوله‌های همگرا-واگرا افزایش می‌یابد.

فن و همکاران [۱۳] تأثیر ایجاد یک جسم مانع را بررسی کردند. ناحیه چرخش در پشت جسم مانع، عملکرد مطلوبی را در افزایش زمان جریان و ذخیره گرمای آزاد شده حاصل از احتراق نشان داد. نتایج نشان دادند که افزایش رسانایی حرارتی ماده باعث بهبود انتقال حرارت به دیواره‌های بالادست شده و منجر به پیش‌گرمایش کارآمدتر مخلوط ورودی می‌شود. انصاری و امانی [۱۴] تأثیر ایجاد جسم مانع و بافل را بر بررسی کردند. نتایج ایشان نشان دادند که شعله تحت شرایط خاص در غیاب جسم مانع پایدار نیست. پنگ و همکاران [۱۵] تأثیر ضخامت دیوار محفظه احتراق و طول پله را بر پایداری شعله و عملکرد گرمایی محفظه احتراق میکرو به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. سیستم میکروترموفتولتاییک طراحی شده توسط ایشان

موفق به ثبت توان خروجی $1/02$ وات و بازده $1/14$ درصد شد. زو و همکاران [۱۶] 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. عباسپور و علی پور [۱۷] تأثیر دیوارهای موجدار را بر مشخصه‌های احتراقی هیدروژن بررسی کردند. پژوهش ایشان با هدف استفاده از دیوارهای موجدار در محفظه‌های احتراق سیستم‌های میکروتروموفتولتاییک انجام و مشخص شد که دیوارهای موجدار حد شعله‌وری بالا را افزایش می‌دهند و تأثیر مطلوبی در جلوگیری از کندن شعله و خاموشی در سرعت‌های بالا دارند. 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. مخلوط سوخت و هوا از طریق یک ورودی که به صفحه دایره‌ای بالا متصل شده، وارد فضای میان صفحه‌های دایره‌ای می‌شود. علی پور و همکاران [۱۸] نشان دادند که ناحیه چرخشی ایجاد شده در جریان در مجاورت صفحه دایره‌ای بالایی موجب افزایش شدت واکنش و در نهایت افزایش دما در آن ناحیه می‌شود. این افزایش دما می‌تواند به خوداتکایی احتراق کمک کند. این میکرو محفظه موفق به ثبت حداکثر راندمان $2/64$ درصد برای حالتی شد که به‌عنوان منبع گرما در یک سیستم میکروتروموفتولتاییک مورد استفاده قرار می‌گرفت. در مطالعه‌ای دیگر، کیان و همکاران [۱۹] تحقیقات عددی بر روی عملکرد یک سیستم میکروتروموفتولتاییک با دیواره متخلخل و جسم مانع انجام دادند. سیستم ایشان موفق به دستیابی به حداکثر بازده کل $9/41$ درصد شد.

با توجه به مطالعه‌های انجام شده در حوزه پایدار نمودن احتراق در مقیاس‌های کوچک، روش‌های متفاوتی به‌منظور پایدارسازی شعله پیشنهاد شده است. یکی از این روش‌ها استفاده از آنتالپی مازاد گازهای حاصل از احتراق است اهمیت این روش در محفظه‌های احتراق میکرو به‌خوبی ثابت شده است. این ویژگی منجر به طراحی محفظه‌های احتراق حلزونی شده است. این محفظه‌ها به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که امکان استفاده بیشتری از آنتالپی مازاد گازهای احتراقی به‌منظور پیش‌گرمایش مخلوط واکنشی ورودی فراهم شود. ویژگی بازیافت گرما در محفظه‌های احتراق حلزونی منجر به این می‌شود که این محفظه‌ها گزینه مناسبی به‌منظور ایجاد شعله پایدار در مقیاس‌های کوچک باشند. محفظه احتراق حلزونی برای اولین بار توسط واینبرگ و همکاران در سال ۱۹۷۰ پیشنهاد شد، سپس رونی و همکاران [۲۰، ۲۱] محفظه احتراق حلزونی را برای مقیاس میکرو و مزو توسعه دادند. کائو و رونی [۲۲] به مطالعه بازچرخش گرما از طریق دیوار به‌منظور فراهم آوردن گرمای لازم برای ایجاد احتراق پایدار در مخلوط پیش‌آمیخته پروپان-هوا در یک میکروکانال حلزونی دوبعدی پرداختند. مشاهده شد که انتقال گرمای رسانشی در دیوار در جهت مسیر جریان سبب اتلاف گرمای آزاد شده در ناحیه مرکزی محفظه احتراق به محیط اطراف شده و باعث کاهش دمای واکنش و خاموشی شعله می‌شود. از طرفی، هدایت گرما در جهت عرض دیوار موجب بازچرخش گرما و پیش‌گرمایش مخلوط سوخت و هوا می‌شود. ایشان نتیجه گرفتند که رسانش گرما در طول دیوار تأثیر زیادی بر حدود خاموشی شعله دارد. همچنین مشاهده شد که محفظه‌های احتراق حلزونی در عددهای رینولدز پایین به‌علت غالب شدن اثر رسانش گرمای طولی در دیواره، کارایی خود را از دست می‌دهند. کیم و همکاران [۲۳] مشخصه‌های احتراقی یک میکروکانال حلزونی با پارامترهای هندسی مختلف را بررسی کردند. ایشان سه نمونه میکرومحفظه احتراق حلزونی یک‌شکل ولی با ابعاد هندسی متفاوت طراحی و از آن‌ها برای بررسی احتراق پیش‌آمیخته پروپان-هوا استفاده کردند. شعله‌های تشکیل شده در این آزمایش در گستره وسیعی از نسبت‌های هم‌ارزی و سرعت ورودی جریان پایدار شدند. همچنین، در سرعت‌های زیاد برای جریان ورودی، کندن شعله مشاهده نشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مزیت دیگر این هندسه‌ها در حد بالای شعله‌وری آن‌هاست. در این آزمایش مشخص شد که هرچه محفظه کوچک‌تر شود، راندمان آن افزایش می‌یابد. ژنگ و وانگ [۲۴] نیز به مطالعه تجربی احتراق در میکرومحفظه حلزونی پرداختند. تفاوت کار ایشان با مرجع [۲۳] در استفاده از سوخت متان بود. در مطالعه‌ای جدیدتر، وانگ و همکاران [۲۵] یک محفظه احتراق حلزونی را برای سوخت متان طراحی و در مطالعه-ای آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، احتراق در نسبت هم‌ارزی‌های پایین (کمتر از $0/3$) و دبی سوخت

بسیار پایین (کمتر از ۰/۰۲۹ لیتر بر دقیقه) بررسی شده است. ما و همکاران [۲۶] مطالعه‌ای عددی با هندسه جدیدی از میکرومحفظه‌های حلزونی انجام دادند. در این مطالعه تأثیر جنس دیواره روی حدود خاموشی شعله بررسی شده است. به‌رغم جایگاه اثبات شده میکرومحفظه‌های حلزونی در ایجاد شعله‌های پایدار و خوداتکا به‌ویژه در نسبت‌های هم‌ارزی پایین در پژوهش‌های پیشین، مطالعات انجام شده روی آن‌ها بیشتر روی سوخت‌های متان و پروپان متمرکز بوده است. با این حال، جایگاه مطالعه احتراق سوخت‌های فاقد کربن نظیر هیدروژن در متن مطالعات پیشین در این زمینه تهی مانده است. این درحالی است که سوخت هیدروژن دارای ارزش حرارتی بالا، سرعت سوزش بالا و تولید آلاینده‌ی کمتر است. همچنین، به‌رغم بررسی عملکرد حرارتی هندسه‌های گوناگون برای میکرومحفظه‌های احتراق به‌عنوان منبع گرما در سیستم‌های ترموفتولتاییک، عدم توجه به میکرومحفظه‌های حلزونی در تحقیقات پیشین، نویسندگان این مقاله را مجاب به پوشش این شکاف تحقیقاتی در این زمینه کرده است. با همین انگیزه، در طی پژوهش حاضر در نظر است که احتراق پیش‌آمیخته هیدروژن/هوا در یک میکرومحفظه حلزونی بررسی و عملکرد گرمایی آن به‌منظور استفاده به‌عنوان منبع گرما در سیستم‌های میکروترموفتولتاییک ارزیابی شود.

معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی، معادله تکانه، معادله انرژی در سیال، معادله بقای گونه‌ها، معادله حالت گاز ایده‌آل و معادله رسانش گرما در دیوار می‌باشند. معادلات نامبرده به ترتیب زیر در روابط (۱) تا (۶) نشان داده شده‌اند. این معادلات به‌صورت پایا و سه‌بعدی با روش‌های عددی حل می‌شوند. در مورد معادله رسانش گرما در دیوار، فرض بر این است که ضریب رسانش گرمایی دیوار ثابت است.

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

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

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

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

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

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

در رابطه‌های بالا، ρ ، u ، P ، μ ، λ_f ، h_k ، h ، Y_i و $\dot{\omega}_T$ به‌ترتیب چگالی، بردار سرعت، فشار، لزجت دینامیکی سیال، ضریب رسانش گرمایی سیال، آنتالپی گونه، آنتالپی کل، کسر جرمی گونه، و نرخ گرمای آزاد شده واکنش می‌باشند. همچنین R_u ، \overline{W} ، T ، $D_{i,m}$ و k به‌ترتیب وزن مولکولی میانگین مخلوط واکنشی، ثابت جهانی گازها، دما، ضریب نفوذ جرمی گونه i ام در مخلوط واکنشی و ضریب رسانش دیوار هستند. برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل $k-\epsilon$ Standard استفاده شده است و معادلات انتقالی آن مطابق مرجع [۲۷] به‌صورت زیر نمایش داده شده است. همچنین، اعتبار این مدل در پژوهش‌های عددی پیشین بارها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج قابل قبولی در رابطه با جریان واکنشی در میکرومحفظه‌ها ارائه کرده است.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - \gamma_M + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (8)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

در معادلات فوق μ_t لزجت آشفتگی است. k انرژی جنبشی توربولانسی، ε نرخ اتلاف آشفتگی، G_k انرژی جنبشی تولید شده در اثر گرادیان سرعت متوسط، G_b انرژی جنبشی ناشی از شناوری، γ_M سهم اتساع نوسانی در آشفتگی تراکم پذیر در نرخ اتلاف کلی، $C_{1\varepsilon}$ و $C_{2\varepsilon}$ ثابت‌های مدل هستند. همچنین، σ_ε و σ_k اعداد پراانتل آشفتگی برای k و ε هستند و S_ε به همراه S_k جمله‌های چشمه هستند. برای محاسبه بازده سیستم میکروتورموفتولتاییک، از روابط ۱۰ تا ۱۲ مطابق زیر استفاده می‌شود.

$$\dot{Q}_{Rad} = \sigma \varepsilon A (T_w^4 - T_{sur}^4) \quad (10)$$

$$\dot{Q}_R = \dot{m}_{H_2} Q_{LHV} \quad (11)$$

در روابط بالا \dot{Q}_R و \dot{Q}_{Rad} به ترتیب نرخ انتقال گرمای تابشی از سطح خارجی دیوار و نرخ انرژی شیمیایی آزاد شده هستند. همچنین σ ، ε ، T_w و A به ترتیب ثابت استفان - بولتزمن، ضریب صدور سطح، دمای دیوار و سطح انتقال گرما هستند. \dot{m}_{H_2} دبی جرمی هیدروژن و Q_{LHV} ارزش حرارتی پایین سوخت هیدروژن است که مقدار ۱۱۹ مگاژول بر کیلوگرم در نظر گرفته شده است [۲۶]. راندمان کل سیستم میکروتورموفتولتاییک مطابق رابطه ۱۲ به صورت زیر تعریف می‌شود که با توجه به مراجع موجود مقدار ۱۵٪ برای راندمان تبدیل میکروتورموفتولتاییک η_{MTPV} در نظر گرفته می‌شود.

$$\eta_{Total} = \frac{\dot{Q}_{Rad}}{\dot{Q}_R} \eta_{MTPV} \quad (12)$$

هندسه مسئله

هندسه مسئله شامل یک میکرومحفظه احتراق حلزونی دو مسیره است. منظور از دومسیره وجود دو مسیر برای حرکت سیال یکی برای ورود مخلوط واکنشی و دیگری برای خروج گازهای حاصل از احتراق است که حین خروج بخشی از آنتالپی مازاد خود را به مخلوط واکنشی ورودی از طریق دیواره‌های جدا کننده منتقل و آن را پیش گرم می‌کند. در شکل ۱ - الف نمای دوبعدی از محفظه احتراق و ابعاد آن و در شکل ۱ - ب نمای سه بعدی آن نشان داده شده است.

