



# Experimental Study of the Effect of Inlet Flow Characteristics and Chamber Length on Partially Premixed Flame Dynamics, in the Mesoscale Cylindrical Reactor of Constant Diameter with Different Lengths

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Zargarbashi A.<sup>1</sup> Msc,  
Tabejamaat S.<sup>1</sup> Phd,  
Sadeghi S.S.\*<sup>1</sup> Msc,  
Sheykhabaglou S.<sup>1</sup> Msc

### How to cite this article

Zargarbashi A, Tabejamaat S, Sadeghi S.S, Sheykhabaglou S. Experimental Study of the Effect of Inlet Flow Characteristics and Chamber Length on Partially Premixed Flame Dynamics, in the Mesoscale Cylindrical Reactor of Constant Diameter with Different Lengths. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(12): 2697-2708

<sup>1</sup>Department of Aerospace engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

### \*Correspondence

Address: Department of Aerospace engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.  
Phone: +98 (21) 64543212  
Fax: -  
soroush.s.s@aut.ac.ir

### Article History

Received: May 19, 2020  
Accepted: November 03, 2020  
ePublished: December 20, 2020

## ABSTRACT

In this paper, the experimental study of partially premixed combustion of pure methane/oxygen has been implemented in a 5 mm diameter meso-scale quartz reactor that has 1 mm wall thickness and 5, 10, and 15 cm lengths. Mixing ratios of 25%, 50% and 75% have been used for partially premixed combustion tests. Experimental results including the factors affecting flame regimes, formation range, flame dynamics, and the outer wall temperature distribution of the reactor have been analyzed. The tests were performed in an axisymmetrically centered cylinder combustion chamber (uniform co-axial flow) and laminar flow regimes. In most partially premixed combustion experiments, the Repetitive Extinction and Re-Ignition (RERI) flame, which had an optimal heat distribution throughout the reactor, have been observed. The flame dynamics were mostly affected by changes in mixing ratio, reactor length, oxygen flow rate, and finally fuel flow rate (equivalence ratio) respectively. Also, observations revealed that by increasing the reactor length due to the appropriate time for homogenization of the mixture, differences in the flame formation interval were reduced in different ratios of the reactant pre-mixes.

**Keywords** Meso Combustion; Methane; Oxygen; Partial Premixed Combustion; Flame Dynamics

## CITATION LINKS

[1] Combustors for micro-gas turbine engines [2] A computational fluid dynamics study... [3] Flame and combustion [4] Preliminary design study of a micro-gas turbine engine [5] Numerical simulation of the combustion of hydrogen-air mixture... [6] A numerical study on propagation of premixed flames in small tubes [7] A catalytic combustor for microscale applications [8] Combustion in micro-cylindrical combustors... [9] Modeling of high-temperature microburners [10] Effect of Structural Heat Conduction on the Power Density of Micro-Combustors [11] The role of structural heat exchange and heat loss in the design of efficient silicon micro-combustors [12] Characteristics of combustion in a narrow channel with a temperature gradient [13] Experimental study of flame stabilization in low Reynolds and Dean number flows in curved mesoscale ducts [14] Experimental study of spinning combustion in a mesoscale divergent channel [15] Experimental study of micro-scale premixed flame in quartz channels [16] Experimental determination of the structure of catalytic micro-combustion flows... [17] An experimental study of the effects of equivalence ratio, mixture velocity and nitrogen dilution... [18] Combustion characteristics of non-premixed methane micro-jet flame... [19] Microcombustion for micro-tubular flame-assisted fuel cell power and heat cogeneration [20] Numerical Simulation Of The Effective Parameters On The Stability Of Stoichiometric CH<sub>4</sub>/air Premixed Combustion In A Micro-combustion Chamber [21] Numerical study of the effects of heat transfer methods on CH<sub>4</sub>/(CH<sub>4</sub>+ H<sub>2</sub>)-AIR pre-mixed flames in a micro-stepped tube [22] An Experimental Study of the Micro-Combustion Chamber [23] Laboratory test bed of micro-combustion in micro and meso scale reactor [24] An experimental study of methane-oxygen-carbon dioxide premixed flame dynamics... [25] Experimental study of the effects of geometrical parameters, Reynolds number, and equivalence ratio on methane-oxygen premixed flame dynamics... [26] Experimental study on the effects of mixture flow rate, equivalence ratio, oxygen enhancement, and geometrical parameters... [27] Effects of heat and momentum losses on the stability of premixed flames in a narrow channel

