

بررسی تجربی اثر رقیق سازی نیتروژن بر روی شعله پیش آمیخته متان - اکسیژن در یک راکتور مقیاس مزو

سروش صرافان صادقی^{۱*}، صادق تابع جماعت^۲

۱- پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران

۲- دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، دانشکده مهندسی هوافضا، آزمایشگاه تحقیقاتی سوخت و احتراق

Soroush.s.s@aut.ac.ir

چکیده

در این مطالعه به بررسی تجربی اثر رقیق سازی با نیتروژن، نسبت هم‌ارزی و سرعت مخلوط ورودی بر روی احتراق پیش آمیخته متان- اکسیژن در یک راکتور مقیاس مزو استوانه‌ای به قطر داخلی 5mm و ضخامت جداره 1mm پرداخته شده است. بر طبق نتایج حاصل از این تحقیق، با توجه به تشکیل شعله در نسبت‌های هم‌ارزی سوخت به اکسیژن بالاتر از نسبت هم‌ارزی استوکیومتری جهت تشکیل شعله درون راکتور، در صورت افزایش سرعت مخلوط ورودی، به منظور نگهداری شعله درون راکتور، نسبت هم‌ارزی باید کاهش یافته و به سمت نسبت هم‌ارزی استوکیومتری نزدیک گردد. با رقیق سازی مخلوط ورودی توسط نیتروژن و با بالا رفتن سرعت مخلوط ورودی، نواحی مربوط به تشکیل شعله پایدار و نوسانی محدود می‌شود.

واژه‌های کلیدی: احتراق مزو، متان، اکسیژن، رقیق سازی، نیتروژن

۱- مقدمه

امروزه، با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در علوم میکرو و نانو و نیز تلاش در جهت توسعه منابع تولید توان کوچک‌تر، سبک‌تر، دارای زمان کاری و قدرت تولید توان بالاتر جهت استفاده در تجهیزات مذکور، تحقیقات بر روی امکان استفاده از سوخت‌های هیدروکربنی به عنوان یکی از منابع انرژی موجود، جهت به‌کارگیری در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی در حال افزایش می‌باشد [۱]. با توجه به تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته در گذشته از منظر احتراق کلاسیک، غیر ممکن است بتوان در ابعاد میلی‌متری که به عنوان فاصله یا قطر خاموشی مطرح هستند احتراق پایدار ایجاد کرد [۲]. بر این اساس، از حدود سال ۱۹۹۵ میلادی با انجام یک سری تحقیقات جدید و ایجاد احتراق پایدار در فواصل زیر قطر خاموشی، فصل نوینی از علم احتراق در این حوزه گشوده شده، و پس از آن مطالعه در زمینه محفظه‌های احتراق میلی‌متری و میکرونی با رویکرد پدیده شناسی و کاربردی آغاز گردید [۳]. بر این اساس با کاهش اندازه راکتور، کوپلینگ حرارتی مابین شعله و ساختار جامد دیواره آن ایجاد می‌گردد. وجود کوپلینگ حرارتی مابین دیواره جامد و شعله، از سویی باعث افزایش آنتالپی مخلوط ورودی و افزایش حدود اشتعال پذیری آن شده و از سوی دیگر موجب افزایش اتلاف حرارتی و در نهایت خاموشی شعله می‌گردد. بنابراین با کاهش قطر و یا عرض کانال راکتور به مقادیری نزدیک به ضخامت شعله پیش آمیخته آرام، تئوری‌های متداول قادر به توضیح و تحلیل جزئیات پدیده‌های احتراقی در داخل این دسته از محفظه‌های احتراق نمی‌باشند [۳]. بر همین اساس کار در حوزه پدیده شناسی و رفتار شناسی این نوع احتراق دارای اهمیت می‌باشد.