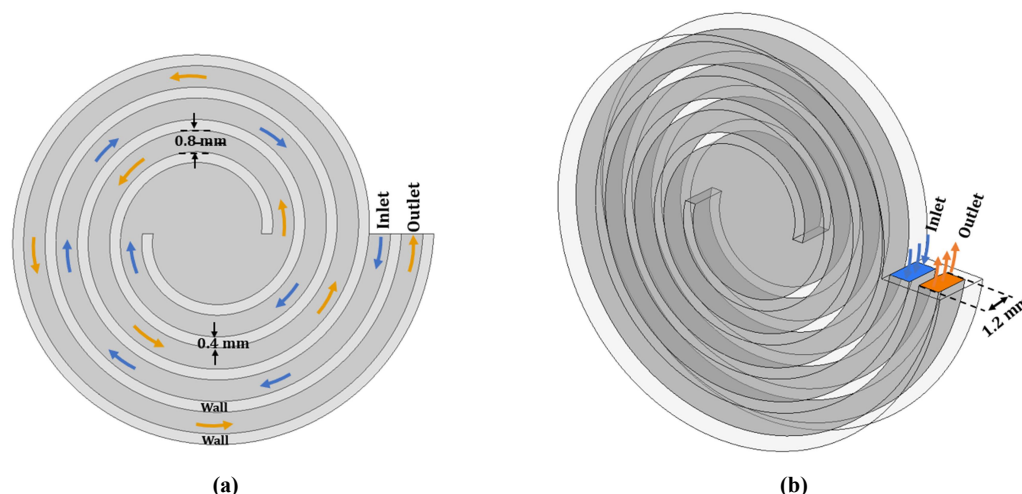


Figure 1: Two (a) and three-dimensional (b) view of Swiss-roll micro combustion chamber with relating dimensions. Wall thickness is 0.4 mm everywhere.

شکل ۱- نمای دوبعدی محفظه احتراق حلزونی به همراه ابعاد آن (الف) و نمای سه بعدی (ب). ضخامت دیوار ۰/۴ میلی متر است

شرایط مرزی و روش حل عددی

در ورودی برای سرعت، دما و کسر جرمی گونه‌ها از شرط مرزی دیریکله (مقدار ثابت) استفاده شده است. دمای مخلوط پیش‌آمیخته ورودی ۳۰۰ 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 نیومن 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 نیومن برابر با گرادیان صفر استفاده شده است. برای دما از شرط مرزی کوپل دمایی در سطح مشترک جریان سیال و دیوار داخلی استفاده شده است. در مرز خروجی از شرط مرزی نیومن برای سرعت، دما و کسر جرمی گونه‌ها استفاده شده است. همچنین، برای فشار از شرط مرزی دیریکله برابر با فشار اتمسفر استفاده شده است. برای سطح خارجی (بیرونی) محفظه احتراق، هر دو مکانیزم انتقال گرمای جابجایی و تشعشع در نظر گرفته شده است. همچنین، دمای محیط اطراف ۳۰۰ کلوین فرض شده است. برای حل عددی معادلات حاکم از نرم‌افزار تجاری Fluent 19.2 استفاده شده است. در این نرم‌افزار تنظیماتی از قبیل مدل Standard k-ε برای جریان آشفته، مدل DO¹ برای تابش گرمایی و الگوریتم Coupled 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 [۲۸] شامل ۹ گونه شیمیایی و ۲۱ واکنش مقدماتی استفاده شده است.

اعتبارسنجی حلگر و دقت شبکه

به منظور اعتبارسنجی دقت حلگر از نتایج تجربی یانگ و همکاران [۱۰] برای یک میکرولوله پله‌دار استفاده شده است. در این آزمایش، تغییرات میانگین دمای سطح خارجی دیوار با نسبت هم‌ارزی برای میکرولوله پله‌دار گزارش شده است. ابعاد میکرولوله و تصویر برش خورده آن در شکل ۲ - الف نشان داده شده است. جنس دیوار میکرولوله سیلیکون کاربید (SiC) و سرعت ورودی مخلوط واکنشی برابر با ۱۲ متر بر ثانیه تعیین شده است. با توجه به شکل، حلگر مسئله دقت قابل قبولی داشته و رفتار تغییرات میانگین دمای سطح خارجی دیوار با نسبت هم‌ارزی را به درستی محاسبه می‌کند. در شکل ۲ - ب دقت شبکه محاسباتی برای تعداد مختلف سلول‌های شبکه بررسی شده است.

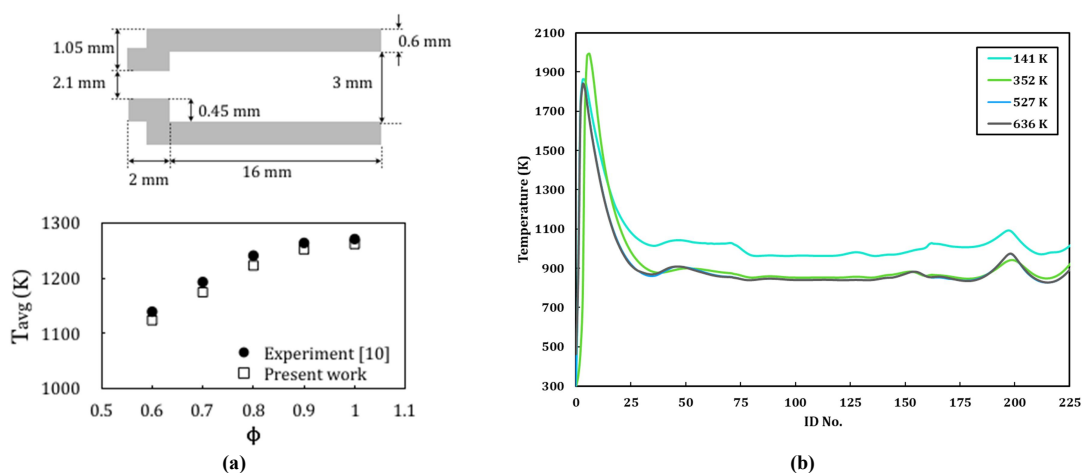


Figure 2: Diagram of solver validation within microtube's dimensions (a) and grid study (b)

شکل ۲- نمودار مربوط به اعتبارسنجی حلگر همراه با ابعاد میکرولوله آزمایش (الف) و نمودار مربوط به دقت شبکه محاسباتی (ب)

¹ Discrete Ordinate

تفسیر داده‌ها و نتایج

این بخش به ارائه نتیجه‌ها و تفسیر داده‌های حاصل از حل عددی معادلات حاکم اختصاص می‌یابد. در ابتدا تأثیر سرعت ورودی بر ناحیه احتراق و رفتار نمودارهای دما برای جریان‌های مسیر رفت و برگشت بررسی می‌شود. سپس تأثیر نسبت هم‌ارزی و ضریب رسانش گرمایی دیوار بر ناحیه احتراق و دمای آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه تأثیر سرعت جریان ورودی، نسب هم‌ارزی و ضریب رسانش گرمایی دیوار بر عملکرد گرمایی محفظه احتراق با محاسبه پارامترهای مربوط به توزیع دمای دیوار و بازده مطالعه می‌شوند.

بررسی تأثیر سرعت ورودی

در شکل ۳ کانتورهای تغییرات کسر جرمی گونه OH بر حسب تغییرات سرعت ورودی برای نسبت هم‌ارزی ۰/۶ و ضریب رسانش گرمایی دیوار ۱۲ وات بر مترکلوین نشان داده شده است. با توجه به این که گونه OH یک گونه فعال در جبهه شعله است، می‌توان از ترسیم کانتورهای تغییرات آن برای مطالعه مکان و وسعت ناحیه احتراق کمک گرفت. با توجه به شکل ۳، ناحیه احتراق در سرعت ورودی ۶ متر بر ثانیه در نیم‌دور اول مسیر رفت قرار دارد. با افزایش سرعت ورودی تا مقدار ۹ متر بر ثانیه، ناحیه احتراق به نیم دور دوم مسیر رفت جابجا و شدت آن هم بیشتر می‌شود. در واقع، با افزایش سرعت جریان ورودی، زمان ماندگاری جریان در محفظه احتراق در مقابل سایر مقیاس‌های زمانی مربوط به پدیده‌های انتقال (حرارت و نفوذ) کاهش می‌یابد به گونه‌ای که جریان واکنشی طول بیشتری را برای محترق شدن طی کند. افزایش سرعت جریان ورودی وسعت ناحیه احتراق را نیز گسترده‌تر می‌کند. در شکل ۳ مشاهده می‌شود که وسعت ناحیه احتراق برای سرعت ۹ متر بر ثانیه از ۶ متر بر ثانیه بیشتر است و با افزایش سرعت ورودی به ۱۲ متر بر ثانیه ناحیه احتراق ضمن جلوتر رفتن، تا نیم‌دور سوم مسیر رفت گسترش می‌یابد. گسترش ناحیه احتراق با افزایش سطح شعله همراه است که منجر به افزایش گرمای آزاد شده احتراق می‌شود. با افزایش سرعت ورودی به ۱۵ متر بر ثانیه، ناحیه احتراق به سمت عقب گسترش می‌یابد که علت آن در ادامه با تفسیر نمودارهای دمای جریان تشریح خواهد شد. در کل، با توجه به شکل ۳ افزایش سرعت جریان ورودی در محدوده ۶ متر بر ثانیه تا ۱۵ متر بر ثانیه تأثیر مستقیمی بر گسترش ناحیه احتراق و تقویت شعله در میکرومحفظه‌های حلزونی دارد.

در شکل ۴ نمودارهای تغییرات دمای جریان در امتداد خط مرکزی مسیرهای رفت و برگشت با سرعت ورودی در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ و ضریب رسانش گرمایی دیوار ۱۲ وات بر مترکلوین رسم شده است. در این نمودارها جهت جریان‌ها در مسیرهای رفت و برگشت توسط پیکان روی نمودارها مشخص شده است. همچنین، محدوده‌های نیم‌دورها توسط خط‌چین‌ها مشخص شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۱ نیز مشخص است، مسیر رفت دارای چهار نیم‌دور و مسیر برگشت دارای پنج نیم دور است. مطابق شکل ۴ در سرعت ورودی ۶ متر بر ثانیه بیشترین دمای مسیر رفت در نیم‌دور اول قرار دارد و جریان واکنشی پس از طی یک مسیر کوتاه‌تر نسبت به سایر سرعت‌ها محترق می‌شود. در خلال فاصله‌ای که جریان واکنشی ورودی تا محترق شدن طی می‌کند، جذب گرمای حاصل از احتراق از مسیر برگشت اتفاق می‌افتد. در واقع، انرژی فعال‌سازی برای ایجاد احتراق پایدار توسط آنتالپی مازاد گازهای حاصل از احتراق که در مسیر برگشت در حال جریان هستند، تأمین می‌شود.

