

شبیه‌سازی عددی میکرواحتراق پیش مخلوط متان- هوا

احمدرضا رحمتی^{۱*} و سید عبدالمهدی هاشمی^۲، محمد صابر خسروی^۳^۱استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان^۲دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان^۳دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

*مسئول مکاتبات: ar_rahmati@kashanu.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

میکرواحتراق
شرط مرزی لغزشی
پرش دمایی
شبیه‌سازی عددی

در سال‌های اخیر با توجه به گسترش روزافزون کاربرد احتراق در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی جهت تولید نیروی پیشران در ابعاد میکرو، فرآیند احتراق در ابعاد میکرو مورد توجه فراوان قرار گرفته است. با توجه به اینکه بررسی این فرآیند در ابعاد میکرو بصورت تجربی بسیار مشکل است، در کار حاضر جهت درک مناسب از اینگونه فرآیندها از شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. در این تحقیق به شبیه‌سازی عددی فرآیند احتراق جریان کاملاً آرام و استوکیومتریکی پیش اختلاط متان-هوا در یک محفظه‌ی احتراق دو بعدی در ابعاد میکرو، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت پرداخته شده است. هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر اعمال شرایط مرزی لغزشی و پرش دمایی، بر روی میدان احتراق است. ابتدا در شرایط بدون لغزش، اعتبارسنجی صورت گرفته و سپس با اعمال شرایط مرزی لغزشی و پرش دمایی، تاثیر آن بر روی توزیع دما و غلظت گونه‌های احتراق، بررسی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد، که اعمال این شرایط مرزی، تاثیر محسوسی در احتراق در ابعاد میکرو نداشته و تنها باعث تغییر اندکی (درصد اختلاف توزیع سرعت حداکثر ۱/۳ درصد و درصد اختلاف توزیع دما حداکثر ۳/۳ درصد) در مکان تشکیل شعله می‌گردد.

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۹/۲۰

۱ مقدمه

حمل است. به دلیل چگالی انرژی بالای هیدروکربن‌ها (0.5 Mj.kg^{-1})، محفظه‌های احتراق در ابعاد میکرو، ممکن است در نهایت، جایگزین باتری‌های ناسازگار با محیط زیست و گران قیمت لیتیوم در لب‌تاپ‌ها، تلفن‌های همراه و دیگر دستگاه‌های ارتباطی شوند [۵]. علاوه بر این، به دلیل بالا بودن ذاتی ضریب انتقال حرارتی سیستم‌های در مقیاس میکرو، دمای احتراق کمتری را می‌توان پیش‌بینی نمود، که منجر به تشکیل حداقل NO_x می‌شود [۶]. به همین دلیل محفظه‌های احتراق میکرو می‌توانند یک منبع حرارتی مناسبی برای واکنش‌های گرماگیر مانند اصلاح بخار و تجزیه آمونیاک و در یکپارچه‌سازی سیستم‌های میکروشمیایی، برای تولید هیدروژن برای کاربردهای سلول‌های سوختی هستند [۷]. آزمایشات انجام شده توسط داوی و در ادامه‌ی آن توسط گروه‌های بسیار دیگری، نشان می‌دهد، که انتشار شعله در شکاف‌های مقیاس زیر میلیمتری غیر ممکن است. با توجه به هندسه، ترکیب و نرخ جریان، معمولاً شعله‌های متان-هوا، زمانی که در محفظه‌هایی با ابعاد ۱ الی ۲ میلیمتری محدود می‌شوند، تمایل به خاموشی دارند [۸]. شعله‌ها در این ابعاد کم به دلیل، دو مکانیسم اولیه، که خاموشی گرمایی و شعاعی نامیده می‌شود، خاموش می‌گردند [۹]. خاموشی گرمایی، زمانی رخ می‌دهد که گرمایی کافی از دیوار دفع می‌گردد و احتراق نمی‌تواند خود به خود پایدار باشد. خاموشی شعاعی از طریق نفوذ شعاعی، روی دیواره‌های سیستم و ترکیب پس از آن رخ می‌دهد، که منجر به عدم همگنی شیمیایی می‌شود. به دلیل ابعاد کوچک این گونه از سیستم‌ها، آنها مستعدتر برای ابتلا به هر دو مکانیزم خاموشی، به دلیل نسبت سطح به حجم بالا هستند. به عنوان مثال،

امروزه با توجه به بهبود تکنولوژی ساخت و ماشینکاری قطعات در ابعاد کوچک، تجهیزات میکروالکترومکانیکی و مکانیکی^۱ رشد چشمگیری پیدا کرده‌اند، لذا تحقیق پیرامون تأمین انرژی مناسب در این تجهیزات کوچک، افزایش یافته است. منابع تولید توان الکتریکی مرسوم، مانند باتری، دارای وزن بالایی بوده، که مطلوب اینگونه تجهیزات نیست [۱، ۲]. مطالعه‌ی احتراق در مقیاس کوچک، به دلیل این حقیقت که سوخت‌های هیدروکربنی می‌توانند ۵۰ الی ۱۰۰ برابر، بیشتر از یک باتری با همان وزن، انرژی ذخیره کنند، اهمیت پیدا کرده است. این موضوع گرایش‌های زیادی را در پیدا کردن راه‌های مؤثر، برای رهاسازی این انرژی و تبدیل آن به انرژی الکتریکی، در یک سیستم با ابعاد میکرومتری ایجاد کرده است [۳]. محفظه‌های احتراقی در ابعاد میکرومتری، تفاوت‌های اساسی متعددی در مقایسه با احتراق، در مقیاس معمولی دارند. چون هر قدر ابعاد محفظه کاهش می‌یابد، نسبت سطح به حجم افزایش می‌یابد، که این باعث افزایش نسبت تلفات حرارتی به تولید انرژی می‌گردد. موتورهای احتراقی هر قدر کوچکتر گردند، ناکارآمدتر می‌شوند، چرا که بیشتر فرآیند اتلاف انرژی مثل اصطکاک، تبادل گرما و تشعشع با سطح متناسب بوده، در حالی که تولید انرژی، متناسب با حجم بوده و کاهش ابعاد محفظه‌ی احتراق، نسبت سطح به حجم را افزایش می‌دهد و با کوچکتر شدن موتور، مسئله‌ی مهم، فرآیند پایدارسازی شعله می‌شود [۴]. مشعل‌های در ابعاد میکرو، یک ابزار قدرتمند برای تولید انرژی قابل

¹Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)

برنر و شرایط عملکردی، روی مشخصه‌های احتراقی و حالت پایا، پایداری شعله‌ی خود پایای ترکیب پروپان- هوا بررسی کردند. آنها گرادیان‌های بزرگی برخلاف اندازه‌ی کوچک برنرها مشاهده نمودند. آنها به این نکته پی بردند، که هدایت گرمایی دیواره‌ها در پایداری شعله سیستم نقش حیاتی دارد و دیواره‌ها عامل اصلی انتقال حرارت به جریان بالادست و اتلاف حرارتی خارجی است. همچنین آنها بیان داشتند، که ابعاد میکروبرنرها، اثر قوی در پایداری گرمایی دارند و نیز شعله احتراق پروپان، در محدوده‌ی بیشتری از ضریب انتقال حرارت پایدار هستند.