- کارشناس ارشد پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران- کارشناسی ارشد، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

- دانشیار، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

با توجه به مطالعات انجام گرفته، تعاریف متفاوتی برای احتراق در راکتورها و محفظه‌های احتراقی که دارای ابعاد مشخصه‌ای نزدیک به ضخامت شعله پیش آمیخته آرام می‌باشند، بیان شده است. بر اساس تعاریف ارائه شده، چنانچه قطر راکتور کمتر از ۱ میلی متر باشد به آن راکتور میکرو^۱ و چنانچه قطر آن بین ۱ میلی‌متر تا ۱ سانتی‌متر باشد به آن راکتور مزو^۲ مقیاس گفته می‌شود [۴]. با این وجود، در احتراق مزو مقیاس، مشخصه‌های احتراق میکرو همچون متأثر بودن شدید شعله از جنس دیواره، سرعت سوزش سوخت، سرعت مواد واکنش دهنده، نوع سوخت، قطر محفظه و غیره همچنان باقی می‌ماند [۵]. بدین ترتیب، به هر میزانی که ابعاد راکتور کاهش می‌یابد، نسبت سطح به حجم آن افزایش یافته که این روند باعث افزایش نسبت تلفات حرارتی سطحی به میزان تولید انرژی در واحد حجم می‌گردد [۶].

در این راستا ویکن^۳ و همکاران [۷] بر روی طراحی و ساخت یک سیستم میکروالکترومکانیکی تولید توان بر اساس سیستم «محفظه احتراق میکرو مارپیچی»^۴ برای مخلوط هیدروژن و هوا پرداختند. ریموندو^۵ و همکاران [۸] با انجام یک سری تحقیقات نشان دادند که از بین رفتن رادیکال‌ها در مجاورت دیواره راکتور، نقش مهمی در عدم انتشار شعله در داخل راکتورهای مقیاس کوچک دارد. همچنین، ماروتا^۶ و همکاران [۹] به بررسی احتراق پیش آمیخته در یک راکتور استوانه‌ای پیش گرم شده از جنس کوارتز پرداختند. تحقیقات ایشان به صورت تجربی و عددی به بررسی ویژگی‌های شعله و حدود پایداری شعله‌های مختلف در ابعاد زیر قطر خاموشی پرداخته است. مطالعه در خصوص ویژگی احتراق غیر پیش آمیخته در داخل راکتورهای خمیده مقیاس مزو و میکرو توسط ریچیکور^۷ و همکاران [۱۰] انجام شده است. آن‌ها دریافته‌اند که خمیدگی بیشتر راکتور باعث کاهش ضخامت شعله، آمیختگی بهتر و افزایش پایداری شعله می‌گردد. همچنین، فن^۸ و همکاران [۱۱] به مطالعه بر روی احتراق متان- هوا در داخل راکتورهای کوارتزی میکرو مقیاس با قطرهای داخلی ۰/۷، ۱/۰ و ۱/۵ میلی‌متری پرداخته‌اند. ایشان دریافته‌اند که دمای دیواره راکتور اثر مستقیم بر نحوه سوزش و فرکانس شعله در احتراق نوسانی دارد. بررسی اثر احتراق کاتالیزگر بر روی رفتار و ساختار شعله متان/پروپان- هوا در داخل راکتورهای کانالی دو بعدی توسط اسمیت و کریتسیس^۹ [۱۲] انجام شده است. تحقیقات تجربی ایشان واکنش‌های به وقوع پیوسته پروپان را بر روی سطح کاتالیزوری میکرو راکتور را به سه مرحله تقسیم و تشریح می‌کنند، در مرحله اول ($Re < 100$) در مجاورت بسیار نزدیک لبه پیشرو می‌باشد که در این مرحله شاهد افزایش دما شدید همراه با کاهش سریع موازنه مواد واکنش دهنده و افزایش سرعت گاز در حدود ۲۵٪ سرعت جریان آزاد آن می‌باشیم، در مرحله دوم ($Re < 300$) که واکنش به سمت محصولات نهایی احتراق پیش می‌رود و در مرحله سوم که در این مرحله واکنش به صورت غیرآدیاباتیک به اتمام می‌رسد.