با توجه به شکل ۳، برای سرعت ورودی ۶ متر بر ثانیه ناحیه احتراق در نیم دور اول تشکیل شده و بخشی از گرمای آزاد شده احتراق را از طریق دیوار به جریان برگشتی در نیم‌دورهای سوم و پنجم (مسیر برگشت) که در مجاورت نیم‌دور اول مسیر رفت هستند، منتقل می‌کند. بخشی از گرمای منتقل شده به نیم‌دورهای سوم و پنجم مسیر برگشت صرف پیش‌گرمایش جریان واکنشی ورودی می‌شود و مابقی به محیط دفع می‌شود. مطابق شکل ۴ برای سرعت ۶ متر بر ثانیه، نمودارهای دما برای مسیرهای رفت و برگشت در ابتدای نیم‌دور سوم رفت با هم تلاقی می‌کنند و سپس دمای مسیر رفت تا انتهای نیم‌دور چهارم تقریباً ثابت می‌ماند. ولی دمای مسیر برگشت پس از تلاقی (در نیم‌دور سوم) از دمای مسیر رفت بیشتر می‌شود. سپس در دور

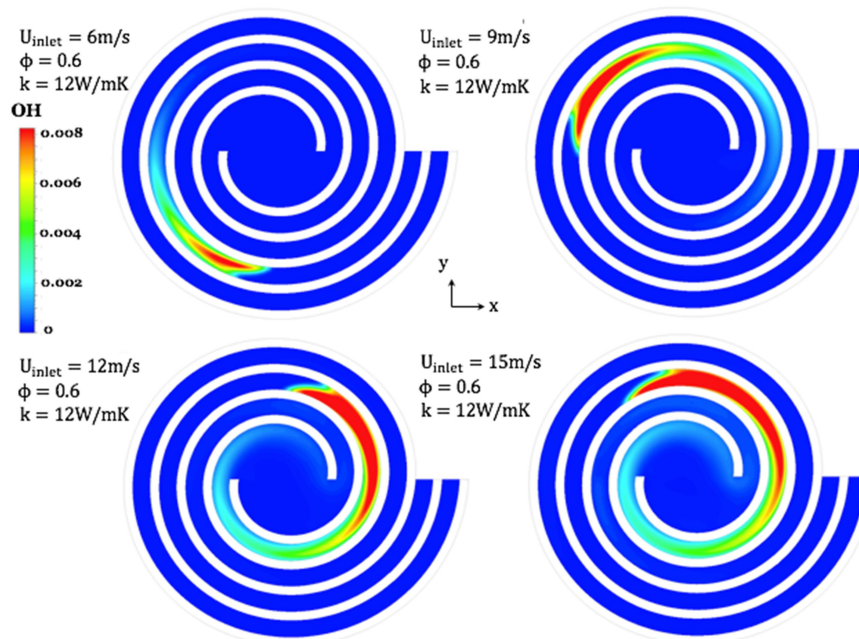


Figure 3: Contours of OH mass fraction variations with inlet velocity at $\phi = 0.6$ and $k = 12 \text{ W/m.K}$. Contours are plotted on the plane located at height of 1.3 mm (middle plane of the micro combustion chamber).

شکل ۳- کانتورهای تغییرات کسر جرمی گونه OH برحسب تغییرات سرعت ورودی در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ و ضریب رسانش گرمایی دیوار ۱۲ وات بر مترکلین. کانتورها روی صفحه واقع در ارتفاع ۱/۳ میلی‌متر (صفحه گذرنده از وسط ارتفاع میکرومحفظه احتراق) رسم شده‌اند.

چهارم مسیر برگشت مجدداً پایین‌تر از دمای مسیر رفت قرار می‌گیرد. دلیل بالاتر رفتن دمای مسیر برگشت از دمای مسیر رفت این است که نیم‌دوره‌های سوم و پنجم مسیر برگشت در مجاورت نیم‌دور اول رفت است که ناحیه احتراق در آن قرار دارد. بنابراین، دمای جریان در این نیم‌دورها (نیم‌دور سوم و پنجم مسیر برگشت) اندکی افزایش پیدا می‌کند. با افزایش سرعت جریان به ۹ متر بر ثانیه ناحیه پیش‌گرمایش گسترش می‌یابد و بیشترین دمای ناحیه احتراق در نیم‌دور دوم رفت قرار می‌گیرد و مقدار آن نسبت به سرعت ۶ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد. شیب کاهش دما برای مسیر رفت اندکی ملایم‌تر می‌شود زیرا مطابق شکل ۳ ناحیه احتراق گسترده‌تر شده است. همچنین، می‌توان نتیجه گرفت که از نیم‌دور چهارم رفت به بعد، انتقال گرما میان مسیرهای رفت و برگشت به مقدار بهینه خود رسید است. زیرا نمودارهای دما کمترین فاصله از یکدیگر را دارند. افزایش سرعت ورودی به ۱۲ و ۱۵ متر بر ثانیه منجر به ملایم‌تر شدن شیب کاهش دمای مسیر رفت بعد از نقطه ماکزیمم دما می‌شود. این مورد منجر می‌شود تا فاصله نمودارهای مسیرهای رفت و برگشت افزایش یابد و در نتیجه انتقال حرارت بین این دو مسیر از حالت بهینه خود فاصله بگیرد. مطابق نمودارها، افزایش سرعت ورودی جریان موجب افزایش انتقال گرما بین دو مسیر می‌شود زیرا فاصله نمودارها در نیم‌دوره‌های سوم و چهارم رفت افزایش می‌یابد. در تمامی سرعت‌های مورد بررسی، تغییرات دمای مسیر برگشت نسبت به مسیر رفت یکنواخت‌تر است و فراز و نشیب‌های ملایم‌تری دارد. ضمناً، افزایش سرعت ورودی دمای جریان در مسیر برگشت را افزایش می‌دهد زیرا ناحیه احتراق به طرف مرکز محفظه جابجا می‌شود. مطابق نمودارها برای سرعت‌های ۱۲ و ۱۵ متر بر ثانیه، رفتار نمودار دمای مسیر برگشت مشابه است ولی برای سرعت ۱۵ متر بر ثانیه نمودار در تمام نقاط دمای بالاتری دارد. این بالاتر بودن دما منجر به افزایش انتقال گرما از نیم‌دور پنجم برگشت به نیم‌دور اول رفت می‌شود. در نتیجه پیش‌گرمایش جریان احتراقی در نیم‌دوره‌های اول و دوم رفت افزایش می‌یابد. در نهایت جریان احتراقی مسیر کوتاه‌تری تا محترق شدن طی می‌کند (شکل ۳). رفتار نمودارهای شکل ۴ مشابه رفتار نمودارهای ارائه

شده برای سوخت متان در مرجع [۲۳] است. از این جهت که نمودارهای دما در امتداد مسیر برگشت برای مواردی که ناحیه احتراق در مسیر رفت قرار می‌گیرد، تغییرات ملایم‌تری نسبت به مسیر رفت دارد. ضمن اینکه افت‌وخیزهای نمودار دما در امتداد مسیر رفت در مرجع [۲۳] مشابه افت و خیزهای مسیر رفت در نمودارهای شکل ۴ هستند.

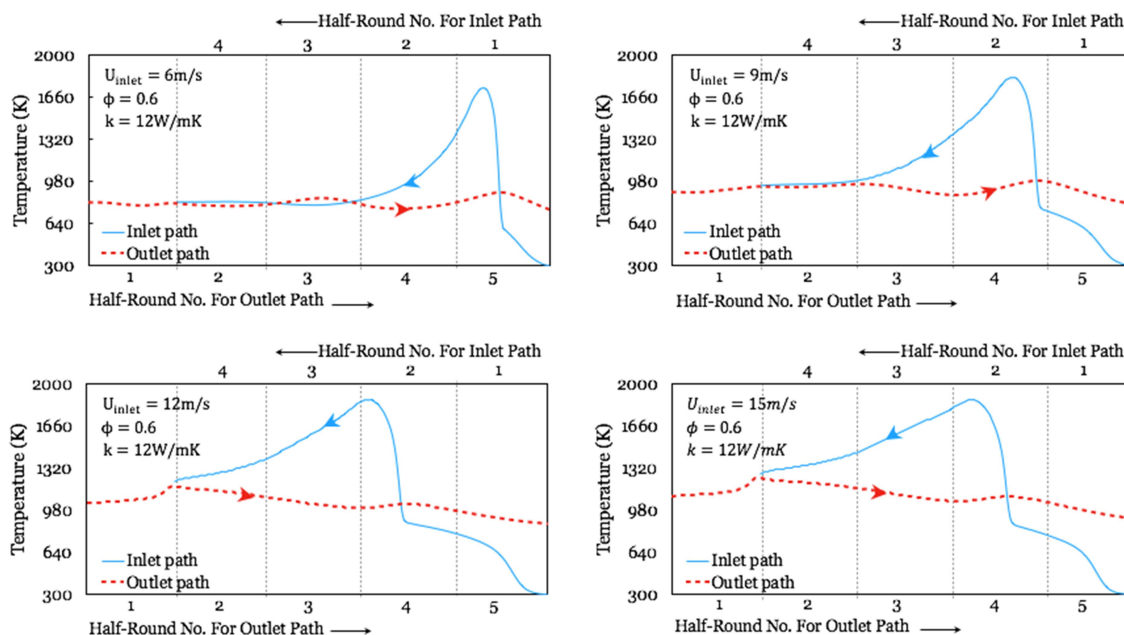


Figure 4: Diagrams of temperature variations along the inlet and outlet paths at $\phi = 0.6$ and $k = 12W/m.K$.

شکل ۴- نمودارهای تغییرات دمای سیال در امتداد مسیرهای رفت و برگشت با سرعت ورودی در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ و ضریب رسانش گرمایی دیوار ۱۲ وات بر مترکلوبین.

بررسی تأثیر نسبت هم‌ارزی

در شکل ۵ کانتورهای تغییرات کسر جرمی گونه OH برحسب تغییرات نسبت هم‌ارزی برای سرعت ورودی ۹ متر بر ثانیه و ضریب رسانش گرمایی دیوار ۱۲ وات بر مترکلوبین نشان داده شده است. در نسبت هم‌ارزی ۰/۴ ناحیه احتراق ضعیف‌تر می‌شود زیرا کسر جرمی گونه OH کاهش می‌یابد. همچنین، ناحیه احتراق در مرکز میکرومحفظة تشکیل می‌شود. با افزایش نسبت هم‌ارزی به ۰/۶ ناحیه احتراق در نیم‌دور دوم مسیر رفت قرار می‌گیرد و تقویت می‌شود. با افزایش نسبت هم‌ارزی به ۰/۸، ناحیه احتراق به نیم‌دور اول مسیر رفت منتقل می‌شود و به دلیل نسبت بالای سوخت در مخلوط واکنشی ورودی، مسیر کوتاه‌تری تا محترق شدن طی می‌کند. افزایش نسبت هم‌ارزی مخلوط واکنشی ورودی تا مقدار یک موجب تقویت ناحیه احتراق و تشکیل شعله در نزدیکی مرز ورودی می‌شود. شکل ۵ نشان می‌دهد که نسبت هم‌ارزی تأثیر مستقیمی بر مکان ناحیه احتراق دارد. نتایج شکل ۵ برای نسبت هم‌ارزی ۰/۴ به خوبی مزایای استفاده از میکرومحفظة احتراق حلزونی را به‌ویژه در مخلوط‌های واکنشی بسیار رقیق نشان می‌دهد. در مطالعه انجام شده توسط گروه نویسندگان برای میکرومحفظة‌های احتراق متشکل از صفحات موازی تخت و موجدار [۲۹] مشخص شد که میکرومحفظة‌های احتراقی نامبرده توانایی ایجاد احتراق پایدار برای مخلوط‌های واکنشی با نسبت هم‌ارزی ۰/۴ را به‌ترتیب تا سرعت ورودی ۳ متر بر ثانیه و ۸ متر بر ثانیه دارا هستند و با افزایش مقدار سرعت ورودی از مقادیر ذکر شده، شعله دچار خاموشی در این میکرومحفظة‌ها می‌شود. علت اصلی تشکیل ناحیه احتراق پایدار در میکرومحفظة‌های حلزونی ویژگی بازچرخش گرما در آنها است که امکان استفاده از آنتالپی مزاد محصولات

احتراق را برای پیش گرمایش مخلوط واکنشی ورودی و خوداتکایی احتراق را فراهم می‌کند. در نتیجه به این میکرومحفله‌ها این توانایی را می‌دهد تا احتراق پایدار را برای مخلوط‌های بسیار رقیق فراهم آورد.