لیتس و کادو [۱۶] در سال ۲۰۰۵، بیان داشتند، که عملکرد محفظه‌های احتراقی در مقیاس میلیمتری، برای سیستم‌های قدرت و نیروی محرکه کوچک، به شدت تحت تأثیر مبادله حرارت در ساختار محفظه است. بر این اساس، ایشان یک مدل یک بعدی با شیمی کامل و به همراه مبادله حرارت، در طول دیواره محفظه، توسعه دادند. آنها اثر انتقال حرارت محوری، از بعد از شعله، به قبل از شعله، از طریق هدایت دیواره‌ها در یک محفظه میکروکانال با تقارن صفحه‌ای را بررسی کردند. شبیه‌سازی نشان می‌دهد، که محدوده‌ی پایداری عریض انتقال حرارت محوری، نرخ سوزش را افزایش و ساختار کوچکتر محفظه‌های احتراق، چگالی قدرت بالا را ممکن می‌سازد. انتقال حرارت محوری، مزیت عملکرد، در فشارهای بالا را نیز بهبود می‌بخشد. چگالی توان ماکزیم تمایل دارد، تا با افزایش فشار افزایش یابد، درحالی‌که طول میکروکانال و ارتفاع مرتبط، تمایل به کاهش دارند. کیسر و والکوس [۱۷] در سال ۲۰۰۷، سعی داشتند، به این سوال مهم پاسخ دهند، که اثر طول راکتور، ضخامت دیواره و عرض شکاف کانال راکتور، برای داشتن یک احتراق همگن پایدار، در کانال‌هایی با صفحات موازی چیست. ایشان ابتدا مشخصه‌های شعله و پایداری شعله در محفظه احتراقی در ابعاد میکرو و مزو (بزرگتر از ۱ میلیمتر) را مطالعه کرده و نقش چرخش گرما و اتلاف حرارتی را روی مکانیسم خاموشی شعله و خفگی شعله مورد بررسی قرار دادند. ایشان بیان داشتند، که افزایش طول راکتور، منجر به کوچک شدن ناحیه‌ی احتراق خود پایدار، به دلیل افزایش اتلاف حرارتی از طریق ساختار جامد راکتور می‌شود. آنها یک شکاف عرضی بهینه، برای ایجاد بزرگترین ناحیه‌ی احتراق خود پایا، بدست آوردند. آنها همچنین بیان داشتند، که اثر اندازه برای احتراق متان، نسبت به احتراق پروپان، قوی‌تر است.

یکی از راهکارهای ارائه شده جهت افزایش محدوده‌ی پایداری شعله و جلوگیری از خروج شعله، استفاده از مجراهای واگرا است. زو و جو [۱۸] در سال ۲۰۰۷، انتشار ناپایا و شبه پایای شعله پیش مخلوط متان- هوا را در کانال واگرا با ابعاد میلیمتری، به صورت آزمایشگاهی و تئوری مورد بحث قرار دادند. تاکید کار آنها بر روی اعمال سطح مقطع متغیر و اثر متقابل دیواره- شعله، روی انتقال شعله بین رژیم‌های مختلف و شروع بی ثباتی شعله بود. همچنین برای اولین بار، شعله‌های چرخشی، در یک محفظه با ابعاد میلیمتری، برای ترکیب متان- هوای غنی و رقیق در یک رنج وسیعی از نسبت هم‌ارزی را مشاهده نمودند. آنها بیان داشتند، شعله‌های چرخشی در جهت و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت، با یک احتمال چرخش دارند. نتایج نشان می‌دهد، که برای یک نسبت هم ارزی مشخص، یک نرخ جریان

افزایش انتقال حرارت از شعله به دیوار و افزایش شعاعی انتقال جرم را در اینگونه سیستم‌ها شاهد هستیم. خاموشی وزشی^۱ و خفگی، دو نوع خاموشی گرمایی هستند. خفگی هنگامی اتفاق می‌افتد، که گرمای تولید شده به سبب واکنش، نتواند بر گرمای از دست رفته به محیط غلبه کند. علاوه بر خاموشی شعله، خاموشی وزشی، می‌تواند زمانی که سرعت خروجی برنر، از سرعت سوزش شعله بیشتر شود، رخ دهد [۱۰].

تا سالها تصور انتشار شعله در ابعاد کوچکتر از یک میلیمتر، ناممکن به نظر می‌رسید، تا اینکه ماسل و شاتون [۱۱] در سال ۲۰۰۱ موفق به بررسی انتشار شعله متان- هوا در ابعاد کمتر از یک میلیمتر شدند. پژوهشگران توانسته‌اند، جنس دیواره محفظه‌های احتراق را به گونه‌ای بسازند، که رادیکال‌ها در آن نفوذ نکنند. آزمایش‌های اخیر بیان می‌کند، که پایداری شعله در میکروبرنرها از طریق اصلاح سطح مناسب ماده‌ی سرامیک، به منظور محدود کردن اتلافات شعاعی و عایق کردن برای محدود کردن اتلافات حرارتی، به کار برده می‌شود [۱۲]. به تازگی شبیه‌سازی‌های دو بعدی با استفاده از تقریب لایه مرزی در میکروکانال‌های استوانه‌ای، با استفاده از شیمی فاز گاز دقیق و شیمی خاموشی رادیکالی، به منظور شبیه‌سازی دیواره‌های چسبنده‌ی مناسب و اتلاف حرارت‌های خارجی مناسب، که منجر به انتشار شعله می‌گردد، انجام شده‌است. تقریب لایه مرزی، گونه‌های محوری و دیفیوژن انرژی را نادیده می‌گیرد. در این شبیه‌سازی سیستم جرقه‌زنی از طریق پیش گرمایش مخلوط متان- هوا و انتشار احتراق خود پایدار، نمی‌تواند نشان داده شود [۱۳].

ریموندو و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۳، به شبیه‌سازی سهموی، انتشار شعله در یک میکرو کانال به صورت دو بعدی و همراه با انتقال چند جزئی، شیمی فاز گاز، دفع حرارت به محیط اطراف، باز تولید رادیکال در دیواره، لغزش دما و لغزش غلظت گونه‌های شیمیایی در دیواره پرداختند. آنها بیان داشتند، که اثر لغزش‌های دما و سرعت برای میکروکانال‌ها قابل صرف نظر کردن است. همچنین ایشان یک مقایسه‌ای بین شبیه‌سازی سهموی و بیضوی ارائه دادند. نورتن و والکوس [۱۴] در سال ۲۰۰۳، به بررسی عددی مدل بیضوی دو بعدی میکرواحتراق متان- هوا، به منظور بررسی اثر ابعاد محفظه، هدایت گرمایی و ضخامت دیواره، اتلاف حرارت خارجی، شرایط عملکردی روی مشخصه‌های احتراق و پایداری شعله، با استفاده از نرم‌افزار فلونت، پرداختند. ایشان نتیجه گرفتند که هدایت گرمایی و ضخامت دیواره، با توجه به اینکه انتقال حرارت جریان بالادست را تعیین می‌کنند و لذا بر سوزش و پایداری شعله اثر دارند، از جمله پارامترهای مهم محسوب می‌شوند. همچنین ایشان نواحی واکنش را به سه ناحیه تقسیم‌بندی کرده و مشخصات هر کدام را به همراه نرخ واکنش ارائه نمودند. علاوه بر این تأثیر میزان دبی جریان را بر انتقال حرارت و پایداری شعله نشان دادند. ایشان اثر ضریب انتقال حرارت خارجی و هدایت دیواره بر روی خاموشی و خفگی در شعله را نیز بررسی کرده‌اند. همچنین ایشان نشان دادند، که می‌توان از انتقال حرارت تابشی صرف نظر نمود. آنها همچنین در مطالعه‌ای دیگر [۱۵] در سال ۲۰۰۴، یک مدل دینامیک سیالاتی بیضوی دو بعدی از یک میکروبرنر را به منظور بررسی اثر هدایت گرمایی دیواره، اتلاف حرارتی خارجی، ابعاد

¹ Blow out

شعله‌های پایای جزئی، در سرعت‌های بالا برای مخلوط غنی مشاهده می‌شود، در حالیکه شعله‌های پایای جزئی جریان رقیق برای همه‌ی نرخ جریان‌ها دیده می‌شود. ایشان همچنین بیان داشتند که، همه‌ی کانال‌های واگرا، یک بهبودی را در محدوده‌ی سرعت بالا، در مقایسه با کانال‌های مستقیم، برای ترکیب‌های مشابه، نشان می‌دهند. مشاهده‌ی شعله‌های صفحه‌ای در نتایج آزمایشگاهی به تشخیص سرعت سوزش آرام برای این مخلوط، در دماهای پیش‌گرمایش متفاوت، کمک می‌کند. همچنین ایشان یک رابطه برای سرعت سوزش آرام با دمای پیش‌گرمایش مخلوط، برای ترکیب متان-هوای استوکیومتری یک ارائه دادند.

کومار [۲۳] در سال ۲۰۱۱، به بررسی عددی دو بعدی احتراق استوکیومتری متان و هوا در کانال واگرا در ابعاد میلیمتری با دیوارهای دما ثابت و عایق در حالت پایا پرداخت. ایشان به بررسی اثر تغییر در زاویه‌ی واگرایی، در شکل شعله و مکان شعله پرداخت و بیان داشت، که برای زوایای کمتر از ۱۰ درجه، مکان شعله، به زاویه واگرایی، وابسته است، در حالیکه در زوایای بزرگتر، این وابستگی، دیده نمی‌شود.