در مطالعه حاضر به بررسی تجربی اثر پارامترهای مختلف بر روی شعله پیش آمیخته متان- اکسیژن در داخل یک راکتور استوانه‌ای مقیاس مزو، بدون اعمال گرادیان دمایی خارجی بر روی دیواره آن پرداخته شده است. در این تحقیق اثر متغیرهایی همچون نسبت هم‌ارزی، سرعت مخلوط ورودی و نیز میزان رقیق‌سازی مخلوط ورودی با گاز نیتروژن بر روی رفتار شعله متان- اکسیژن در داخل راکتور مزو مقیاس مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

۲- شرح دستگاه آزمایش

در مطالعه حاضر، راکتور مورد مطالعه به صورت استوانه‌ای از جنس کوارتز به قطر داخلی ۵ میلی‌متر، طول ۲۰ سانتیمتر و ضخامت دیواره ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تمامی آزمایشات در دمای محیطی کنترل شده ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام

¹ - Micro Reactor

² - Meso Reactor

³ - Vicari

⁴ - Swiss Roll

⁵ - Raimondeau

⁶ - Maruta

⁷ - Richecoeur

⁸ - Fan

⁹ - Smyth and Kyritsis

گرفته‌اند. جهت عکس‌برداری مستقیم از شعله از دوربین Canon G6 با کیفیت تصویر ۷/۱ مگا پیکسل و سرعت شاتر ۱/۱۰۰ استفاده گردیده است. همچنین جهت اندازه‌گیری و کنترل جریان سیال سوخت و اکسیدکننده از دو عدد کنترل‌گر دبی دیجیتالی مدل TLFC شرکت NewFlow تایوان که مخصوص CH_4 و O_2 سفارش داده شده و توسط همان شرکت کالیبره گردیده است و دارای خطایی معادل ۰/۱ درصد کل ظرفیت اندازه‌گیری (SLM^۱) می‌باشد استفاده گردیده و برای سنجش دبی مربوط به رقیق سازها از دو عدد کنترل‌گر دبی Yamatake ژاپن که دارای با خطای ۰/۲ درصد کل ظرفیت اندازه‌گیری می‌باشد استفاده شده است. همچنین جهت بررسی نشتی و میزان آن و دقت کالیبراسیون دستگاه‌ها از دو عدد روتامتر دقیق شرکت Sibata استفاده گردیده و از فشارسنج‌های شرکت NewFlow با خطای ۰/۱ درصد کل ظرفیت اندازه‌گیری (۵ bar) جهت بررسی و کنترل فشار درون سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. شکل کلی بستر تست مورد نظر به همراه سیستم‌های اندازه‌گیری مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین جهت اطمینان از داده‌های به دست آمده و تکرار پذیر بودن آزمایش‌ها هر آزمایش حداقل دو بار صورت گرفته و در صورت تفاوت در داده‌های اندازه‌گیری آزمایش برای بار سوم تکرار گردیده است و نتایج ارائه شده حاصل از میانگین داده‌ها می‌باشد، جهت شروع آزمایش و ایجاد احتراق از یک عدد فندک پیش آمیخته که در بیرون محفظه احتراق و در انتهای محفظه احتراق روشن می‌گردد استفاده گردیده است.



شکل ۱- نمایی کلی از تجهیزات بستر تست مورد استفاده

۳- انواع رژیم‌ها و ساختارهای شعله

در این بخش، به بررسی انواع رژیم‌های مختلف شعله رویت شده در داخل راکتور مقیاس مزو تحت مطالعه و علل تشکیل آن‌ها پرداخته شده است. در ادامه سعی شده است با توجه به مشاهدات صورت گرفته در حین انجام آزمایش‌ها، علل مختلف تشکیل این نوع از شعله‌ها به اختصار بیان گردیده است.

^۱ - استاندارد لیتر بر دقیقه

۳-۱- پرش شعله^۱ (تشکیل شعله در بیرون راکتور)

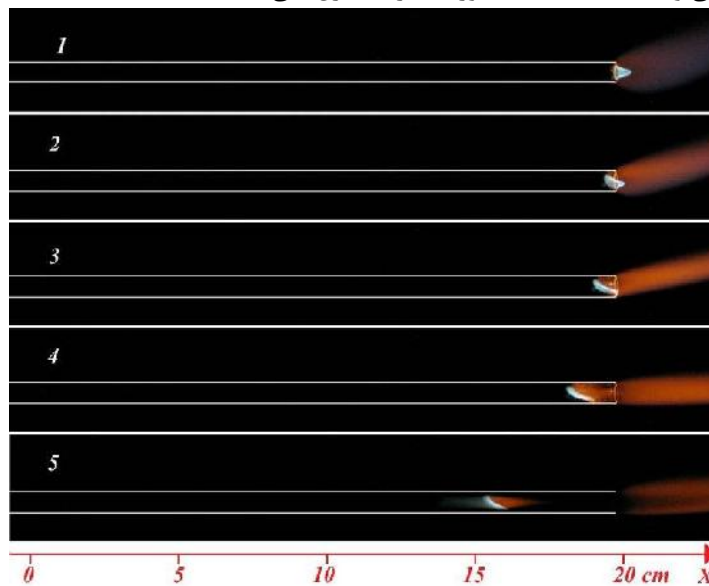
این نوع رژیم شعله زمانی رخ می‌دهد که سرعت مخلوط گازهای واکنش‌دهنده ورودی به راکتور بسیار بیشتر از سرعت سوزش مخلوط پیش آمیخته باشد. در این حالت، نحوه تشکیل شعله به گونه‌ای می‌باشد که شعله در خروجی راکتور هم تشکیل نگردیده و با جدایی و فاصله گرفتن از انتهای خروجی آن در نهایت منجر به خاموشی شعله تشکیل شده در بیرون از راکتور می‌گردد.