در شکل ۶ نمودارهای تغییرات دمای جریان در امتداد مسیرهای رفت و برگشت (مشابه شکل ۴) با نسبت هم‌ارزی در سرعت ورودی ۹ متر بر ثانیه و ضریب رسانش گرمایی دیوار ۱۲ وات بر مترکلوین رسم شده‌اند. مطابق این شکل، در نسبت هم‌ارزی ۰/۴ مخلوط واکنشی ورودی طولانی‌ترین مسیر را تا محترق شدن طی می‌کند و در نهایت در دور چهارم مسیر رفت محترق می‌شود. مخلوط واکنشی در طی این مسیر در حال جذب گرما از مسیر برگشت است. نمودار تغییرات دما در امتداد مسیر برگشت نسبت به سایر نسبت‌های هم‌ارزی تغییرات شدیدتر را نمایش می‌دهد. به دلیل قرار گرفتن ناحیه احتراق در مرکز میکرومحفله، دما در امتداد نیم‌دور اول مسیر برگشت صعودی و دارای بیشترین غیریکنواختی است. دلیل آن این است که مطابق شکل ۵ برای نسبت هم‌ارزی ۰/۴ بخش کوچکی از ناحیه احتراق وارد مسیر برگشت می‌شود. در نتیجه تغییرات دما در دور اول برگشت صعودی است. تغییرات دما در نیم‌دور دوم مسیر برگشت نزولی است. همچنین، تغییرات دما در نیم دور چهارم مسیر رفت صعودی است. از آنجایی که نیم‌دور دوم برگشت در مجاورت نیم‌دورهای دوم و چهارم رفت است، بخشی از گرمای حاصل از احتراق را به آنجا منتقل می‌کند. در این میان، سهم نیم‌دور چهارم رفت بیشتر است زیرا اختلاف نمودارها بیشتر است. در واقع، بخش قابل توجهی از انرژی گرمایی موردنیاز برای احتراق پایدار با گرمای منتقل شده از نیم‌دور دوم برگشت تأمین می‌شود. از مقایسه نمودار مربوط به نسبت هم‌ارزی ۰/۴ با سایر نمودارها، می‌توان گفت پیش‌گرمایش جریان در نسبت هم‌ارزی ۰/۴ به نحو مطلوب‌تری انجام می‌شود، زیرا فاصله نمودارها تا انتهای نیم‌دور دوم مسیر رفت به حداقل مقدار خود می‌رسد و این بسیار کمتر از فاصله نمودارها در نیم‌دور اول رفت (جایی که پیش‌گرمایش انجام می‌شود) برای سایر نسبت‌های هم‌ارزی است. درحالی‌که از نیم‌دور سوم رفت به بعد در نسبت هم‌ارزی ۰/۴ اختلاف نمودارها بیشتر می‌شود و انتقال گرما میان مسیرهای رفت و برگشت از حالت بهینه خود فاصله می‌گیرد.

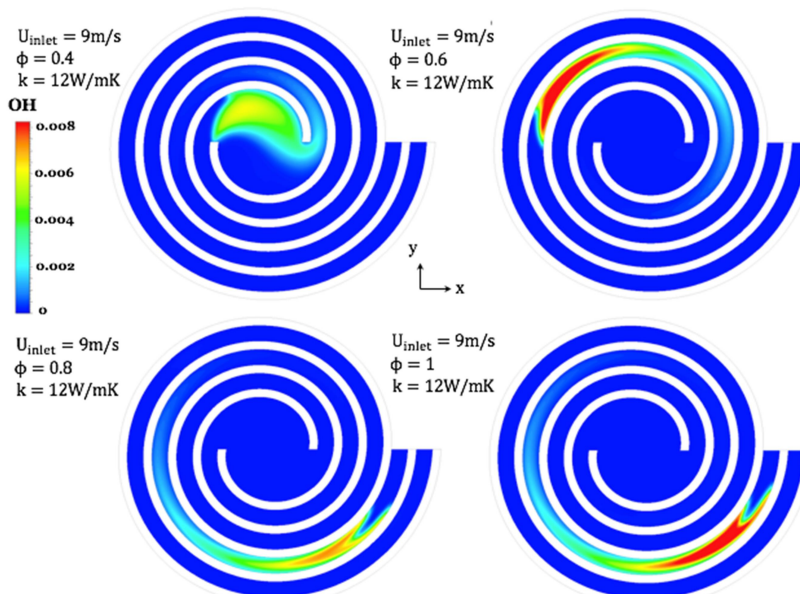


Figure 5- Contours of the OH species mass fraction variations with equivalence ratio at inlet velocity of 9 m/s and wall thermal conductivity of 12 W/m.K . Contours are plotted on the plane located at height of 1.3 mm (middle plane of the micro combustion chamber).

شکل ۵- کانتورهای تغییرات کسر جرمی گونه OH برحسب تغییرات نسبت هم‌ارزی برای سرعت ورودی ۹ متر بر ثانیه و ضریب رسانش گرمایی دیوار ۱۲ وات بر مترکلوین. کانتورها روی صفحه واقع در ارتفاع ۱/۳ میلی‌متر (صفحه گذرنده از وسط ارتفاع میکرومحفله احتراق) رسم شده‌اند.

با افزایش نسبت هم‌ارزی به $0/6$ ، نمودار دمای مسیر برگشت یکنواخت‌تر می‌شود. در نیم‌دور دوم برگشت، فاصله نمودارها به حداقل می‌رسد ولی اختلاف قابل توجهی بین نمودارها در نیم‌دور سوم تا پنجم برگشت (نیم‌دور اول تا سوم رفت) وجود دارد. با افزایش نسبت هم‌ارزی به $0/8$ ، فاصله نمودارها در نیم‌دور سوم رفت و برگشت به کمترین مقدار می‌رسد. همچنین، اختلاف نمودارها در نیم‌دور چهارم رفت نیز نسبت به نسبت هم‌ارزی $0/6$ کمتر می‌شود. نمودار دمای مسیر برگشت یکنواخت‌تر می‌شود و نقطه‌ای که دو نمودار دما تقریباً به هم می‌رسند به اندازه یک نیم‌دور در امتداد مسیر برگشت جابجا و به انتهای نیم‌دور سوم جابجا می‌شود. با افزایش نسبت هم‌ارزی به مقدار استوکیومتری، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در رفتار نمودارها و محل به هم رسیدن آن‌ها ایجاد نمی‌شود. با این حال، بیشینه دما در امتداد مسیر رفت افزایش می‌یابد. همچنین، دمای مسیر برگشت افزایش می‌یابد. در حالت کلی با توجه به نتایج، بازچرخش مناسب گرما در میکرومحفظة‌های حلزونی امکان تشکیل شعله پایدار برای نسبت‌های هم‌ارزی کم حتی تا مقدار $0/4$ فراهم می‌کند و این از نقطه نظر کاهش مصرف سوخت و حدود شعله‌وری بسیار مطلوب است زیرا میکرو محفظه احتراق قادر به تحویل انرژی گرمایی پایدار با مصرف سوخت کم‌تر به سیستم میکروتروموفتوولتاییک است.

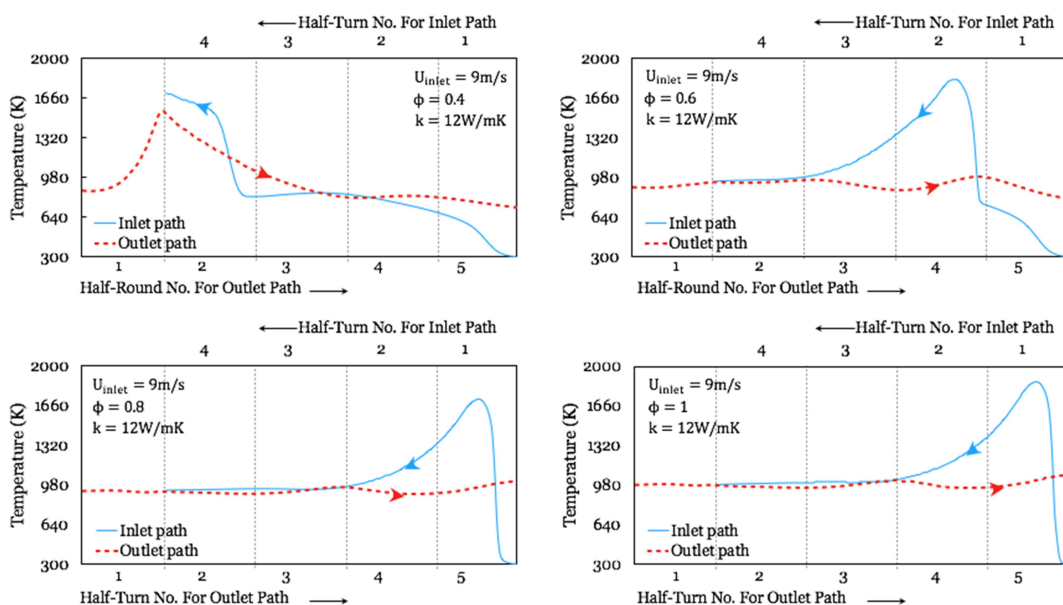


Figure 6: Diagrams of temperature variations along the inlet and outlet paths with equivalence ratio at $U_{inlet} = 9 \text{ m/s}$ and $k = 12 \text{ W/m.K}$.

شکل ۶- نمودارهای تغییرات دمای جریان در امتداد مسیرهای رفت و برگشت با نسبت هم‌ارزی در سرعت ورودی ۹ متر بر ثانیه و ضریب رسانش گرمایی دیوار ۱۲ وات بر مترکلین.

بررسی تأثیر ضریب رسانش گرمایی دیواره

در این بخش تأثیر رسانش گرمایی دیوار بررسی خواهد شد. بدین منظور سه مقدار ۱، ۵ و ۱۲ وات بر مترکلین برای ضریب رسانش دیوار جهت مطالعه تأثیر آن در نظر گرفته شد. در شکل ۷ نمودارهای تغییرات دمای سیال در امتداد مسیرهای رفت و برگشت با ضریب رسانش گرمایی دیوار و همچنین کانتورهای تغییرات کسر جرمی گونه OH بر حسب برای سرعت ورودی ۹ متر بر ثانیه و نسبت هم‌ارزی $0/6$ نشان داده شده است. با توجه این شکل‌ها افزایش رسانش گرمایی دیوار از مقدار ۱ به ۵ وات بر متر کلین تأثیر چندانی در موقعیت ناحیه احتراق ایجاد نمی‌کند. ولی باعث افزایش بازچرخش گرما و در نهایت نزدیک‌تر شدن نمودارهای دمای مسیرهای رفت و برگشت می‌شود. از مقایسه نمودارهای دما در شکل‌های ۷ - الف و ب مشخص

می‌شود که اختلاف نمودارهای دما در نیم‌دور دوم برگشت (نیم دور چهارم رفت) با افزایش ضریب رسانش گرمایی دیوار کاهش یافته است. با افزایش ضریب رسانش گرمایی دیوار به مقدار ۱۲ وات بر مترکلوین ناحیه احتراق به طرف مرکز میکرومحفظه جابجا می‌شود و کاملاً در ابتدای نیم دور دوم رفت قرار می‌گیرد. همچنین، از مقایسه آن با ضریب رسانش گرمایی ۱ وات بر مترکلوین مشخص است که از گستردگی آن کاسته می‌شود. در ضریب رسانش گرمایی دیوار ۱ وات بر مترکلوین ناحیه احتراق گسترده‌تر است. با توجه به کاهش رسانش گرمایی دیوار، گرمای کمتری از ناحیه احتراق توسط دیوار جذب می‌شود. در نتیجه، بخش قابل توجهی از گرمای آزاد شده احتراق در ناحیه احتراق باقی می‌ماند تا به محیط اطراف تابش یا جابجا شود. در حالی که با افزایش رسانش گرمایی دیوار، دیوار می‌تواند گرمای بیشتری از ناحیه احتراق جذب کند. در نتیجه ناحیه احتراق گرمای بیشتری به منظور بازچرخش از دست می‌دهد. بنابراین، ناحیه احتراق کوچک‌تر می‌شود.