از جمله موانع احتراق پایا در ابعاد میکرو، می‌توان به مدت زمان اقامت کم مخلوط، نسبت به مقیاس زمانی واکنش اشاره کرد، لذا، تحقیقات نشان می‌دهد، که می‌توان با استفاده از روش‌هایی مانند ایجاد پله در داخل محفظه احتراق، زمان مذکور را افزایش داد، که این باعث ایجاد یک احتراق پایدار می‌شود [۲۴].

اختر و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۱۵ به مطالعه‌ی عددی احتراق پیش‌مخلوط در یک محفظه‌ی احتراقی منحنی شکل، برای کاربرد سیستم‌های فتوولتائیک پرداخت. این مطالعه به منظور بررسی اثر انحنای محفظه در انتقال حرارت و افت فشار انجام گرفته است. همچنین ایشان نشان دادند، که در مقایسه با کانال‌های مستقیم، افزایش قابل توجهی در دمای دیوار بیرونی و شار حرارتی برای کانال‌های استوانه‌ای منحنی دیده می‌شود. رامادان و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۱۵ به شبیه‌سازی عددی شعله‌ی آرام پیش‌مخلوط متان هوا در فشار اتمسفریک در ابعاد میکرو با قطر ۲ میلیمتر پرداختند. مکانیزم واکنش شامل ۱۶ گونه و ۴۱ واکنش است. این مطالعه بر اهمیت استفاده از باقیمانده‌های کوچک، برای همگرایی در دینامیک سیالات محاسباتی، جهت بدست آوردن یک جواب دقیق در مدل‌سازی عددی، تاکید دارد. تمرکز اصلی کار آنها، بر روی بررسی اثر حرارت دادن واکنش‌دهنده بر ساختار شعله و ثبات با دیواره‌های محفظه‌ی احتراق آدیاباتیک و غیر آدیاباتیک است. همچنین آنها اثرات ضریب انتقال حرارت همرفتی و اتلاف گرما، در حضور و غیاب تابش در ابعاد میکرو را بیان کرده‌اند. میاتا و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۱۶ به شبیه‌سازی عددی مستقیم احتراق مخلوط متان-هوا در ابعاد میکرو، در یک کانال دایروی با یک مکانیزم جنبشی پرداختند، واکنش شامل ۵۳ گونه با ۳۲۵ واکنش را مد نظر گرفتند. ایشان به بررسی دمای ورودی مختلف و گرادیان‌های مختلف دمای دیواره، در پدیده‌ی ناپایایی در ابعاد میکرو پرداختند. آنها نشان دادند، رفتارهای ناپایای شعله، مثل نوسانات شعله و خاموش متناوب و احتراق، بستگی به دمای ورودی و گرادیان دمای دیواره دارد.

بحرانی وجود دارد، که بالاتر از آن، شعله، شروع به چرخش می‌کند. فرکانس چرخش، تقریباً متناسب با سرعت شعله است. همچنین این موضوع نیز دیده شد، که شعله‌های چرخشی، بعد از انتقال از رژیم شعله‌های سریع، به رژیم شعله‌های کند، صورت می‌گیرد. در پژوهش آنها، سرعت انتشار شعله و عدد لوئیس مؤثر، به صورت عددی، بدست آمده‌اند. مشاهدات تجربی و آنالیزهای تئوریکال، صرفنظر از اندازه‌ی عدد لوئیس مخلوط، پیشنهاد می‌کنند، که اثر متقابل دیوار-شعله، به طور قابل توجهی، عدد لوئیس مؤثر را افزایش داده و منتهی به یک مکانیزم جدید، برای بالابردن ناپایداری نفوذ گرمایی می‌شود.

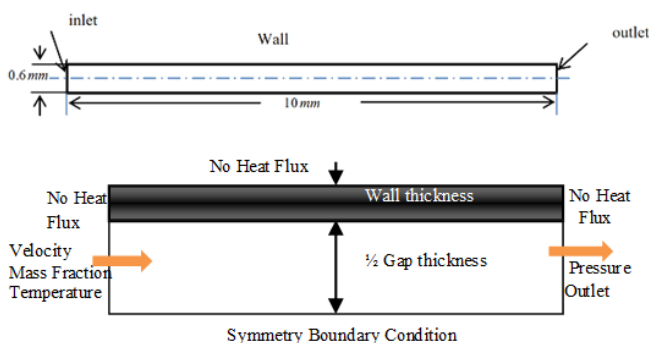
پن و هیونگ [۱۹] در سال ۲۰۰۷، به صورت آزمایشگاهی، اثر سه پارامتر مهم روی میکروفوتولتائیک شامل، نسبت هیدروژن به اکسیژن، نسبت قطر نازل به محفظه و نسبت ضخامت دیواره به قطر محفظه را بررسی کردند. نتایج کار ایشان نشان می‌دهد که دمای دیواره بالایی در مخلوط‌های غنی، دیده می‌شود و نسبت قطر نازل به محفظه، روی اندازه و یکنواختی، توزیع دما روی دیواره، تأثیر دارد. همچنین ضخامت دیواره کم، باعث کاهش اتلاف حرارت هدایتی محوری و لذا افزایش دمای دیواره می‌گردد. همچنین در تحقیق دیگری، یانگ و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۰۷، اثر ترکیب محفظه احتراق را بر روی کارایی سیستم‌های میکرو ترموفوتولتائیک به طور آزمایشگاهی، مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند و به تاثیر قطر محفظه، در کارایی این گونه سیستم‌ها، اشاره کردند. در تحقیقات دیگری، جان وی و بژینگ [۲۱] در سال ۲۰۰۸، احتراق متان-هوا را در سه نوع میکرو تیوب، با قطرهای خارجی مشابه، به منظور بررسی اثر نسبت هم‌ارزی، نرخ جریان و جنس دیواره، به صورت آزمایشگاهی انجام دادند. ایشان بیان داشتند، که در حالتی که نسبت هم‌ارزی کمتر از واحد باشد، متان به طور کامل اکسید نشده و مقدار زیادی از هیدروژن و مونوکسید کربن تولید می‌شود، که منجر به کم شدن انرژی آزاد شده می‌گردد، حال اگر نسبت هم‌ارزی، مقدار اندکی کمتر از واحد باشد، احتراق کامل انجام شده و به گاز دی اکسید کربن و بخار آب تبدیل شده و ماکزیمم گرمای احتراقی آزاد می‌گردد، در این وضعیت اتلاف حرارتی از دیواره، بیشترین مقدار خواهد بود. اتلاف حرارتی از دیواره هنگامی که جنس دیواره فولاد ضد زنگ باشد، حداقل ۲۲ درصد از کل حرارت آزاد شده است. از آنجا که صدور دیواره‌های فولاد ضد زنگ، بزرگتر از لوله‌های سرامیکی است، لذا اتلاف حرارت تابشی بیشتر بوده و ۷۰ درصد از اتلاف حرارت کلی را شامل می‌شود. از آنجا که هدایت گرمایی سرامیک، کمتر از فولاد ضد زنگ است، گرادیان دما در امتداد محور بزرگتر از لوله فولاد ضد زنگ بوده، که این امر برای انتقال حرارت محوری و پایداری شعله نامناسب است.

اکرم و کیومار [۲۲] در سال ۲۰۱۱، انتشار شعله پیش‌مخلوط آرام، در یک کانال در ابعاد میلیمتری، مستقیم و واگرا، را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. بخش جریان پایین‌دست کانال‌ها با یک منبع حرارتی خارجی، به منظور نگهداری گرادیان دمای دیوار مثبت، در امتداد جهت جریان، گرم می‌شد. این تحقیق نشان می‌دهد، که شعله‌های صفحه‌ای، نزدیک محدوده‌ی برگشت شعله، مشاهده می‌شود. شعله‌های کشیده شده منفی، برای نرخ جریان‌های متوسط و ترکیبات غنی، برای نرخ جریان‌های بالا، دیده شده‌است. این شعله‌ها به صورت متقارن و نامتقارن در طبیعت هستند.