۳-۲- کنده شدن شعله^۲ (تشکیل شعله در بیرون و چسبیده به راکتور)

این نوع رژیم شعله زمانی رخ می‌دهد که سرعت مخلوط واکنش‌پذیر ورودی به راکتور اندکی بیش از سرعت سوزش مخلوط باشد. در این حالت، شعله در بیرون از راکتور و چسبیده به بخش انتهایی آن تشکیل می‌گردد. در این حالت اندکی افزایش و یا کاهش در سرعت مخلوط ورودی به ترتیب منجر به ایجاد برخاستگی و یا کشیدگی شعله به داخل راکتور خواهد شد.

۳-۳- شعله پایدار نامتقارن^۳

این نوع رژیم شعله زمانی رخ می‌دهد که سرعت مخلوط واکنش‌پذیر ورودی با سرعت سوزش مخلوط برابر باشد (شکل ۲). در این حالت شعله در داخل راکتور تشکیل می‌گردد. ولی به علت اثرات مختلفی همچون گرادیان دمایی بر روی دیواره محفظه احتراق، اثرات بویانسی و ... شعله نسبت به محور X دارای تقارن نمی‌باشد.



شکل ۲- رژیم شعله پایدار نامتقارن.

۳-۴- شعله نوسانی^۴

یکی دیگر از رژیم‌های شعله قابل مشاهده در راکتورهای مقیاس مزو، شعله‌های نوسانی می‌باشد. زمانی که دمای محلی دیواره در یک راکتور مقیاس مزو و یا میکرو به دمای خود اشتعالی برسد و همزمان سرعت جریان کمی کمتر از سرعت سوزش

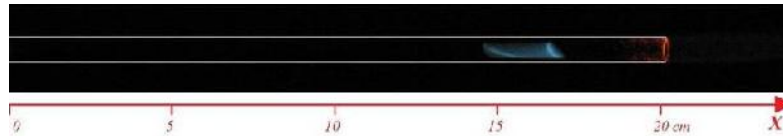
¹ - Blow Out

² - Attached Flame

³ - Steady Non-Axisymmetric Flames

⁴ - Repetitive Extinction and Re-ignition

مخلوط باشد، شعله در داخل راکتور ایجاد شده و به سمت بالا دست جریان حرکت می‌کند. اما چنانچه دمای دیواره و یا عرض راکتور در بالادست جریان کاهش یابد شعله خاموش می‌گردد. اما از آنجا که دمای دیواره در پایین دست جریان همچنان بالا می‌باشد، بعد از خاموشی شعله در بالادست جریان، مخلوط تازه به مکانی می‌رسد که دمای دیواره راکتور بیشتر از دمای اشتعال می‌باشد و از این رو مخلوط دوباره مشتعل می‌شود. تکرار این سیکل منجر به ایجاد یک رژیم شعله جدید در راکتورهای مقیاس مزو و میکرو به نام شعله نوسانی می‌شود. (شکل ۳)



شکل ۳- رژیم شعله نوسانی (Repetitive Extinction and Re-ignition).