## بررسی تجربی اثر مشخصه‌های جریان ورودی و طول محفظه بر دینامیک شعله پیش‌آمیخته جزئی در راکتورهای ابعاد مزو استوانه‌ای شکل با قطر ثابت و طول‌های مختلف

علی زرگرباشی MSc

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

صادق تابع جماعت PhD

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

سروش صرافان صادقی \* MSc

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

سروش شیخ‌بگلو MSc

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

در این مطالعه، به بررسی تجربی احتراق پیش‌آمیخته جزئی متان و اکسیژن خالص، درون یک راکتور کوارتز مقیاس مزو با قطر داخلی ۵ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۱ میلی‌متر با طول‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر و نسبت اختلاط‌های ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها اعم از عوامل مؤثر بر رژیم‌های شعله، محدوده تشکیل هر کدام، دینامیک شعله و توزیع دمای دیواره خارجی راکتور، تحلیل و گزارش شده است. آزمون‌های فوق در محفظه احتراق استوانه‌ای هم‌مرکز متقارن محوری و در رژیم جریان آرام صورت گرفته است. در اکثر آزمایش‌ها، رژیم شعله نوسانی بوده و همین عامل باعث گردیده تا توزیع حرارت یکنواخت‌تری در طول راکتور مشاهده گردد. دینامیک این شعله به ترتیب از تغییرات نسبت اختلاط، طول راکتور، دبی حجمی اکسیژن و نهایتاً دبی حجمی سوخت، که باعث تغییرات در سرعت جریان ورودی و نسبت هم‌ارزی می‌گردد بیشتر اثر می‌پذیرد. همچنین مشاهده شد با افزایش طول راکتور، به علت فراهم شدن زمان مناسب جهت همگن شدن مخلوط، تفاوت‌ها در بازه تشکیل شعله در نسبت‌های پیش‌اختلاط مختلف کم می‌گردد.

**کلیدواژه‌ها:** احتراق متان-اکسیژن، راکتور استوانه‌ای ابعاد مزو، احتراق پیش‌آمیخته جزئی، دینامیک شعله

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۱۳

\* نویسنده مسئول: soroush.s@aut.ac.ir

### 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 و 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. این مهم با توجه به ارزان و در دسترس بودن و نیز داشتن مقدار چگالی انرژی بالا در واحد حجم سوخت‌های هیدروکربنی در مقایسه با

پیشرفته‌ترین باتری‌های شیمیایی موجود بسیار حائز اهمیت می‌باشد<sup>[1]</sup>. از این‌رو، به‌کارگیری سوخت‌های هیدروکربنی در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی به عنوان یک راهکار برای نیل به تولید توان و دیگر زمینه‌های مرتبط با آن در حال گسترش می‌باشد<sup>[1]</sup>. با توجه به تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته از منظر احتراق کلاسیک در گذشته، غیر ممکن است بتوان در ابعاد میلی‌متری که به عنوان فاصله یا قطر خاموشی مطرح هستند احتراق پایدار ایجاد کرد<sup>[2]</sup>. یکی از موانع ایجاد احتراق پایدار در داخل راکتورهایی با این مقیاس، وجود برهم‌کنش‌های حرارتی و شیمیایی قوی مابین شعله و دیواره‌های راکتور، به دلیل نزدیکی شعله به دیواره جامد و وقوع پدیده فروکشی شعله می‌باشد. در نزدیکی یک سطح جامد، اتلاف گرما آنچنان بالا است که فروکشی یا خاموشی شعله رخ خواهد داد<sup>[3]</sup>. با کاهش اندازه راکتور، کویلینگ حرارتی مابین شعله و ساختار جامد دیواره آن ایجاد می‌گردد. وجود کویلینگ 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 پیش‌آمیخته آرام، تئوری‌های متداول قادر به توضیح و تحلیل جزئیات پدیده‌های احتراقی در داخل این دسته از محفظه‌های احتراق نمی‌باشند<sup>[4]</sup>.