سیو و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۱۶، به مطالعه‌ی عددی یک میکرو محفظه‌ی چند کانال مورد استفاده در سیستم‌های فتوولتائیک پرداختند. به عنوان یک فاکتور کلیدی، طراحی یک محفظه‌ی احتراق میکرو، در تعیین عملکرد یک سیستم فتوولتائیک بسیار مهم است. در مقاله‌ی آنها یک مدل سه بعدی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، با یک مکانیزم واکنشی اسکلتی برای احتراق هیدروژن- هوا بیان شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد، که توزیع دما در امتداد دیوار بیرونی محفظه‌ی احتراقی چند کانال، بالاتر و یکنواخت‌تر از محفظه‌ی احتراق تک‌کانال میکرو است، که برای سیستم میکروفتوولتائیک بسیار حائز اهمیت است. علاوه بر این انرژی تابشی و بازدهی تابشی در محفظه‌ی احتراقی چند کانال، بیشتر از محفظه‌ی احتراق تک کانال، در همان نرخ جریان حجمی است. با توجه به مرور مقالات فوق می‌توان دریافت که در مراجع کمتری اثر لغزش و پرش دمایی و تاثیر آن بر احتراق در ابعاد میکرو دیده شده است، لذا در ادامه سعی بر بررسی این موضوع می‌شود.

۲ هندسه، معادلات حاکم و شرایط مرزی

شکل ۱ هندسه مسئله و دامنه حل را به همراه شرایط مرزی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، محفظه‌ی احتراقی در نظر گرفته شده، یک کانال دو بعدی به ارتفاع $0.6 \mu\text{m}$ و طول $10 \mu\text{m}$ میلی‌متر و ضخامت دیواره $0.2 \mu\text{m}$ میلی‌متر است، که مخلوط متان- هوا با نسبت استوکیومتری، با دمای 300°C درجه کلوین و فشار 101325 Pa پاسکال وارد محفظه می‌شود. معادلات بقای جرم، تکانه، انرژی و گونه‌ها با استفاده از روش حجم محدود و توسط نرم‌افزار فلوئنت و به صورت دو بعدی و پایا شبیه‌سازی شده‌است. در این مطالعه، برای حل عددی دینامیک جریان واکنش‌پذیر از روش سیمپل با حلگر ضمنی و روش گسسته‌سازی مرتبه اول بالادستی استفاده شده‌است. همچنین برای مدل‌سازی شیمی احتراق و چگالی سیال، روش‌های جریان آرام نرخ محدود و گاز کامل به کار برده شده‌اند.



شکل ۱: شکل شماتیک هندسه مسئله و دامنه حل به همراه شرایط مرزی

چگالی سیال از رابطه‌ی گاز ایده‌آل، ویسکوزیته‌ی سیال، گرمای ویژه و هدایت گرمایی مخلوط گازی با استفاده از کسر جرمی و خواص گونه‌ها، بدست می‌آید و گرمای ویژه گونه‌ها با استفاده از تابع چند جمله‌ای متناسب با دما بدست می‌آید. مکانیزم استفاده شده، یک واکنش غیرقابل برگشت تک مرحله‌ای که در مرجع [۳۳] به صورت رابطه (۱) مشخص شده‌است.

سیو و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۵، به مطالعه‌ی عددی عملکرد گرمایی در یک محفظه‌ی احتراق میکرو جدید، با دو حفره، جهت کاربرد در سیستم‌های فتوولتائیک پرداختند. آنها نشان دادند، که با محفظه‌ی احتراقی جدید، می‌توان توزیع دمای یکنواخت‌تر و بالاتری در امتداد دیوار، به علت تشکیل منطقه‌ی دمایی بالای ثانویه در حفره‌ی پایین دست در سرعت ورودی نسبتاً بالا، شاهد بود، که این امر برای سیستم‌های فتوولتائیک دلخواه است. آنها نشان دادند، که انرژی تابشی قابل استفاده در شرایط مفروض، در حالت دو حفره‌ای بیشتر از حالت تک حفره‌ای است. آنها ویژگی‌های احتراقی دو میکرو محفظه را تحت نسبت هم‌ارزی‌های هیدروژن به هوای مختلف و در سرعت ورودی ثابت بررسی کردند و نشان دادند، که انرژی تابشی قابل استفاده و بازدهی تابشی در حالت دو حفره‌ای، بالاتر از محفظه‌ی تک حفره‌ای است و این مقادیر با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد. همچنین آنها اثر فاصله‌ی بین حفره‌ها را در سرعت‌های ورودی مختلف بررسی نمودند و نشان دادند، که یک فاصله‌ی بهینه برای سرعت ورودی وجود دارد. همچنین ون و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۱۵، به مطالعه‌ی تجربی و عددی پایداری شعله متان- هوا در کانالی با ابعاد میکرو، با دیواره‌های حفره‌ای پرداختند. آنها در قسمت عددی خود نشان دادند، که اثرات ترکیب به عنوان مثال، شکل‌گیری منطقه‌ی چرخش و منطقه‌ی کم سرعت در حفره، اثرات نفوذی برجسته‌ای و اثر پیش‌گرم کردن دیواره‌های داخلی بالادست، یک مکانیزم قابل قبول برای پایداری شعله است.

بوکی و همکاران [۳۰] در سال ۲۰۱۶ به مطالعه‌ی پایداری خطی میکرو احتراق در داخل یک لوله، جایی که دو ناپایداری آشکار در جریان‌های با نرخ بالا و پایین است، پرداختند. ایشان احتراق پیش مخلوط متان- هوا، را در حالت استوکیومتری در یک مدل سه بعدی کاهشی، مورد بررسی قرار دادند. این مدل برگرفته از دینامیک شعله، در محدوده‌ی سرعت بین ۵ تا ۱۰۰ سانتیمتر برثانه است. آنها اظهار داشتند، که تغییر فاز بین مدت واکنش و انتشار شعاعی، به عنوان منبع بی‌ثباتی در هر دو مورد شناخته شده است. در کار ایشان، رفتار کلی با یک تجزیه و تحلیل خطی بررسی شده است. درجه حرارت و غلظت آشفستگی دو و سه بعدی با حل مسئله‌ی مقدار ویژه بدست آمده، توسط خطی‌سازی مدل عمومی بدست آمده است.

جیاگیانگ و همکاران [۳۱] در سال ۲۰۱۶، به مطالعه‌ی عددی سه بعدی بررسی اثرات فشار ورودی، در پیش مخلوط احتراقی هوا- هیدروژن، در یک محفظه‌ی احتراقی میکرواستوانه‌ای با یک گام پرداختند. آنها تغییر سرعت، دما و آنتروپی ویژه را در شرایط فوق نشان دادند. ایشان نشان دادند، که بازدهی انرژی در یک سیستم میکروترموفتوولتائیک به شدت به دمای دیواره‌ی محفظه‌ی احتراق میکرو و یکنواختی آن بستگی دارد. نتایج ایشان نشان می‌دهد، که تغییر سرعت، درجه حرارت و آنتروپی ویژه، عمدتاً در منطقه‌ی واکنش و در ناحیه‌ی خروجی اتفاق می‌افتد و بالاترین دمای میانگین دیواره در فشار ورودی صفر است، در حالیکه کمترین یکنواختی دما و بالاترین آگزرژی در فشار ورودی 0.1 MPa مگاپاسکال است. از دیدگاه مصرف انرژی نیز این سیستم احتراق میکرو، بهترین عملکرد را در فشار ورودی 0.1 MPa مگاپاسکال به دلیل پتانسیل بدست آوردن بازدهی انرژی و آگزرژی بهتر، دارد.

$$p_o = \rho RT \quad (۸)$$

ضریب انتقال حرارت رسانایی، گرمای ویژه مخلوط و ضریب گرانی، از رابطه‌های (۹) الی (۱۱) بدست می‌آید:

$$k = \sum_{i=1}^N Y_i k_i \quad (۹)$$

$$C_p = \sum_{i=1}^N Y_i C_{pi} \quad (۱۰)$$

$$\mu = \sum_{i=1}^N Y_i \mu_i \quad (۱۱)$$

در فلونت، هنگامی که رابطه گاز ایده‌آل برای محاسبه چگالی استفاده می‌شود، می‌توان، از تئوری جنبشی، به صورت رابطه (۱۲) برای محاسبه ضریب گرانی استفاده کرد.