۳-۵- پس زنی شعله^۱

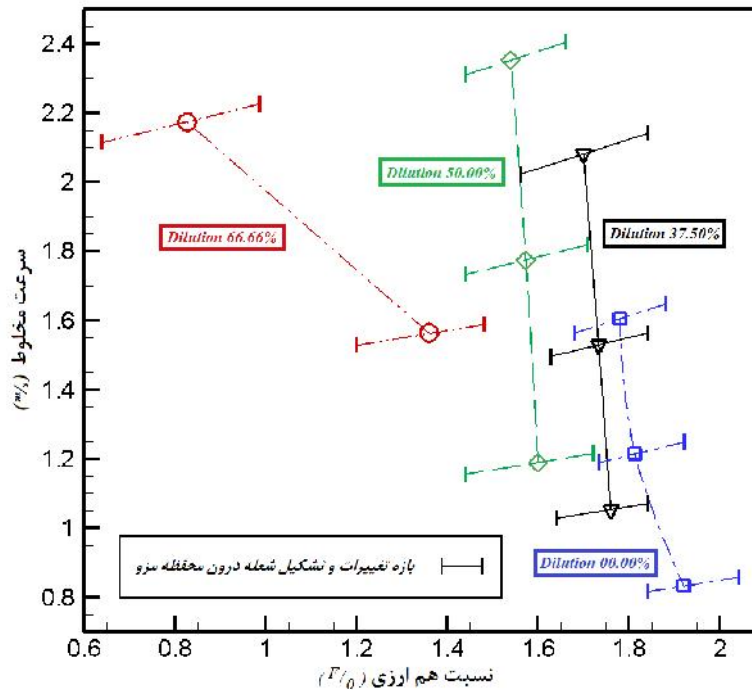
یکی دیگر از پدیده‌هایی که در داخل راکتورهای مقیاس مزو و یا میکرو به وقوع می‌پیوندد، رژیم پس زنی شعله می‌باشد. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که سرعت مخلوط واکنش دهنده ورودی به راکتور از سرعت سوزش مخلوط ورودی کمتر باشد. در این حالت شعله به سمت بالا دست جریان و راکتور پیش آمیخته حرکت می‌کند. وقوع این پدیده بسیار سریع می‌باشد. به نحوی که وقوع آن با ایجاد صدای شدیداً انفجارگونه همراه خواهد بود.

۴- بررسی اثر رقیق‌سازی و نسبت هم‌ارزی سوخت به اکسید کننده بر احتراق در محفظه مزو

بررسی اثر رقیق‌سازی مخلوط متان-اکسیژن با نیتروژن و تاثیر آن بر فرآیند احتراق در داخل راکتور مقیاس مزو در این بخش مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهند که با توجه به دمای احتراق آدیاباتیک متان - اکسیژن که بیش از ۳۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، گاز نیتروژنی که به عنوان رقیق‌ساز مورد استفاده قرار گرفته است، قسمتی از آن وارد چرخه واکنش می‌گردد. از این رو، از آنجا که ورود نیتروژن به چرخه واکنشی در جبهه شعله و یا نواحی پس شعله، تابعی از دما می‌باشد، لذا وقوع یک چنین پدیده‌ای باعث ایجاد تغییرات در دمای درون راکتور و به طبع آن تغییر در شار حرارتی و انتقال حرارت از دیواره‌های راکتور به محیط شده که این مهم موجب ایجاد تغییراتی در فیزیک و دینامیک شعله در داخل راکتورهای مقیاس مزو می‌گردد، که در ادامه به این تغییرات پرداخته شده است.

نمودارهای شکل‌های ۴ و ۵ برای سه مقدار دبی حجمی اکسیژن ورودی مختلف ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ لیتر بر دقیقه استخراج شده‌اند. عدد رینولدز مخلوط در نواحی تشکیل شعله برای حالت‌های مختلف در حدود $250 < Re < 800$ متغیر می‌باشد. در شکل ۴ تغییرات سرعت مخلوط در بازه نواحی تشکیل شعله درون محفظه احتراق مزو نسبت به نسبت هم‌ارزی متان به اکسیژن در درصد رقیق‌سازی‌های مختلف نشان داده شده است، همانگون که از شکل نمایان است با افزایش نسبت رقیق‌سازی و به همراه آن افزایش سرعت مخلوط شعله جهت ایجاد و تشکیل درون محفظه احتراق مزو به سمت کاهش نسبت هم‌ارزی سوخت به اکسیژن و نزدیک شده به حالت استوکیومتری جهت افزایش سرعت سوزش میل می‌کند.