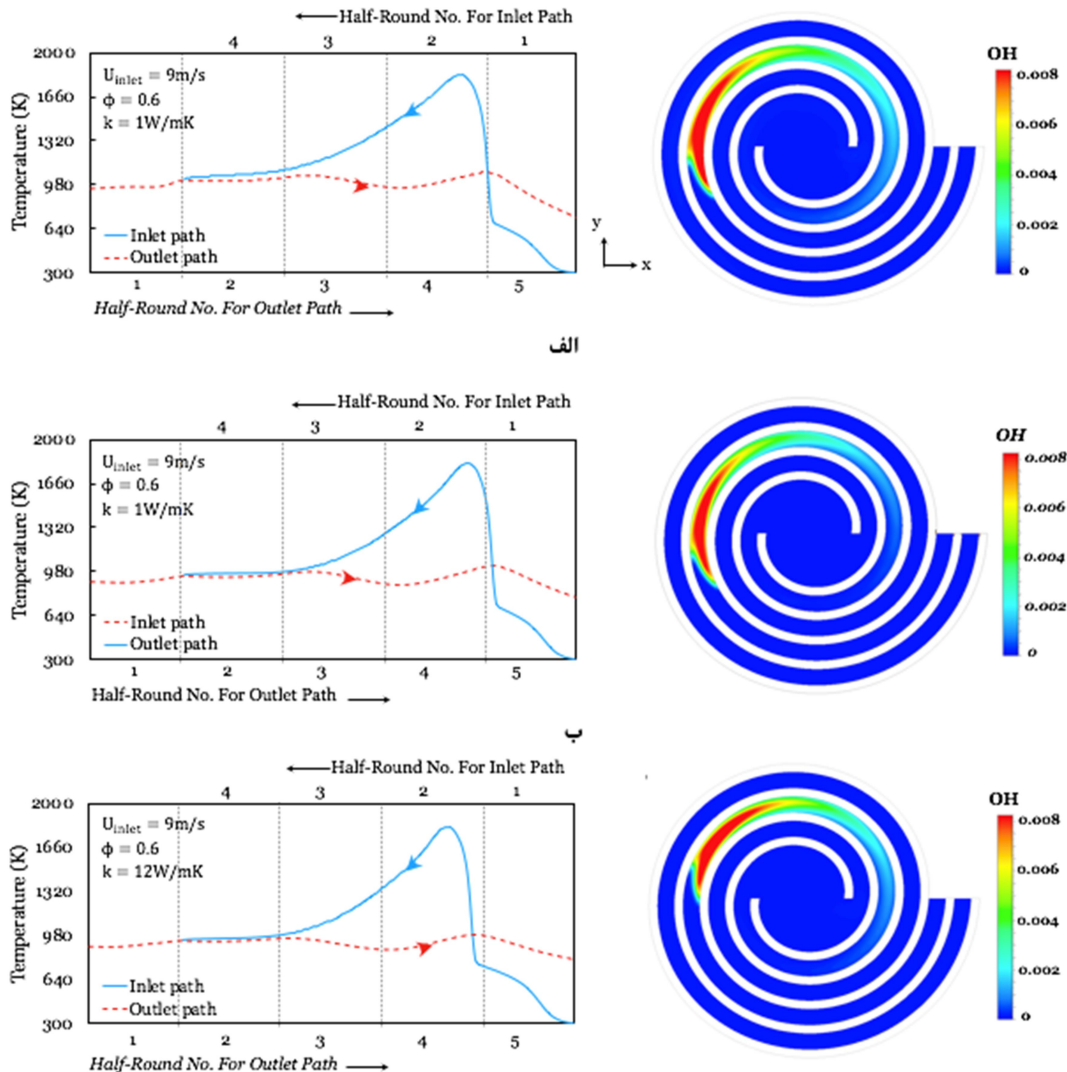


Figure 7: Contours of the OH species mass fraction variations and diagrams of temperature variations along the inlet and outlet paths with wall thermal conductivity at $U_{inlet} = 9 \text{ m/s}$ and $\phi = 0.6$

شکل ۷- کانتورهای تغییرات کسر جرمی گونه OH و نمودارهای تغییرات دمای جریان در امتداد مسیرهای رفت و برگشت بر حسب تغییرات ضریب رسانش گرمایی دیوار در سرعت ورودی ۹ متر بر ثانیه و نسبت هم‌ارزی ۰/۶

با توجه به نمودارهای دما، دمای مسیر برگشت (به ویژه در نیم دورهای اول و دوم) برای رسانش گرمایی دیوار بزرگتر، یکنواختتر است. ضمن اینکه دمای مسیر رفت پس از رسیدن به بیشینه مقدار خود با شیب ملایمتری در ضریب رسانش گرمایی کوچکتر کاهش می یابد. در حالی که شیب کاهش نمودار دما برای ضریب رسانش بزرگتر تندتر است. زیرا دیوار گرمای بیشتری از احتراق جذب کرده و همین ویژگی باعث می شود تا فاصله نمودارها از هم در نیم دور دوم برگشت کاهش یابد و انتقال گرما در حالت بهینه تر انجام شود. در حالت کلی با توجه به نتایج به نظر می رسد کاهش رسانش گرمایی دیوار موجب انحراف بیشتر انتقال گرما میان مسیرهای رفت و برگشت از حالت بهینه خود می شود.

بررسی عملکرد گرمایی دیواره و بازده ترموفتوولتاییک

این بخش به بررسی عملکرد گرمایی دیواره و بازده محفظه احتراق برای مواردی می پردازد که به عنوان منبع گرما در سیستم های میکرو ترموفتوولتاییک استفاده می شود. بدین منظور، دمای میانگین سطح خارجی دیوار T_{avg} ، شاخص یکنواختی دمای دیوار T_u ، انحراف معیار دمای دیوار σ ، بازده کل محفظه احتراق η_{Total} ، آهنگ انتقال گرمای تابشی دیوار \dot{Q}_{Rad} و آهنگ گرمای آزاد شده احتراق \dot{Q}_R برای سرعت های ورودی، نسبت های هم ارزی و ضرایب رسانش دیوار در این بخش محاسبه شده اند. برای محاسبه شاخص یکنواختی دمای دیوار و انحراف معیار دمای دیوار به ترتیب از روابط ۱۴ و ۱۵ مطابق زیر استفاده می شود.

$$T_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i - T_{avg} | A_i)]}{2T_{avg} \sum_{i=1}^n A_i} \quad (14)$$

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - T_{avg})^2}{N} \right)^{1/2} \quad (15)$$

در روابط فوق T_{avg} دمای میانگین روی سطح خارجی، T_i دمای سلول i ام، A_i مساحت سلول i ام شبکه و N مجموع سلول ها هستند. همچنین، مقادیر آهنگ گرمای تابشی دیوار، گرمای آزاد شده احتراق و بازده کل به ترتیب از روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳ محاسبه می شوند. در مورد شاخص یکنواختی دما ذکر این نکته لازم است که هرچه به مقدار ۱ نزدیک تر باشد، نشان دهنده یکنواختی بیشتر دما در سطح خارجی دیوار است.

نمودار تغییرات دمای میانگین سطح خارجی دیوار با تغییرات سرعت ورودی در شکل ۸ - الف رسم شده است. مطابق این نمودار، میانگین دمای سطح خارجی دیوار با افزایش سرعت ورودی افزایش می یابد. این افزایش دما نسبت به سرعت قبلی برای سرعت های ۹، ۱۲ و ۱۵ متر بر ثانیه به ترتیب ۱۰/۲۵، ۶/۵۴ و ۵ درصد است. بنابراین، اگرچه دمای میانگین با افزایش سرعت افزایش می یابد ولی شیب آن کاهشی است. در واقع با افزایش سرعت ورودی از میزان رشد دمای میانگین دیوار کاسته می شود. افزایش دمای میانگین تأثیر مستقیمی روی آهنگ انتقال گرمای تابشی از محفظه احتراق دارد زیرا با توان چهارم دما رابطه مستقیم دارد. با افزایش سرعت ورودی دبی جرمی سوخت ورودی نیز افزایش می یابد. در نتیجه ناحیه احتراق گسترده تر (شکل ۴) و انرژی گرمایی بیشتری آزاد و به دیوار منتقل می شود. بنابراین، افزایش سرعت ورودی تأثیر مطلوبی بر دمای میانگین دیوار دارد. نمودار تغییرات شاخص یکنواختی دمای دیوار با تغییرات سرعت ورودی در شکل ۸ - ب رسم شده است و برخلاف نمودار دمای میانگین، رفتاری افزایشی-کاهشی با سرعت ورودی دارد. مطابق این نمودار، در سرعت ۶ متر بر ثانیه شاخص یکنواختی دما برابر با مقدار ۰/۹۷ است. این مقدار که بیشترین مقدار شاخص یکنواختی برای مقادیر در نظر گرفته شده سرعت ورودی است، نشان می دهد که دما در سطح خارجی دیوار در سرعت ۶ متر بر ثانیه نسبت به سایر سرعت ها یکنواخت تر است. در سرعت ۹ متر بر ثانیه شاخص یکنواختی یک کاهش نسبتاً شدید را تجربه می کند و به مقدار ۰/۹۶۱

می‌رسد که نشان می‌دهد یکنواختی دما کمتر شده است. با افزایش سرعت ورودی به ۱۲ متر بر ثانیه شاخص یکنواختی به مقدار ۰/۹۶۷ افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود نسبی در یکنواختی دما است. در سرعت ورودی ۱۵ متر بر ثانیه شاخص یکنواختی دما مجدداً کاهش یافته و تقریباً به مقدار ۰/۹۶۱ می‌رسد. بنابراین، کمترین یکنواختی دما مربوط به سرعت‌های ورودی ۹ و ۱۵ متر بر ثانیه است.

در نمودار شکل ۸ - ب محور عمودی سمت راست مربوط به تغییرات انحراف معیار دمای دیوار است. در سرعت ورودی ۶ متر بر ثانیه انحراف معیار کمترین مقدار و در سرعت ورودی ۱۵ متر بر ثانیه دارای بیشترین مقدار است. بنابراین، در سرعت ورودی ۶ متر بر ثانیه دمای سایر نقاط دیوار خارجی کمترین انحراف را از مقدار میانگین خود دارند. در نتیجه توزیع دمای سایر نقاط سطح خارجی به دمای میانگین نزدیک‌تر و در نتیجه دمای سطح خارجی یکنواخت‌تر است. در سرعت ورودی ۱۵ متر بر ثانیه اگرچه دمای متوسط دیوار بالاترین مقدار خود را دارد ولی توزیع دما روی سطح خارجی دیوار به اندازه سرعت ورودی ۶ متر بر ثانیه یکنواخت نیست. در سرعت‌های ۹ و ۱۲ متر بر ثانیه مقادیر انحراف معیار دما تقریباً نزدیک به هم هستند. با توجه به نمودارهای شکل‌های ۸ - الف و ب نتیجه می‌شود که افزایش سرعت ورودی جریان علیرغم تأثیر مطلوبی که روی دمای میانگین می‌گذارد، باعث افزایش غیریکنواختی دمای سطح خارجی دیوار و توزیع غیریکنواخت‌تر آن می‌شود. در واقع محفظه احتراق در سرعت‌های پایین‌تر دمای یکنواخت‌تری روی سطح خارجی دارد.