$$\mu_i = 2/67 \times 10^{-6} \frac{\sqrt{M_{wi} T}}{\sigma^2 \Omega_{\mu}} \quad (۱۲)$$

نحوه محاسبه ضریب رسانش گرمایی هر جزء به صورت رابطه (۱۳) است:

$$k_i = \frac{15}{4} \frac{R_u}{M_{wi}} \mu_i \left[\frac{4}{15} \frac{C_{p,i} M_{wi}}{R_u} + \frac{1}{3} \right] \quad (۱۳)$$

نحوه محاسبه ضریب نفوذ دوتایی با استفاده از فرمول چاپمن-انزکوگ [۱۴] با فرمول (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$D_{ij} = 0.118 \frac{\left[T^r \left(\frac{1}{M_{wi}} + \frac{1}{M_{wj}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]}{p \sigma_{ij}^2 \Omega_D} \quad (۱۴)$$

برای معادله مومنوم، یک بار شرط مرزی عدم لغزش (سرعت روی دیواره برابر با صفر) فرض شده و سپس به منظور مقایسه شرط مرزی لغزش و پرش دمایی که به صورت روابط (۱۵) و (۱۶) است، روی این معادله اعمال گردیده است.

$$u_s - u_w = \frac{\gamma - \sigma_V}{\sigma_V} L_{mfp} \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)_w + \frac{\gamma}{4} \frac{\mu}{\rho T} \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_w \quad (۱۵)$$

$$T_s - T_w = \frac{\gamma - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{\gamma y}{\gamma + 1} \frac{k}{\mu c_v} L_{mfp} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w \quad (۱۶)$$

در رابطه‌ی فوق طول پویش آزاد مولکولی، برابر با حاصلضرب عدد نادسن در ارتفاع محفظه‌ی احتراق است.

$$L_{mfp} = D \times Kn \quad (۱۷)$$

$$Kn = \frac{K_B T}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 p_L} \quad (۱۸)$$

w و n نیز مربوط به جهت عمود و مماس بر دیواره بوده و اندیس s و w نیز معرف پارامتر لغزشی سیال، روی دیواره و مقدار متغیر مربوط به دیواره (در اینجا صفر) است. همچنین $\sigma - T$ و $\sigma - v$ یک ثابت بوده که حدود ۱ است، لازم به ذکر است که عبارت اولی در سمت راست معادله‌ی (۱۵)، عبارت سرعت لغزشی و عبارت دوم خزش دمایی نامیده می‌شود. عدد نادسن محاسبه شده در کار حاضر حدود $10^{-3} \times 0.4$ در نظر گرفته شده است.

$$r_{CH_4} \left(\frac{Kgmol}{m^2 s} \right) = 2/119 \times 10^{11} \exp \left[\frac{-2/0.27 \times \frac{10^4 J}{kgmol}}{RT} \right] \times [CH_4]^{0.2} [O_2]^{1.3} \quad (۱)$$

که در رابطه‌ی فوق غلظت‌ها در واحد $Kg.mol.m^{-3}$ است. این تقریب یک مرحله‌ای، یک ابزار مناسب برای تشریح دینامیک شعله و واکنش شعله به اختلالات شعله است [۳۴].

شرط مرزی سرعت در ورودی، سرعت یکنواخت ثابت، شرط مرزی تقارن در خط مرکزی دو صفحه و در خروجی، یک فشار ثابت در نظر گرفته شده است. برای اعتبارسنجی کار، در سطح بین دیوار و سیال، شرط عدم لغزش و عدم نفوذ شار عمودی به سطح دیواره‌ها به کار رفته است. معادلات حاکم بر مسئله شامل معادله‌ی بقای جرم، معادله‌ی بقای گونه‌ها (با صرف نظر از نفوذ بر اثر گرادیان دما)، معادله بقای مومنوم در راستای x و y ، معادله انرژی (با صرف نظر کردن از انتقال حرارت به دلیل اثر دوفر و با توجه به ثابت بودن فشار ترمودینامیکی)، معادله انرژی در فاز جامد و معادله حالت به ترتیب مطابق روابط (۲) الی (۸) است. در ضمن در این تحقیق از اثرات تشعشع گاز درون محفظه و انتقال حرارت تشعشعی با بیرون صرف نظر شده است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (۲)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Y_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v Y_i)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[-\rho D_{i,mix} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[-\rho D_{i,mix} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right] = \omega_i \quad (۳)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot V \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (۴)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \cdot V \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (۵)$$

$$\frac{Dh}{Dt} = \frac{\partial \left(K_f \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(K_f \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial(\rho h_i D_{i,mix} \frac{\partial Y_i}{\partial x})}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial(\rho h_i D_{i,mix} \frac{\partial Y_i}{\partial y})}{\partial y} \right) \right] - \sum_{i=0}^n \dot{\omega}_i \Delta h_i^f M_i \quad (۶)$$

$$\rho_s \frac{Dh}{Dt} = \frac{\partial \left(k_{wall} \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(k_{wall} \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} \quad (۷)$$

۳ نتایج و بحث

۱.۳ اعتبارسنجی

در این شبیه‌سازی همگرایی براساس باقیمانده‌های حل معادلات پیوستگی، انرژی، بقای گونه‌ها و تکانه به ترتیب 10^{-10} ، 10^{-6} ، 10^{-4} و 10^{-4} در نظر گرفته شده‌اند.

در این مدل پس از مطالعه بر روی مدل با تعداد شبکه‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ سلول، شبکه با ۴۰۰ سلول، برای پژوهش حاضر انتخاب گردید (جدول ۱).

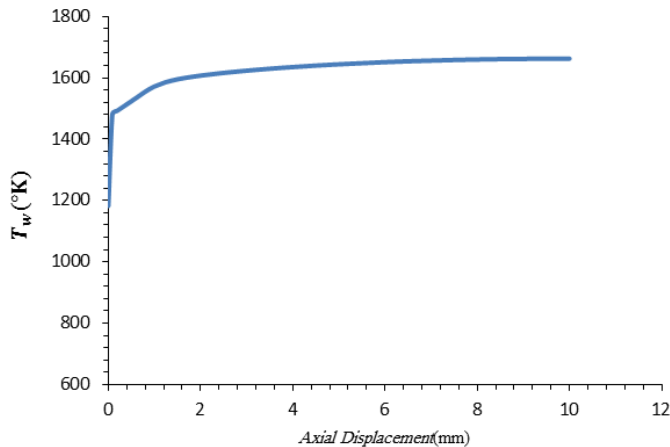
نتایج به دست آمده از مدل‌سازی حاضر با استفاده از نتایج ارائه شده در مرجع [۱۴] اعتبارسنجی شده‌اند. در شکل ۲ نمودار توزیع دما بر روی خط مرکزی محفظه، برای کار حاضر و نتایج مقاله نورتن آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، اختلاف اندکی بین کار حاضر و نتایج نورتن است و این نشان از صحت کار عددی حاضر است (درصد اختلاف نسبی حدود ۱۱ درصد است).

جدول ۱: مقایسه نتایج دمای خط مرکزی در اندازه شبکه‌های مختلف

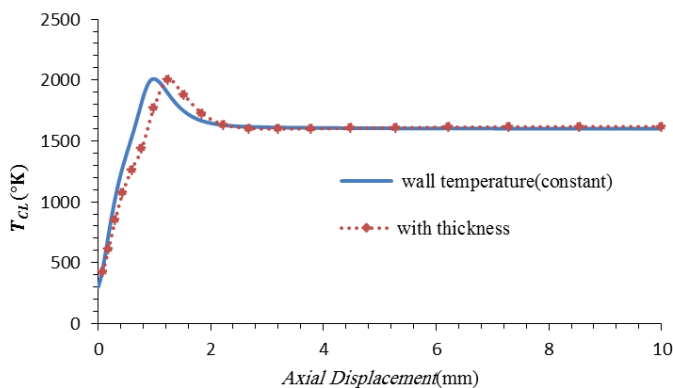
اندازه شبکه	۷۰۰	۶۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۱۰۰
دما (K)	۱۶۰۲	۱۶۰۱	۱۵۹۸	۱۵۰۸	۱۴۱۱

۲.۳ بیان نتایج در وضعیت عدم اعمال شرط لغزشی

نمودار دما در دیواره‌ی محفظه مطابق با شکل ۴ است. همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، دمای دیواره لوله تقریباً برابر با ۱۶۰۰ کلوین است. شکل ۵ توزیع دما در خط مرکزی لوله در حالت دمای دیواره ثابت با حالت دارای ضخامت (که کار حاضر با آن اعتبارسنجی شد) مقایسه می‌شود.