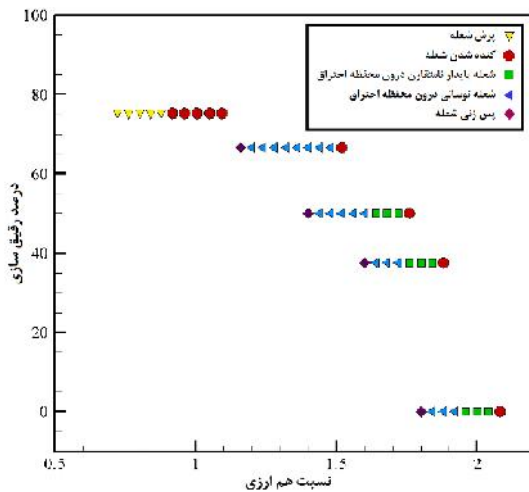
¹ - Flash Back



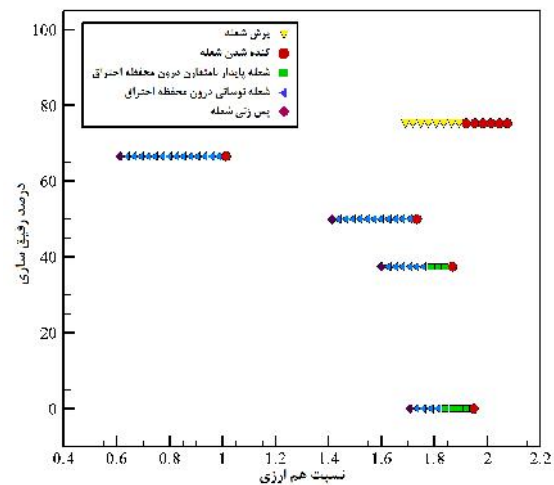
شکل ۴ - نمودار تغییرات سرعت مخلوط در بازه نواحی تشکیل شعله درون محفظه احتراق مزو نسبت به نسبت هم ارزی متان به اکسیژن در درصد رقیق سازی های مختلف

همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می گردد، با کاهش درصد رقیق سازی و افزایش نسبت هم ارزی مابین سوخت و اکسیدکننده شاهد بهبود در افزایش بازه های نسبت هم ارزی جهت ایجاد تشکیل شعله های پایدار و نوسانی در داخل محفظه احتراق مزو می باشیم. دلیل اصلی بروز یک چنین پدیده ای را می توان مستقیماً به توازن ایجاد می مابین سرعت سوزش و جریان مخلوط ورودی مرتبط دانست. از یک سو، کاهش میزان درصد رقیق سازی در مخلوط ورودی منجر به افزایش شدید در سرعت سوزش مخلوط ورودی شده و از سوی دیگر افزایش نسبت هم ارزی به سمت یک مخلوط بسیار غنی از سوخت منجر به کاهش سرعت سوزش مخلوط و همزمان افزایش نسبی در سرعت مخلوط ورودی به محفظه احتراق میکرو مقیاس می گردد. به بیان دیگر، می توان اظهار داشت که تأثیر رقیق سازی بر روی میزان حرارت آزاد شده ناشی از احتراق مخلوط ورودی بسیار شدید و تأثیر گذار می باشد. به نحوی که افزایش میزان درصد حجمی رقیق ساز نیتروژن در مخلوط ورودی ضمن افزایش محسوس و چشمگیر سرعت مخلوط ورودی و همچنین کاهش سرعت سوزش مخلوط تضعیف شده ورودی، منجر به کاهش شدید در سطح حرارت آزاد شده از مخلوط واکنش دهنده ورودی به نرخ حجمی ورودی به راکتور می گردد. از سوی دیگر، با فرض عدم شرکت رقیق ساز در فرآیند شیمیایی احتراق، وجود گازی این چنین در ناحیه شعله موجب کاهش قابل ملاحظه در سطح دمایی شعله در داخل راکتور مقیاس مزو و یا میکرو شده و از این طریق به تضعیف تشکیل شعله در داخل راکتور مقیاس مزو و یا میکرو کمک می نماید. مطابق شکل ۵ (الف)، هر چند کاهش درصد حجمی رقیق ساز همراه با افزایش نسبت هم ارزی به سمت مخلوط فوق غنی از سوخت منجر به گسترش نواحی شعله پایدار و نوسانی شده است ولی در نسبت رقیق سازی ۷۵ درصد، افزایش نسبت هم ارزی به سمت مخلوط فوق غنی از سوخت به دلیل کاهش مضاعف در سرعت سوزش مخلوط در مقابل افزایش مضاعف سرعت جریان مخلوط ورودی به راکتور منجر به از بین رفتن تشکیل رژیم شعله نوسانی در راکتور مقیاس مزو در مقایسه با حالت درصد رقیق سازی ۶۶/۶۶ درصد حجمی گردیده است. شکل ۵ (الف) به خوبی نشان می دهد که چگونه تقابل میزان درصد حجمی رقیق ساز و نسبت هم ارزی می تواند ویژگی شعله های قابل تشکیل در داخل یک راکتور مقیاس مزو و