در شکل ۸ - ج تغییرات بازده کل سیستم برحسب تغییرات سرعت ورودی نشان داده شده است. مطابق شکل، با افزایش سرعت ورودی بازده سیستم کاهش می‌یابد و برخلاف نمودار مربوط به دمای میانگین (شکل ۸ - الف) تغییرات نمودار بازده با سرعت ورودی نزولی است. بیشترین بازده در سرعت ورودی ۶ متر بر ثانیه حاصل می‌شود که به ازای آن سطح خارجی دیوار کمترین غیریکنواختی و کمترین انحراف از مقدار دمای میانگین را دارد (شکل ۸ - ب). در سرعت ورودی ۱۵ متر بر ثانیه کمترین مقدار بازده برای سیستم حاصل می‌شود. در این سرعت، شاخص یکنواختی دما کمترین مقدار و انحراف معیار دما بیشترین مقدار خود را دارد (شکل ۸ - ب). بنابراین، تأثیر یکنواختی دمای سطح خارجی محفظه احتراق بیشتر از دمای میانگین در یک نسبت هم‌ارزی ثابت است. این تأثیر تا آنجا مهم است که حتی با افزایش دمای میانگین سطح خارجی تقریباً به مقدار K_{200} در اثر افزایش سرعت ورودی از ۶ به ۱۲ متر بر ثانیه، بازده به مقدار ۰/۸ کاهش می‌یابد.

با توجه به نمودارهای شکل ۴، در سرعت ۶ متر بر ثانیه که بیشترین بازده سیستم حاصل می‌شود، نمودارهای دمای مسیرهای رفت و برگشت نسبت به سایر سرعت‌ها در فاصله کوتاه‌تری به هم می‌رسند و اختلاف دما بین آن‌ها از ابتدای نیم‌دور سوم رفت به کمترین مقدار می‌رسد. همچنین برای سرعت ۱۵ متر بر ثانیه که فاصله نمودارهای رفت و برگشت به بیشترین مقدار می‌رسد، بازده سیستم کمترین مقدار را دارد. این مورد را این‌گونه می‌توان به بازده مرتبط کرد که در حالتی که بازده بیشترین مقدار خود را دارد، انتقال گرما بین مسیرهای رفت و برگشت به شکل مطلوب‌تری انجام می‌شود. همچنین این مورد را به صورت برعکس هم می‌توان گفت یعنی در حالتی که انتقال گرما بین مسیرهای رفت و برگشت به شکل مطلوب‌تری انجام شود، بیشترین بازده سیستم حاصل می‌شود.

در شکل ۸ - د نسبت آهنگ گرمای تابشی دیوار (خروجی مطلوب) به آهنگ گرمای آزاد شده (ورودی موردنیاز) برای سرعت‌های ورودی مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل، افزایش سرعت ورودی از ۶ به ۹ متر بر ثانیه باعث افزایش حدود ۴۹ درصدی آهنگ گرمای تابشی دیوار می‌شود. درحالی‌که، آهنگ گرمای آزاد شده حدود ۵۱ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت ورودی از ۹ به ۱۲ متر بر ثانیه، آهنگ گرمای تابشی دیوار حدود ۲۹ درصد و آهنگ گرمای آزاد شده حدود ۳۴ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین، با افزایش سرعت ورودی میزان کاهش رشد آهنگ گرمای تابشی دیوار از کاهش رشد گرمای آزاد شده بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر رشد گرمای آزاد شده از رشد گرمای تابشی دیوار بیشتر می‌شود. بنابراین، بازده سیستم با افزایش سرعت ورودی کاهش می‌یابد.

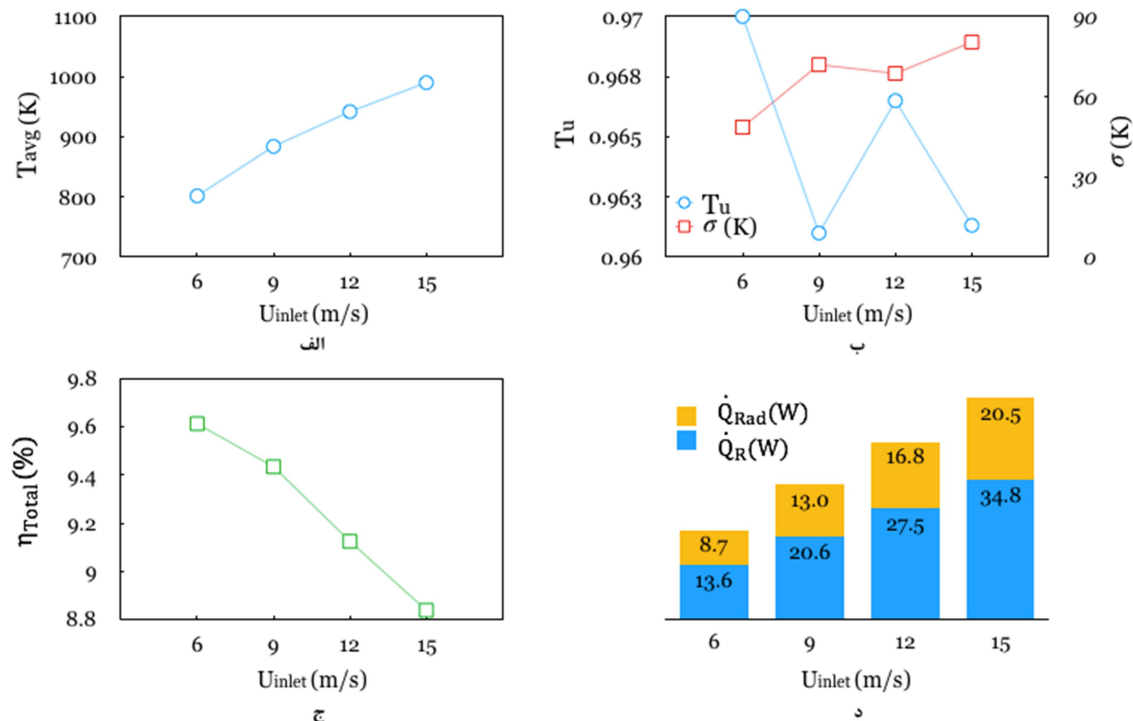


Figure 8: Diagram of changes in average temperature (a), uniformity index and deviation (b), total efficiency (c), and ratio of heat release rate and thermal radiation (d) with inlet velocity at $\phi = 0.6$ and $k = 12 \text{ W/m.K}$

شکل ۸- نمودار تغییرات دمای میانگین سطح خارجی (الف)، شاخص یکنواختی و انحراف معیار دمای سطح خارجی دیوار (ب) بازده کل (ج) و نسبت گرماهای آزاد شده و تابشی (د) با سرعت ورودی در نسبت هم‌ارزی $0/6$ و ضریب رسانش گرمای دیوار 12 وات بر مترکلوین

در ادامه به بررسی تأثیر نسبت هم‌ارزی بر عملکرد گرمایی محفظه احتراق و راندمان سیستم میکروترموفتولتاییک پرداخته می‌شود. شکل ۹ - الف نمودار تغییرات دمای میانگین سطح خارجی با نسبت هم‌ارزی در سرعت ۹ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. رفتار این نمودار مشابه نمودار شکل ۸ - الف است و محدوده تغییرات دمای میانگین با نسبت هم‌ارزی مشابه سرعت ورودی حدود ۲۰۰ کلوین است. مطابق نمودار شکل ۹ - الف، با افزایش نسبت هم‌ارزی دمای میانگین سطح خارجی محفظه احتراق افزایش می‌یابد. بیشترین دمای میانگین مربوط به نسبت هم‌ارزی ۱ و کمترین آن مربوط به نسبت هم‌ارزی $0/4$ است. با افزایش نسبت هم‌ارزی کسر جرمی سوخت در مخلوط واکنشی ورودی افزایش می‌یابد. در نتیجه شعله تقویت و انرژی گرمایی بیشتری آزاد می‌کند. افزایش انرژی گرمایی آزاد شده منجر به افزایش متوسط دمای دیوار در سطح خارجی می‌شود.

نمودارهای تغییرات شاخص یکنواختی دما و انحراف معیار دما روی سطح خارجی دیوار با نسبت هم‌ارزی برای سرعت ۹ متر بر ثانیه در شکل ۹- ب رسم شده‌اند. رفتار این نمودارها در حالت کلی افزایشی-کاهشی است. علت آن موقعیت قرار گرفتن ناحیه احتراق در محفظه احتراق و کم و زیاد شدن اثر بازچرخش گرما است. در واقع افت‌وخیزهای نمودارهای تغییرات دمای جریان در امتداد مسیرهای رفت و برگشت تحت تأثیر بازچرخش گرما و موقعیت ناحیه احتراق است. از آنجایی که دمای دیوار تحت تأثیر دمای جریان‌های رفت و برگشت است، افت‌وخیزها و غیریکنواختی‌های دمای جریان‌های رفت و برگشت روی توزیع دما روی دیوار تأثیر می‌گذارد. با توجه به شکل ۹ - ب، شاخص یکنواختی دما با افزایش نسبت هم‌ارزی از $0/4$ به $0/6$ کاهش و سپس با افزایش مقدار نسبت هم‌ارزی به $0/8$ و ۱ افزایش می‌یابد. در نسبت هم‌ارزی ۱ شاخص یکنواختی دما

بیشترین مقدار را دارد. در نتیجه توزیع دما روی دیوار خارجی یکنواخت تر است. با توجه به نمودار، بیشترین غیریکنواختی دما مربوط به نسبت هم‌ارزی ۰/۶ است. در ارتباط با انحراف معیار دما، در نسبت هم‌ارزی ۱ کمترین مقدار و در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ بیشترین مقدار را دارد. در نتیجه در نسبت هم‌ارزی ۱ دمای سایر نقاط سطح خارجی دیوار کمترین انحراف یا اختلاف را نسبت به دمای میانگین دیوار دارند. نمودار تغییرات بازده با نسبت هم‌ارزی در شکل ۹ - ج نشان داده شده است.

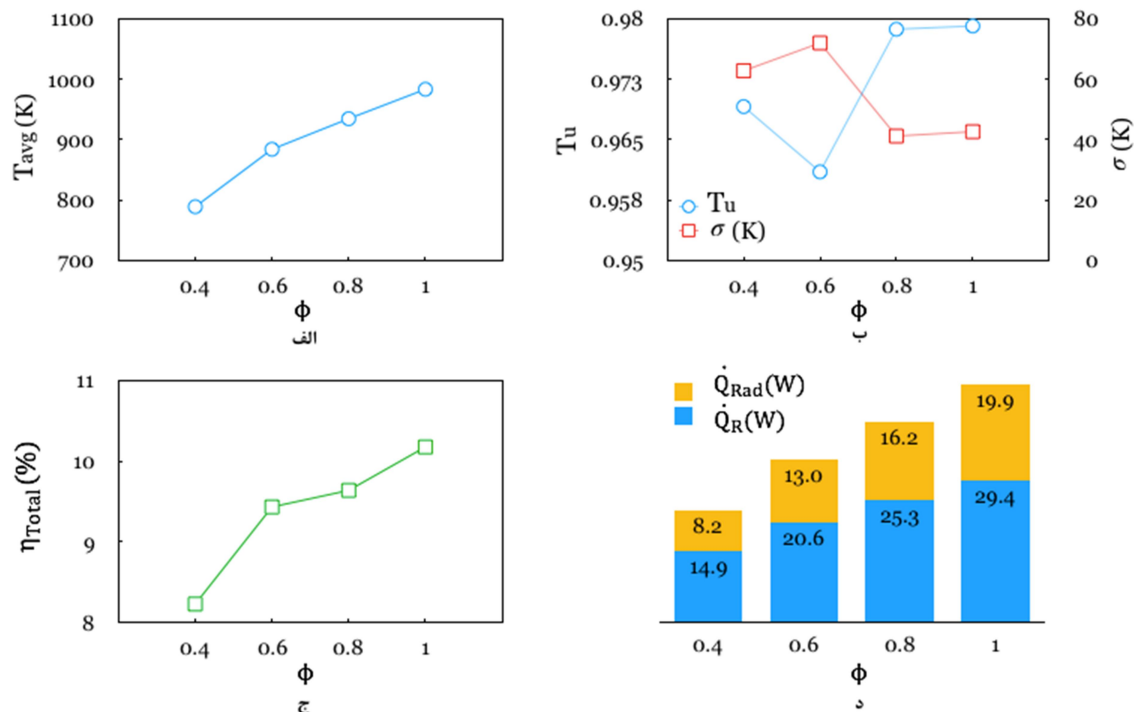


Figure 9- Diagram of changes in average temperature (a), uniformity index and deviation (b), total efficiency (c), and ratio of heat release rate and thermal radiation (d) equivalence ratio at $U_{inlet} = 9 \text{ m/s}$ and $k = 12 \text{ W/m.K}$