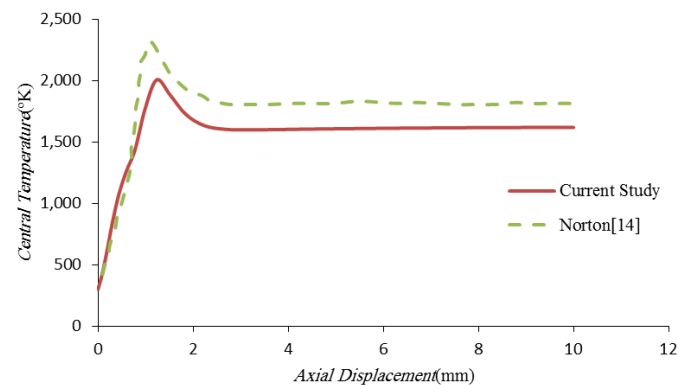


شکل ۴: توزیع دما در دیواره‌ی محفظه



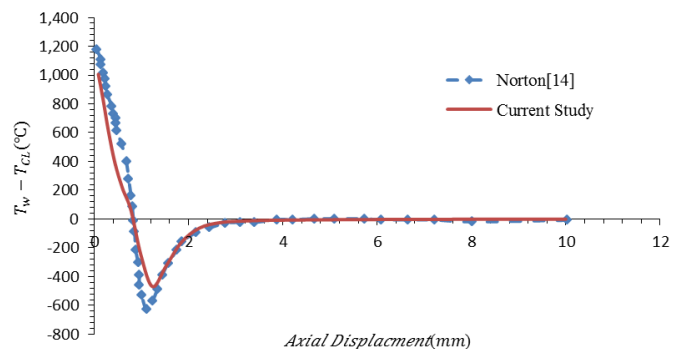
شکل ۵: مقایسه توزیع دما در خط مرکزی بین دیواره با دمای ثابت و دیوار با ضخامت

همان‌گونه که از شکل ۶ و شکل ۷ مشخص است، می‌توان سه منطقه‌ی، پیش‌گرم، احتراق و پس از احتراق یا خنک‌کننده مشخص نمود. عرض این نواحی به صورت تابعی از شرایط عملکرد تغییر کرده و تمایز آنها به صورت صریح نیست. در ناحیه‌ی یک، دمای دیواره به طور قابل توجهی بالاتر از دمای سیال بوده به گونه‌ای که انتقال انرژی از دیوار به سیال صورت می‌گیرد، هدایت حرارتی دیواره هم بالاتر از سیال مخلوط است، به طوری‌که شار حرارتی داخل دیوار راکتور رخ می‌دهد، این انرژی از منطقه‌ی پس از احتراق، که در آن دمای دیواره بسیار گرم است، حاصل شده است. وقتی مخلوط به درجه حرارت اشتعال خود برسد، یک نقطه‌ی ماکزیممی در درجه حرارت در منطقه‌ی دو دیده می‌شود، که این منطقه همراه با آزاد شدن گرما در نتیجه واکنش است، در این منطقه‌ی نسبتاً کوچک، انتقال حرارت در مخلوط بسیار آهسته‌تر از نرخ حرارت آزاد شده است، به گونه‌ای که دما در خط مرکزی تقریباً به دمای آدیاباتیک شعله می‌رسد. در منطقه سه بعد از اینکه واکنش دهنده‌ها تمام شد، واکنش متوقف شده و سیال به دمای دیواره و پایین دست می‌رسد. در



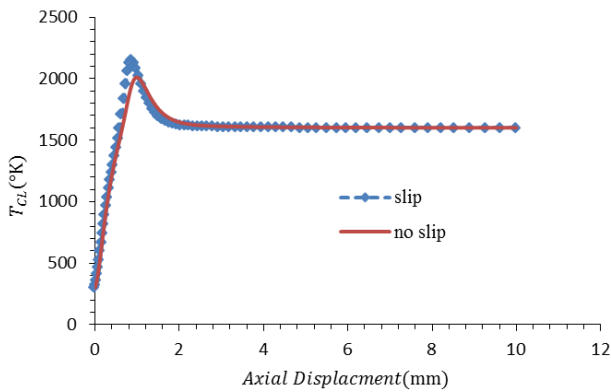
شکل ۲: مقایسه نتایج دمای خط مرکزی در مطالعه حاضر و نتایج نورتن [۱۴]

در شکل ۳ اختلاف دمای مرکز محفظه با دمای دیواره محفظه، آورده شده است.



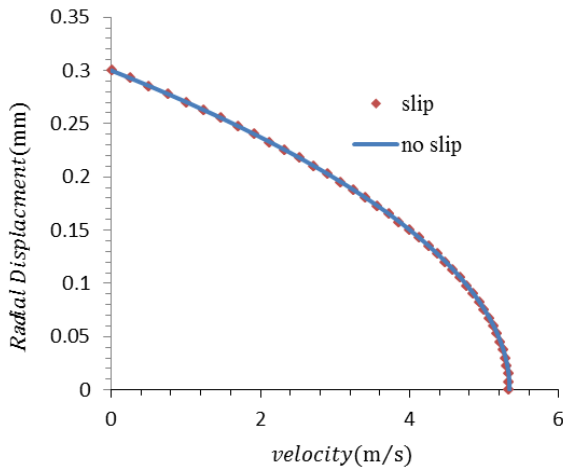
شکل ۳: مقایسه اختلاف دمای دیواره با دمای خط مرکزی در مطالعه حاضر و نتایج نورتن [۱۴]

نشان داده است، نتایج نشان می‌دهد، با اعمال شرط لغزشی، توزیع دما در خط مرکزی محفظه تغییر چندانی نمی‌کند، تنها در حالت لغزشی، ماکزیمم دما، افزایش و مکان تشکیل شعله اندکی به ابتدای محفظه، نزدیک می‌شود.



شکل ۹: مقایسه‌ی توزیع دما در خط مرکزی محفظه در حالت با اعمال شروط لغزشی و بدون اعمال شرط لغزشی

برای مشخص شدن، اثر پرش سرعت و دما روی محفظه، بردار سرعت در اطراف دیواره برای هر دو حالت نمایش داده می‌شود. در شکل ۱۰ توزیع سرعت در خط قائم وسط محفظه، آورده شده است، همان‌گونه که دیده می‌شود، تفاوت محسوسی دیده نمی‌شود، برای دیدن تفاوت اعمال شرط لغزشی، در جدول ۲، سرعت در لبه‌ی دیواره آورده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، در حالت بدون لغزش سرعت در دیواره برابر با صفر و در حالت با لغزش سرعت ۱۳٪ متر برثانیه خواهد بود.