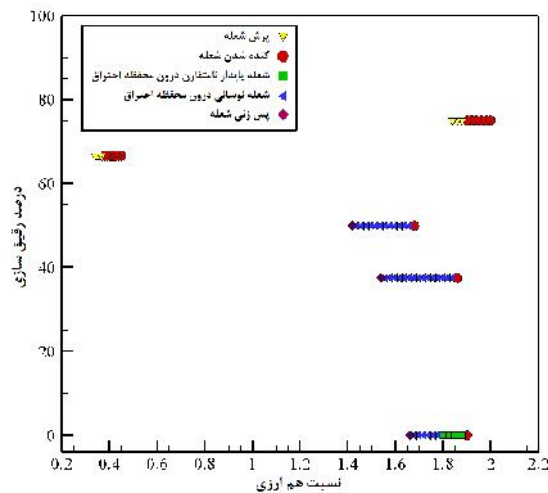
یا میکرو را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین با تعقیب روند تغییرات رژیم‌های شعله تشکیل شده در داخل راکتور مقیاس مزو در نمودارهای مربوط به شکل‌های ۵(ب) و ۵(ج) می‌توان دریافت که وضعیت روند کلی تغییرات برای هر سه حالت دبی حجمی جریان مربوط به اکسیژن مشابه بوده و در تمامی آن‌ها کاهش میزان درصد حجمی رقیق‌ساز و همزمان افزایش نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی به سمت یک مخلوط غنی از سوخت منجر به گسترش تشکیل نواحی شعله پایدار و نوسانی در داخل راکتور شده است. هرچند که در حالت شعله نوسانی، میزان درصد رقیق‌ساز می‌تواند فرکانس نوسانات را در داخل راکتور مقیاس مزو و یا میکرو تحت تأثیر قرار دهد که این موضوع می‌بایست در تحقیقات آتی مورد بررسی و تحقیق قرار گیرد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵- نمودار تغییر رژیم‌های شعله در داخل یک راکتور مقیاس مزو به صورت تابعی از رقیق‌سازی مخلوط ورودی با گاز نیتروژن و نسبت هم‌ارزی مخلوط در حالت (الف) دبی اکسیژن ثابت $SLM_0/5$ ، (ب) دبی اکسیژن ثابت $SLM_0/75$ ، (ج) دبی اکسیژن ثابت SLM_1

۹- نتیجه گیری

در این پژوهش تجربی، به بررسی انواع رژیم‌ها رویت شده در داخل یک راکتور مقیاس مزو و عوامل ایجاد آن‌ها پرداخته شده است. همچنین پارامترهای مختلف موثر بر خواص شعله پایدار و نوسانی، مورد مطالعه قرار گرفته و نمودارهای مختلف و نحوه چگونگی تغییرات رفتار شعله در قبال تغییرات نسبت هم‌ارزی، میزان رقیق‌سازی مخلوط ورودی با گاز نیتروژن بررسی شده و