شکل ۹- نمودار تغییرات دمای میانگین سطح خارجی (الف)، شاخص یکنواختی و انحراف معیار دمای سطح خارجی دیوار (ب)، بازده کل (ج) و نسبت گرماهای آزاد شده و تابشی (د) با نسبت هم‌ارزی در سرعت ورودی ۹ متر بر ثانیه و ضریب رسانش گرمای دیوار ۱۲ وات بر مترکلوین

در حالت کلی تغییرات بازده با نسبت هم‌ارزی اکیداً صعودی است. در نسبت هم‌ارزی ۰/۶ علی‌رغم اینکه انحراف معیار بیشتر و شاخص یکنواختی دما کمتر از نسبت هم‌ارزی ۰/۴ هستند ولی بازده افزایش می‌یابد. بنابراین در اینجا به نظر می‌رسد که تأثیر افزایش دمای میانگین بیشتر است. زیرا با توجه به نمودار آن (شکل ۹ - الف) دمای میانگین افزایشی حدود ۱۰۰ کلوین داشته و این افزایش، بیشترین مقدار در طول مسیر تغییرات دمای میانگین است. همان‌گونه که انتظار می‌رود بیشترین بازده در نسبت هم‌ارزی ۱ ایجاد می‌شود. زیرا در نسبت هم‌ارزی ۱ دمای میانگین و شاخص یکنواختی دما بیشترین مقدار و انحراف معیار کمترین مقدار را دارند. نمودار شکل ۹ - ج نشان می‌دهد راندمان سیستم در نسبت هم‌ارزی ۱ می‌تواند به مقدار ۱۰/۱۸ درصد افزایش پیدا کند و این از این جهت مهم است در پژوهش‌ها و مطالعات پیشین در این زمینه، دستیابی به بازده کل بالای ۱۰ درصد (با در نظر گرفتن بازده تبدیل ترموفتولتاییک برابر با ۱۵ درصد) گزارش نشده است. ضمن اینکه با توجه به نمودارهای شکل ۶ دمای جریان مسیره‌های رفت و برگشت در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۸ و ۱ از ابتدای نیم‌دور سوم مسیر رفت

به هم می‌رسند و پس از آن، فاصله نمودارهای دما از هم کمترین مقدار را دارد. این موضوع مجدداً بر این نکته تأکید می‌کند که هرچه انتقال گرما میان مسیرهای رفت و برگشت مطلوب‌تر (بهینه‌تر) باشد، بازده افزایش می‌یابد.

شکل ۹ - د تغییرات نسبت گرمای تابشی به گرمای آزاد شده را برای سرعت ورودی ۹ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. با افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۴ به ۰/۶ آهنگ گرمای تابشی حدود ۵۸/۵ درصد و آهنگ گرمای آزاد شده حدود ۳۸ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش نسبت هم‌ارزی از ۰/۶ به ۰/۸ آهنگ گرمای تابشی حدود ۲۴/۶ درصد و آهنگ گرمای آزاد شده حدود ۲۳ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین، برخلاف سرعت ورودی (شکل ۸ - د)، رشد مقدار آهنگ گرمای تابشی با نسبت هم‌ارزی از آهنگ گرمای آزاد شده بیشتر است. بنابراین، بازده با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۰ تغییرات دمای میانگین سطح خارجی، شاخص یکنواختی، انحراف معیار و بازده کل با ضریب رسانش گرمایی دیوار در سرعت ورودی ۹ متر بر ثانیه و نسبت هم‌ارزی ۰/۶ نشان داده شده است. شکل ۱۰ - الف نشان می‌دهد که افزایش رسانش گرمایی دیوار از ۱ تا ۱۲ وات بر مترکلین باعث افزایش دمای میانگین سطح خارجی دیوار شده ولی افزایش آن به ۱۲ وات بر مترکلین باعث کاهش ناچیز در دمای میانگین سطح خارجی دیوار شده است. دمای میانگین سطح خارجی تأثیر قابل‌توجهی در آهنگ تابش گرمایی دیوار دارد. شکل ۱۰ - الف نشان می‌دهد افزایش ضریب رسانش گرمایی دیوار تأثیر مطلوبی روی یکنواختی دمای سطح خارجی دیوار دارد. زیرا با افزایش ضریب رسانش گرمایی دیوار شاخص یکنواختی افزایش پیدا می‌کند. مطابق شکل ۱۰ - ب انحراف معیار دمای دیوار نیز کاهش پیدا می‌کند. در واقع با افزایش رسانایی گرمایی دیوار، گرمای آزاد شده احتراق با سهولت بیشتری در دیوار توزیع می‌شود و در نتیجه گرادپان‌های دما روی سطح خارجی دیوار کاهش می‌یابند.

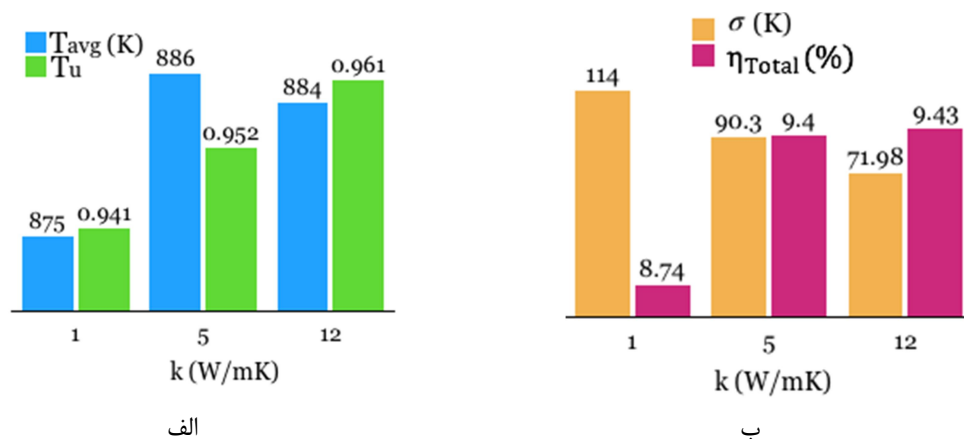


Figure 10: Variations of average outer wall temperature, index of uniformity (a), deviation, and total efficiency (b) with wall thermal conductivity at $U_{inlet} = 9 \text{ m/s}$ and $\phi = 0.6$

شکل ۱۰ - تغییرات دمای میانگین سطح خارجی، شاخص یکنواختی دما (الف)، انحراف معیار و بازده کل (ب) با ضریب رسانش گرمایی دیوار در سرعت ورودی ۹ متر بر ثانیه و نسبت هم‌ارزی ۰/۶

بازده کل مطابق شکل ۱۰ - ب با افزایش رسانایی گرمایی دیوار افزایش می‌یابد. هرچند که افزایش بازده کل با افزایش رسانایی گرمایی دیوار از ۵ به ۱۲ وات بر مترکلین تقریباً ناچیز است. علت افزایش بازده کل با رسانایی گرمایی بهبود در شاخص‌های مربوط به دما شامل یکنواختی و انحراف معیار است. یکنواختی دما افزایش و انحراف معیار کاهش می‌یابند. همچنین، مطابق شکل ۷ انتقال گرما بین جریان‌های مسیر رفت و برگشت با افزایش ضریب رسانش گرما بهینه‌تر انجام می‌شود. از مقایسه میزان تأثیر رسانش گرمایی دیوار با سرعت ورودی و نسبت هم‌ارزی، مشخص می‌شود که رسانش گرمایی دیوار تنها پارامتری است که افزایش آن روی مشخصه‌های دمای دیوار شامل یکنواختی، انحراف معیار و همچنین بازده کل

تأثیر مثبت دارد. درحالی که افزایش سرعت متوسط فقط روی دمای میانگین تأثیر مثبت دارد. ضمن اینکه افزایش نسبت هم‌ارزی علی‌رغم داشتن تأثیر مثبت روی دمای میانگین، تأثیر افزایشی-کاهشی روی یکنواختی دما دارد. در جدول ۱ بیش‌ترین بازده کل میکرومحفظه حلزونی که مربوط به سرعت ورودی ۱۰ متر بر ثانیه، نسبت هم‌ارزی ۱ و ضریب رسانش گرمایی دیوار ۱۲ وات بر مترکلون است با بیشترین مقدار بازده مربوط به سایر میکرومحفظه‌های احتراق مقایسه شده است. این جدول نشان می‌دهد از نظر بازده، میکرومحفظه‌های حلزونی توانایی رقابت با سایر میکرومحفظه‌های احتراق را دارا هستند. همچنین به نظر می‌رسد که میکرومحفظه‌های حلزونی از نظر بازده برای سوخت هیدروژن مناسب‌تر هستند.

جدول ۱- مقایسه بیشترین بازده میکرومحفظه حلزونی با سایر میکرومحفظه‌های احتراق

Table 1- Comparison of maximum total efficiency of swiss-roll micro combustion chamber with other micro combustion chambers

مرجع	نوع سوخت	بازده کل (درصد)
مطالعه حاضر	هیدروژن	۱۰/۱۸
کیان و همکاران [۱۹]	هیدروژن	۹/۴۱
محمدپور و همکاران [۳۰]	هیدروژن - آمونیاک	۸/۲
علی‌پور و سعیدی [۳۱]	هیدروژن	۶/۳
علی‌پور و همکاران [۱۸]	هیدروژن	۲/۶۴
اختر و همکاران [۳۲]	هیدروژن	۵/۳۳
زو و همکاران [۳۳]	هیدروژن	۳/۵۴

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر احتراق پیش‌آمیخته هیدروژن - هوا در یک میکرومحفظه حلزونی دو مسیره با مقطع دایره‌ای با انگیزه استفاده در سیستم‌های میکروترموفتوولتاییک بررسی شده است. عملکرد گرمایی میکرومحفظه با محاسبه دمای جریان، پارامترهای مربوط به توزیع دما روی سطح خارجی دیوار و بازده سیستم ارزیابی و نتایج به شرح زیر حاصل شدند.

بررسی سرعت ورودی نشان داد که با افزایش آن انتقال گرما بین جریان‌های مسیره‌های رفت و برگشت از حالت بهینه خود فاصله می‌گیرد و روی توزیع دما در دیوار تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان دادند که اگرچه با افزایش سرعت متوسط جریان ورودی میانگین دمای دیوار افزایش می‌یابد ولی توزیع دمای دیوار غیریکنواخت‌تر خواهد شد و اختلاف دمای سایر نقاط از دمای میانگین بیشتر خواهد شد. نتیجه آن کاهش بازده کل سیستم خواهد بود. بنابراین، در محدوده سرعت‌های متوسط ورودی مورد بررسی (۶ تا ۱۵ متر بر ثانیه)، افزایش سرعت ورودی تأثیر نامطلوبی روی عملکرد گرمایی محفظه احتراق گذاشت. نتایج نشان دادند که در یک سرعت ورودی ثابت، افزایش نسبت هم‌ارزی از مقدار ۰/۴ تا ۱ موجب بهینه‌تر شدن انتقال گرما میان جریان‌های مسیره‌های رفت و برگشت می‌شود. همچنین مقدار میانگین دمای سطح خارجی دیوار و بازده کل افزایش می‌یابند. نتایج اگرچه رفتار افزایشی-کاهشی را برای شاخص یکنواختی و انحراف معیار دمای دیوار ثبت کردند ولی در نسبت‌های هم‌ارزی بالا، دیوار دمای یکنواخت‌تری به نمایش گذاشت.