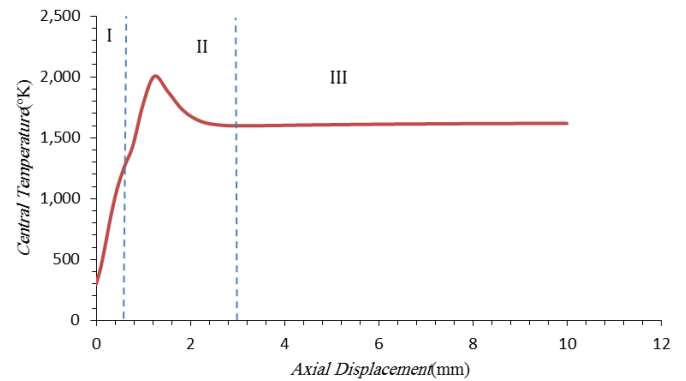


شکل ۱۰: مقایسه توزیع سرعت در راستای شعاعی محفظه در حالت با اعمال شرط لغزشی و بدون اعمال شرط لغزشی

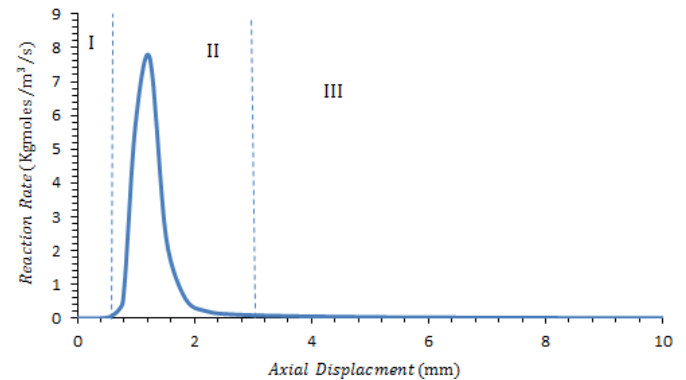
جدول ۲: مقایسه سرعت در خط قائم وسط محفظه و در نزدیکی لبه‌ی دیواره در حالت با اعمال شروط لغزشی و بدون آن

فاصله از خط مرکزی (mm)	سرعت بدون لغزش (m s ⁻¹)	سرعت در حالت با لغزش (m s ⁻¹)	درصد اختلاف (%)
۰٫۳	۰	۰٫۱۲۸۵۳	۱/۲۸۵۳
۰٫۲۹۲۵	۰٫۲۶۵۴۸۹	۰٫۲۵۲۹۱۴	۱/۲۵۷۵
۰٫۲۸۵	۰٫۵۲۲۶۱۳	۰٫۵۱۰۳۲۳	۱/۲۲۹
۰٫۲۷۷۵	۰٫۷۷۳۰۳۸	۰٫۷۶۱۰۴۵	۱/۱۹۹۳
۰٫۲۷	۱٫۰۱۶۷۶	۱٫۰۰۵۰۸	۱/۱۶۸

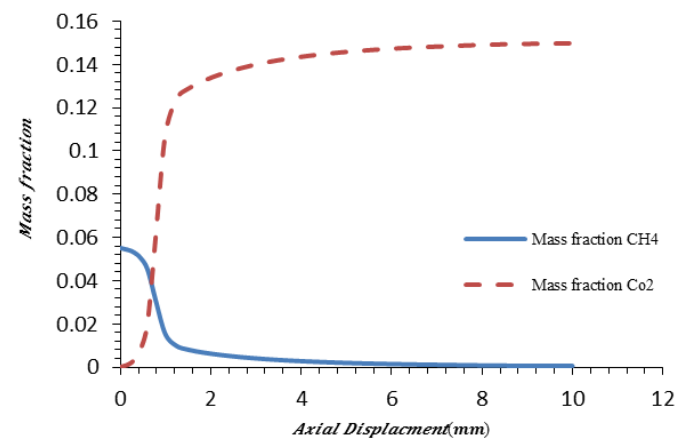
شکل‌های ۶ تا ۸ به ترتیب توزیع دما، نرخ واکنش و غلظت جرمی متان و دی اکسید کربن، در خط مرکزی محفظه آورده شده است.



شکل ۶: تقسیم‌بندی نواحی احتراق براساس توزیع دما در خط مرکزی



شکل ۷: تقسیم‌بندی نواحی احتراق براساس نرخ واکنش در خط مرکزی



شکل ۸: غلظت جرمی متان و دی اکسید کربن در امتداد خط مرکزی محفظه

۳.۳ بیان نتایج در وضعیت اعمال شرط لغزشی و مقایسه با عدم اعمال لغزش

در این بخش شرط مرزی لغزشی سرعت و پرش دمایی را که در بالا بدان اشاره گردید، روی دیواره‌ی داخلی کانال در حالتی که دیواره دارای دمای ثابت ۱۶۰۰ درجه کلوین است، اعمال می‌شود و نتایج با قسمت قبل مقایسه می‌شود. در شکل ۹ نمودار دما بر روی خط مرکزی برای هر دو حالت را

۵ نمادها

ظرفیت گرمایی در فشار ثابت ($J Kg^{-1} K^{-1}$)	C_p
ضریب نفوذ جرمی ($m s^{-2}$)	D
آنتالپی ویژه ($J Kg^{-1}$)	h
ضریب انتقال گرمای هدایتی ($W m^{-1} K^{-1}$)	K
عدد نادسن	Kn
جرم مولکولی ($kg mol^{-1}$)	M_w
تعداد کل اجزاء	N
فشار ($kg m^{-1} s^{-2}$)	P
نرخ واکنش ($kg s m^{-3}$)	r_{ch4}
ثابت جهانی گازها ($kJ kg^{-1} kmol^{-1} k^{-1}$)	R
دما (K)	T
زمان (s)	t
سرعت در راستای محوری ($m s^{-1}$)	u
سرعت در راستای عرض کانال ($m s^{-1}$)	v
نرخ تولید جرم بر واحد حجم ($kg s^{-1} m^{-3}$)	w
کسر جرمی	Y

علائم یونانی

لزجت دینامیکی ($kg m^{-1} s^{-1}$)	μ
چگالی ($kg m^{-3}$)	ρ
طول مشخصه لنارد جونز	σ
مجموع برخوردهای کاهش یافته	Ω_D

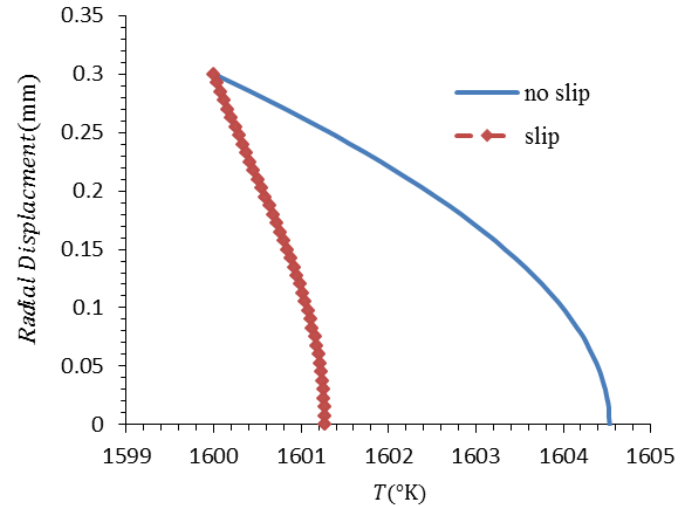
زیرنویسها

سیال	f
جزء i ام	i
جامد	s
دیوار	w

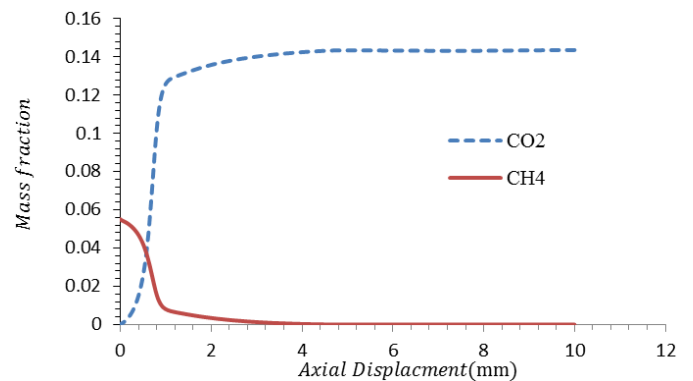
مراجع

- [1] Waitz, Ian A, Gauba, Gautam, and Tzeng, Yang-Sheng. Combustors for micro-gas turbine engines. *Journal of Fluids Engineering*, 120(1):109-117, 1998.
- [2] Chia, Loy Chuan and Feng, Bo. The development of a micropower (micro-thermophotovoltaic) device. *Journal of Power Sources*, 165(1):455-480, 2007.
- [3] Bicen, AF, Tse, DGN, and Whitelaw, JH. Combustion characteristics of a model can-type combustor. *combustion and Flame*, 80(2):111-125, 1990.
- [4] Adachi, Sadamasa, Iwamoto, Atushi, Hayashi, Shigeru, Yamada, Hideshi, and Kaneko, Shigehiko. Emissions in

در شکل ۱۱ توزیع دما در خط قائم مرکزی محفظه دیده می‌شود، که نشان از وجود تفاوت در اثر اعمال پرش دمایی است (حداکثر اختلاف ۳/۳ درصد) و در شکل ۱۲ غلظت جرمی متان و دی اکسید کربن در حالت اعمال شرط لغزشی آورده شده است.