می‌توان بیان داشت که با بالا رفتن سرعت مخلوط ورودی به راکتور، نواحی مربوط به شعله‌های پایدار و نوسانی کم می‌شود. به نحوی که حتی در نسبت‌های هم‌ارزی نزدیک به استوکیومتری نیز دیگر احتراق درون راکتور مقیاس مزو و یا میکرو رخ نخواهد داد. از این رو می‌توان بیان داشت که با افزایش سرعت مخلوط ورودی، برای جبران این افزایش و برقراری تعادل مابین سرعت سوزش و جریان مخلوط ورودی به راکتور و تشکیل شعله درون آن نیاز به سرعت سوزش بالاتری است. مهیا نمودن یک چنین شرایطی در نسبت‌های هم‌ارزی پایین و نزدیک به حالت استوکیومتری امکان پذیر می‌باشد. به همین علت با افزایش سرعت مخلوط ورودی، برای تشکیل شعله درون راکتور مقیاس مزو، باید از نسبت هم‌ارزی مخلوط ورودی کاسته شود. از طرفی با افزایش سرعت مخلوط ورودی، امکان تشکیل شعله پایدار در داخل راکتور کمتر شده و شعله غالباً به صورت شعله نوسانی تشکیل می‌گردد. با رقیق‌سازی مخلوط ورودی توسط نیتروژن و نیز بالا رفتن سرعت مخلوط ورودی، نواحی مربوط به تشکیل شعله پایدار و نوسانی محدود می‌شود. با افزایش سطح سرعت مخلوط ورودی و نیز افزایش دبی اکسیژن، برای ایجاد شعله در داخل راکتور باید سرعت سوزش مخلوط افزایش یابد تا بتواند افزایش سرعت مخلوط را جبران نماید. این افزایش در سطح سرعت سوزش برای نسبت‌های هم‌ارزی نزدیک‌تر به حالت استوکیومتری رخ خواهد داد. با افزایش سطح رقیق‌سازی و به طبع آن افزایش سرعت مخلوط ورودی، در مقادیر دبی اکسیژن بالاتر شرایط به نحوی می‌گردد که با توجه به سرعت مخلوط و سرعت سوزش آن، دیگر امکان تشکیل شعله در درون راکتور مقیاس مزو و یا میکرو میسر نخواهد بود.

مراجع

- [1] Waitz, I. A., Gauba, G., and Tzeng, Y.S., "Combustors for Micro-Gas Turbine Engines, Journal of Fluids Engineering", Vol. 120, pp.109-117, 1998.
- [2] Davy, H., "Some Researches on Flame", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 107, pp.45-76, 1817.
- [3] Roshenry, C.G., "Preliminary study of a Micro-Gas Turbine Engine." S. M. Thesis Massachusetts Institute of Technology. 1995.
- [4] Sarrafan Sadeghi, S., Tabejamaat, S., "An Experimental Study of the Micro-Combustion Chamber", Msc Thesis, Iran, Aerospace Department of Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), February 2013.
- [5] Hua, J., Wu, M., and Kumar, K., "Numerical Simulation of the Combustion of Hydrogen-Air Mixture in Micro-Scaled Chambers Part II: CFD Analysis for a Micro-Combustor", *Chemical Engineering Science*, Vol.60, pp.3507-3515, 2005.
- [6] Kim, N.I., Maruta, K., "A Numerical Study on Propagation of Premixed Flames in Small Tubes, Combustion and Flame", Vol. 146, pp.283-301, 2006.
- [7] J. Vican, B.F. Gajdeczko, F.L. Dryer, D.L. Milius, I.A. Aksay and R.A. Yetter, "Development of a Microreactors a Thermal Source for MicroElectroMechanical Systems Power Generator", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, pp.909-916, 2002.
- [8] Raimondeau, S.N., Vlachos, D.G., Masel, R.I., "Modeling of High Temperature Microburners", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, 901-907, 2002.
- [9] Maruta, K., Kataoka, T., Kim, N.I., Minaev, S., Fursenko, R., "Characteristics of Combustion in a Narrow Channel with a Temperature Gradient", *Proceedings of the combustion institute*, Vol. 30, pp.2429-2436, 2005.
- [10] Richecoeur, F., Kyritsis, D.C., "Experimental Study of Flame Stabilization in Low Reynolds and Dean Number Flows in Curved Mesoscale Ducts", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 2419-2427, 2005.
- [11] Fan, Y., Suzuki, Y., Kasagi, N., "Experimental Study of Micro-Scale Premixed Flame in Quartz Channels", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, pp. 3083-3090, 2009.
- [12] Smyth, S.A., Kyritsis, D.C., "Experimental Determination of the Structure of Catalytic Micro-Combustion Flows Over Small-Scale Flat Plates for Methane and Propane Fuel", *Combustion and Flame*, Vol. 159, pp. 802-816, 2012.