در مورد رسانش گرمایی دیوار مشخص شد که افزایش آن از مقدار ۱ به ۱۲ وات بر مترکلون اثر مطلوب روی همه پارامترهای مرتبط با دما و بازده دارد. درکل میکرومحفظه‌های حلزونی در سرعت‌های متوسط ورودی پایین، نسبت‌های هم‌ارزی بالا و ضرایب رسانش گرمایی دیوار در محدوده ۱۲ وات بر مترکلون بهترین عملکرد حرارتی را با توجه به نتایج دارا هستند. بیشترین بازده کل سیستم در سرعت ورودی ۶ متر بر ثانیه، نسبت هم‌ارزی ۱ و ضریب رسانش گرمایی دیوار ۱۲ وات

بر مترکلون برابر با مقدار ۱۰/۱۸ درصد حاصل شد. این مقدار حاصل شده برای بازده کل از این جهت حائز اهمیت است که در پژوهش‌های مرتبط با این زمینه، بازده کل بیشتر از مقدار ۱۰ درصد (با در نظر گرفتن بازده تبدیل ترموفتولتاییک برابر با ۱۵ درصد) گزارش نشده است. بنابراین، میکرومحفظه حلزونی ارائه شده در این مطالعه پتانسیل قابل قبولی برای رقابت با سایر میکرومحفظه‌های احتراق (از لحاظ بازده) برای استفاده در سیستم‌های میکروتروموفتولتاییک دارد.

منابع

- [1] D.S. S Ishizuka, D Dunn-Rankin, R W Pitz, R J Kee, Y Zhang, H Zhu, T Takeno and M Nishioka, Tubular Combustion, Momentum Press, New York, 2013. <https://doi.org/10.5643/9781606503058>.
- [2] W.M. Yang, S.K. Chou, C. Shu, H. Xue and Z.W. Li, "Development of a prototype micro-thermophotovoltaic power", J. Phys. D. Appl. Phys. vol. 37, pp. 1017–1020, 2004. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/7/011>.
- [3] G. Pizza, C.E. Frouzakis, J. Mantzaras, A.G. Tomboulides and K. Boulouchos, "Dynamics of premixed hydrogen/air flames in microchannels, Combust". Flame. vol. 52, no. 3, pp. 433–450, feb 2008. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.07.013>.
- [4] A. Alipoor, K. Mazaheri and A. Shamooinpour, "Dynamics of lean hydrogen/air flame regimes in micro scale combustion", Modares Mech. Eng. vol. 14, no.3, pp. 94–102, 2014.
- [5] A. Alipoor and K. Mazaheri, "Numerical Study of the Inlet Velocity Effect on Characteristics of Repetitive Extinction-Ignition Dynamics for Lean Premixed Hydrogen-Air Combustion in a Heated Micro Channel", Fuel Combust. vol. 8, no. 2, pp. 33–54, 2015. (in Persian).
- [6] A. Alipoor and P. Abbaspour, "Characteristic of Premixed Hydrogen/ Air Tubular Flames in Microcombustor: Effects of Stimulated and Unstimulated Inlet Conditions on Flame Dynamics", Int. J. Energy Res. vol. 2024, pp.1-26, may 2024. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2024/3819821>.
- [7] S. Biswas, P. Zhang, H. Wang and L. Qiao, "Propagation and extinction behavior of methane/air premixed flames through straight and converging-diverging microchannels", Appl. Therm. Eng. vol. 148, pp. 1395–1406, feb 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.049>.
- [8] D.G. Norton and D.G. Vlachos, "Combustion characteristics and flame stability at the microscale: A CFD study of premixed methane/air mixtures", Chem. Eng. Sci. vol. 58, no. 21, pp. 4871–4882, nov 2003. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2002.12.005>.
- [9] J. Zarvandi, S. Tabejamaat and M. Baigomhammadi, "Numerical Simulation of Effective Parameters on the Stability of Stoichiometric CH₄/Air Premixed Combustion in a Micro-combustion Chamber", Fuel Combust. vol. 3, no.2, pp. 31-45, 2010. (in Persian).
- [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. Therm. Eng. vol.22, no.16, pp. 1777–1787, nov 2002. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00113-8).
- [11] H. Faramarzpour, K. Mazaheri and A. Alipoor, "Effect of backward facing step on radiation efficiency in a micro combustor", Int. J. Therm. Sci. vol. 132, pp. 129–136, oct 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.06.002>.
- [12] P. Abbaspour, A. Alipoor and Y. Tamsilian, "Investigation of converging–diverging angle effect on combustion characteristics of premixed hydrogen–air in converging–diverging microtubes", Fuel Combust. vol. 13, pp. 27–43, 2020. (in Persian).
- [13] A. Fan, J. Wan, K. Maruta, H. Yao and W. Liu, "Interactions between heat transfer, flow field and flame stabilization in a micro-combustor with a bluff body", Int. J. Heat Mass Transf. vol.66, pp. 72–79, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.024>.
- [14] M. Ansari and E. Amani, "Micro-combustor performance enhancement using a novel combined baffle-bluff configuration", Chem. Eng. Sci. vol.175, pp. 243–256, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.10.001>.
- [15] Q. Peng, E. Jiaqiang, 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 steps and wall thicknesses", Energy.vol. 173, pp. 540–547,2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.093>.
- [16] 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 Convers. Manag. vol.160, pp. 1–13, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.033>.
- [17] P. Abbaspour and A. Alipoor, "Combustion characteristics of premixed H₂-air in wavy microchannels for

- micro thermophotovoltaic applications", in: Ninth Fuel Combust. Conf. Iran, Shiraz, Iran, 2022. http://fcci2022.shirazu.ac.ir/files_site/files/r_51_220117131412.pdf.
- [18] A. Alipoor, A. Kakhoda and P. Abbaspour, "Numerical study of hydrogen-air premixed mixture in radial micro combustors for usage in a micro thermophotovoltaic system", *Appl. Energy Convers.* vol. 1, pp. 7–16, 2022. <https://doi.org/https://doi.org/10.22077/AEC.2021.3910.1001> (in Persian).
- [19] 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. Therm. Eng.* vol. 174, p. 115281, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115281>.
- [20] P.D. Ronney, "Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors", *Combust. Flame.* vol. 135, pp. 421-439, 2003. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2003.07.003>.
- [21] P.O. L. Sitzki, K. Borer, Wussow, E. Schuster and P.D. Ronney, "Combustion in microscale heat-recirculating burners", *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut.* 2001.
- [22] C.H. Kuo and P.D. Ronney, "Numerical modeling of non-adiabatic heat-recirculating combustors", *Proc. Combust. Inst.* vol. 31 II . pp. 3277–3284, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.08.082>.
- [23] N. Il Kim, S. Aizumi, T. Yokomori, S. Kato, T. Fujimori and K. Maruta, "Development and scale effects of small Swiss-roll combustors", *Proc. Combust. Inst.* 31 II, 3243–3250, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.08.077>.
- [24] J. Li, B. Zhong, N. Wang and Z. Wei, "Experimental and numerical studies on methane/air combustion in a micro swiss-roll combustor", *Combust. Sci. Technol.* vol. 182, pp. 1707–1717, 2010. <https://doi.org/10.1080/00102202.2010.497385>.
- [25] S. Wang, Z. Yuan and A. Fan, "Experimental investigation on non-premixed CH₄/air combustion in a novel miniature Swiss-roll combustor", *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.* vol. 139, pp. 44–50, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.03.019>.
- [26] L. Ma, Q. Fang, C. Zhang and G. Chen, "A novel Swiss-roll micro-combustor with double combustion chambers: A numerical investigation on effect of solid material on premixed CH₄/air flame blow-off limit", *Int. J. Hydrogen Energy.* vol. 46, pp. 16116–16126, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.118>.
- [27] ANSYS FLUENT Theory Guide 19.2 Release, ANSYS Inc., USA, (2018).
- [28] 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.* vol. 192, pp.134–145, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.097>.
- [29] P. Abbaspour and A. Alipoor, "Numerical study of wavy-wall effects on premixed H₂ / air flammability limits , propagation modes , and thermal performance of micro combustion chambers", *Appl. Energy.* vol. 359, p.122727, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122727>.
- [30] A. Mohammadpour, K. Mazaheri, A. Alipoor and M. Mohammadpour, "Effect of oxidizer dilution on thermophotovoltaic performance of premixed ammonia/hydrogen/air combustion in radial micro-combustor", *Fuel.* vol, 331, p. 125874, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125874>.
- [31] A. Alipoor and M.H. Saidi, "Numerical study of hydrogen-air combustion characteristics in a novel micro-thermophotovoltaic power generator", *Appl. Energy.* vol. 199, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.027>.
- [32] S. Akhtar, J.C. Kurnia and T. Shamim, "A three-dimensional computational model of H₂-air premixed combustion in non-circular micro-channels for a thermo-photovoltaic (TPV) application", *Appl. Energy.* vol. 152, pp. 47–57, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.068>.
- [33] W. Zuo, Z. Wang, J. E, Q. Li, Q. Cheng, Y. Wu and K. Zhou, "Numerical investigations on the performance of a hydrogen-fueled micro planar combustor with tube outlet for thermophotovoltaic applications", *Energy.* vol. 263 p.125957, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125957>.

English Abstract

Thermal Performance Analysis of a Swiss-roll Micro Combustion Chamber for Micro Thermophotovoltaic Applications

Alireza Alipoor^{1*} and Pouyan Abbaspour²

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, a.alipoor@shirazu.ac.ir

2- M.Sc. of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, p-abbaspour@stu.scu.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2024/06/11, Received in revised form: 2024/07/10, Accepted: 2024/07/22)

In the present study, the combustion of hydrogen-air premixed mixture in a circular cross-section Swiss-roll micro combustion chamber, designed as a heat source for micro thermophotovoltaic systems, has been investigated. The governing equations were solved using a three-dimensional steady state CFD method, considering detailed chemical kinetics and conjugate heat transfer. The parameters examined in this study include the average inlet velocity, equivalence ratio, and wall thermal conductivity. The thermal performance of the combustion chamber was evaluated by calculating the temperature of the inlet and outlet paths, wall temperature uniformity index, and efficiency. Results indicated that increasing the average inlet velocity leads to a deviation from the optimal heat exchange between the inlet and outlet paths and affects the wall temperature distribution. Although the average temperature of the outer wall increases with inlet velocity, the temperature distribution becomes more non-uniform. This increase in the non-uniformity reduces efficiency with higher inlet velocities. The study on the effect of the equivalence ratio showed that increasing it optimizes heat exchange between the inlet and outlet paths and enhances system efficiency. The impact of increasing the wall thermal conductivity up to 12W/m.K was analyzed, showing a positive influence on all parameters related to the thermal performance of the combustion chamber and efficiency. The maximum total efficiency was calculated to be 10.18%, demonstrating that Swiss-roll micro combustion chambers can compete with other micro combustor geometries for use in micro thermophotovoltaic systems.

Keywords: Combustion, Hydrogen, Swiss-roll micro combustor, Micro thermophotovoltaic, Efficiency

Filename: 1397(layout).docx
Directory: C:\Users\sajede\Documents
Template: C:\Users\sajede\AppData\Roaming\Microsoft\Templates\Normal.dot
m
Title: افزایش نگرانیهای محیط زیستی در چند دههٔ اخیر باعث توجه اساسی به تشکیل و
انتشار آلوده‌کننده‌های محیط زیست و نحوهٔ کنترل آنها شده است
Subject:
Author: arash
Keywords:
Comments:
Creation Date: 8/10/2024 1:10:00 PM
Change Number: 17
Last Saved On: 8/13/2024 10:42:00 PM
Last Saved By: sajede
Total Editing Time: 42 Minutes
Last Printed On: 8/13/2024 10:43:00 PM
As of Last Complete Printing
Number of Pages: 21
Number of Words: 14,712 (approx.)
Number of Characters: 83,862 (approx.)