شکل ۱۱: مقایسه توزیع دما در راستای شعاعی محفظه در حالت با اعمال شرط لغزشی و بدون اعمال شرط لغزشی



شکل ۱۲: غلظت جرمی متان و دی اکسید کربن در امتداد خط مرکزی محفظه

۴ نتیجه‌گیری

در کار حاضر، احتراق در ابعاد میکرو به صورت عددی و دو بعدی و برای مکانیزم احتراقی متان-هوا حل شده است. بدین منظور با کمک مدل‌سازی عددی فرایند احتراق مورد بررسی قرار گرفت و پس از اعتبارسنجی و علاوه بر بررسی توزیع غلظت و نحوه توزیع دما، سه ناحیه احتراقی، شرح داده شد. همچنین شرایط مرزی لغزشی و پرش دمایی روی دیواره اعمال شد و اثر آن مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید، که اصلاح شرایط مرزی، اثر چندانی (درصد اختلاف توزیع سرعت حداکثر ۱/۳ درصد و درصد اختلاف توزیع دما حداکثر ۳/۳ درصد) روی نتایج ندارد. از جمله مهمترین عوامل درصد اختلاف کم بین نتایج مربوط به حالت عدم لغزش و حالت لغزشی می‌تواند ناشی از کوچک بودن عدد نادسن، ضریب انباشت ممتوم مماسی و ضریب انباشت انرژی باشد.

- [20] Yang, WM, Chou, SK, Shu, C, Li, ZW, and Xue, H. Experimental study of micro-thermophotovoltaic systems with different combustor configurations. *Energy conversion and management*, 48(4):1238–1244, 2007.
- [21] Li, Junwei and Zhong, Beijing. Experimental investigation on heat loss and combustion in methane/oxygen micro-tube combustor. *Applied Thermal Engineering*, 28(7):707–716, 2008.
- [22] Akram, Mohammad and Kumar, Sudarshan. Experimental studies on dynamics of methane-air premixed flame in meso-scale diverging channels. *Combustion and flame*, 158(5):915–924, 2011.
- [23] Kumar, Sudarshan. Numerical studies on flame stabilization behavior of premixed methane-air mixtures in diverging mesoscale channels. *Combustion Science and Technology*, 183(8):779–801, 2011.
- [24] Li, ZW, Chou, SK, Shu, C, Xue, H, and Yang, WM. Characteristics of premixed flame in microcombustors with different diameters. *Applied Thermal Engineering*, 25(2-3):271–281, 2005.
- [25] Akhtar, Saad, Khan, Mohammed N, Kurnia, Jundika C, and Shamim, Tariq. Numerical investigation of h₂-air premixed combustion in a curved micro-combustor for thermo-photovoltaic (tpv) applications. *Energy Procedia*, 75:3060–3065, 2015.
- [26] Turkeli-Ramadan, Zerrin, Sharma, Rajnish N, and Raine, Robert R. Two-dimensional simulation of premixed laminar flame at microscale. *Chemical Engineering Science*, 138:414–431, 2015.
- [27] Miyata, Eriko, Fukushima, Naoya, Naka, Yoshitsugu, Shimura, Masayasu, Tanahashi, Mamoru, and Miyauchi, Toshio. Direct numerical simulation of micro combustion in a narrow circular channel with a detailed kinetic mechanism. *Proceedings of the Combustion Institute*, 35(3):3421–3427, 2015.
- [28] Su, Yang, Song, Jinlin, Chai, Jiale, Cheng, Qiang, Luo, Zixue, Lou, Chun, and Fu, Peifang. Numerical investigation of a novel micro combustor with double-cavity for micro-thermophotovoltaic system. *Energy Conversion and Management*, 106:173–180, 2015.
- [29] Wan, Jianlong, Fan, Aiwu, Liu, Yi, Yao, Hong, Liu, Wei, Gou, Xiaolong, and Zhao, Daiqing. Experimental investigation and numerical analysis on flame stabilization of ch₄/air mixture in a mesoscale channel with wall cavities. *Combustion and Flame*, 162(4):1035–1045, 2015.
- [30] Bucci, Michele A, Robinet, Jean-Christophe, and Chibbaro, Sergio. Global stability analysis of 3d micro-combustion model. *Combustion and flame*, 167:132–148, 2016.
- [31] Jiaqiang, E, Zuo, Wei, Liu, Xueling, Peng, Qingguo, Deng, Yuanwang, and Zhu, Hao. Effects of inlet pressure on wall temperature and exergy efficiency of the micro-cylindrical combustor with a step. *Applied Energy*, 175:337–345, 2016.
- [32] Su, Yang, Cheng, Qiang, Song, Jinlin, and Si, Mengting. Numerical study on a multiple-channel micro combustor for a micro-thermophotovoltaic system. *Energy Conversion and Management*, 120:197–205, 2016.
- combustion of lean methane-air and biomass-air mixtures supported by primary hot burned gas in a multi-stage gas turbine combustor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2):3131–3138, 2007.
- [5] Sitzki, Lars, Borer, Kevin, Wussow, Steffen, Maruta, Ewald, and Ronney, Paul. Combustion in microscale heat-recirculating burners. in *39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, p. 1087, 2001.
- [6] Aghalayam, P and Vlachos, DG. Roles of thermal and radical quenching in emissions of wall-stabilized hydrogen flames. *AIChE journal*, 44(9):2025–2034, 1998.
- [7] Ganley, Jason C, Seebauer, EG, and Masel, Richard I. Porous anodic alumina microreactors for production of hydrogen from ammonia. *AIChE Journal*, 50(4):829–834, 2004.
- [8] Maekawa, Masao. Flame quenching by rectangular channels as a function of channel length for methane-air mixture. *Combustion Science and technology*, 11(3-4):141–145, 1975.
- [9] Tomlin, Alison S, Pilling, Michael J, Turányi, Tamás, Merkin, John H, and Brindley, John. Mechanism reduction for the oscillatory oxidation of hydrogen: sensitivity and quasi-steady-state analyses. *Combustion and flame*, 91(2):107–130, 1992.
- [10] Linan, Amable and Williams, Forman Arthur. *Fundamental aspects of combustion*. 1993.
- [11] Masel, Richard I and Shannon, Mark A. Microcombustor having submillimeter critical dimensions, February 27 2001. US Patent 6,193,501.
- [12] Jensen C, Masel R I, Moore G V Shannon M. *Burner designs for microcombustion*, 2003.
- [13] Raimondeau, S, Norton, D, Vlachos, DG, and Masel, RI. Modeling of high-temperature microburners. *Proceedings of the Combustion Institute*, 29(1):901–907, 2002.
- [14] Norton, Dan G and Vlachos, Dionisios G. Combustion characteristics and flame stability at the microscale: a cfd study of premixed methane/air mixtures. *Chemical engineering science*, 58(21):4871–4882, 2003.
- [15] Norton, Dan G and Vlachos, Dionisios G. A cfd study of propane/air microflame stability. *Combustion and Flame*, 138(1-2):97–107, 2004.
- [16] Leach, Timothy T and Cadou, Christopher P. The role of structural heat exchange and heat loss in the design of efficient silicon micro-combustors. *Proceedings of the Combustion Institute*, 30(2):2437–2444, 2005.
- [17] Kaisare, NS and Vlachos, DG. Optimal reactor dimensions for homogeneous combustion in small channels. *Catalysis Today*, 120(1):96–106, 2007.
- [18] Xu, Bo and Ju, Yiguang. Experimental study of spinning combustion in a mesoscale divergent channel. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2):3285–3292, 2007.
- [19] Pan, JF, Huang, J, Li, DT, Yang, WM, Tang, WX, and Xue, H. Effects of major parameters on micro-combustion for thermophotovoltaic energy conversion. *Applied Thermal Engineering*, 27(5-6):1089–1095, 2007.

- [33] Westbrook, Charles K and Dryer, Frederick L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. *Combustion science and technology*, 27(1-2):31-43, 1981.
- [34] Williams, Forman A. Overview of asymptotics for methane flames. in *Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames*, pp. 68-85. Springer, 1991.