بر این اساس، از حدود سال ۱۹۹۰ 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 شد و پس از آن، مطالعه در زمینه محفظه‌های احتراق میلی‌متری و میکرونی با رویکرد پدیده شناسی و کاربردی آغاز گردید<sup>[4]</sup>. با توجه به مطالعات انجام گرفته، تعاریف متفاوتی برای احتراق در راکتورها و محفظه‌های احتراقی که دارای ابعاد مشخصه‌ای نزدیک به ضخامت شعله پیش‌آمیخته آرام می‌باشند، بیان شده است. بر اساس تعاریف ارائه شده، چنانچه قطر راکتور کمتر از ۱ میلی‌متر باشد به آن راکتور میکرو (Micro reactor) و چنانچه قطر آن بین ۱ میلی‌متر تا ۱ سانتی‌متر باشد به آن راکتور مزو (Meso reactor) مقیاس گفته می‌شود<sup>[5]</sup>. 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 می‌باشد<sup>[6]</sup>. 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، بر این اساس اگر نسبت سطح به حجم محفظه، بیش از ۲۰۰۰ باشد، احتراق میکرو، و اگر از مرتبه ۱۰۰۰ باشد، احتراق مزو نامیده می‌شود<sup>[6]</sup>.

۱/۵ میلی‌متری پرداخته‌اند. ایشان دریافتند که دمای دیواره راکتور اثر مستقیم بر نحوه سوزش و فرکانس شعله در احتراق نوسانی دارد.

بررسی اثر احتراق با استفاده از کاتالیزور بر روی رفتار و ساختار شعله متان/پروپان-هوا در داخل رآکتورهای کانالی دو بعدی توسط اسمیت و کریستیس<sup>[16]</sup> انجام شده است. تحقیقات تجربی ایشان واکنش‌های به وقوع پیوسته بر روی سطح یک کاتالیزور جهت سوخت پروپان در یک میکرو راکتور را به سه مرحله تقسیم‌بندی کرده و تشریح کردند، بر این اساس مرحله اول در رژیم‌های جریانی  $Re < 100$  بوده و در مجاورت بسیار نزدیک لبه ابتدایی کاتالیزور تشکیل می‌گردد که در این مرحله شاهد افزایش دمای شدید همراه با کاهش سریع موازنه مواد واکنش دهنده و افزایش سرعت گاز در حدود ۲۵٪ سرعت جریان آزاد آن می‌باشد، مرحله دوم در رژیم جریانی  $Re < 300$  بوده که واکنش به سمت محصولات نهایی احتراق پیش می‌رود و در مرحله سوم واکنش به صورت غیرآدیباتیک به اتمام می‌رسد. صرافان صادقی و همکاران<sup>[17]</sup> به بررسی اثر نسبت هم‌ارزی، عدد رینولدز ( Reynolds number) مخلوط ورودی و درصد رقیق‌سازی نیتروژن بر دینامیک شعله مخلوط پیش‌آمیخته متان-اکسیژن در راکتور استوانه‌ای با قطر ۵ میلی‌متر از جنس کوارتز در مقیاس مزو پرداختند. براساس نتایج آزمایش‌های آنها، تشکیل شعله پایدار یا شعله خاموش-شونده و روشن‌شونده تکرارپذیر در داخل راکتور، با افزایش عدد رینولدز محدود می‌شود، به طوری که ممکن است با افزایش سرعت جریان در داخل راکتور، حتی در نسبت هم‌ارزی‌های نزدیک به حالت استوکیومتریک شعله در داخل راکتور تشکیل نگردد. بر اساس آزمایش‌های آنها همچنین رقیق‌سازی با نیتروژن، باعث افزایش قابل توجه زمان شروع واکنش در داخل راکتور می‌گردد. همچنین دریافتند سرعت شعله با تغییرات نسبت هم‌ارزی متناسب بوده و با افزایش درصد رقیق‌سازی نیتروژن، کاهش می‌یابد. لی و همکاران<sup>[18]</sup> مشخصات احتراقی شعله میکروجت متان غیرپیش‌آمیخته در جریان هم‌محور هوا را به شکل تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنان در پژوهش خود اثر برهم‌کنش گرمایی شعله و لوله جامد را مدنظر قرار دادند و چهار نوع رژیم شعله را بر اساس بازه‌های مختلف سرعت جریان سوخت، در آزمایش‌ها مشاهده کردند. چهار رژیم شعله مشاهده شده توسط آنان عبارتند از: شعله جداشونده، چسبیده، نیم‌کروی (Hemisphere) و شعله چتری شکل. در بررسی‌های و نتایج محاسباتی آنان توزیع رادیکال‌های OH (Radical) و CH با نتایج تجربی دارای سازگاری مناسبی بوده است. میلکرک و همکاران<sup>[19]</sup> به بررسی محفظه‌های احتراق میکرو لوله‌ای جهت کاربردهای سلول‌های توان و گرمایی به تحقیق پرداختند و در نهایت آن‌ها موفق شدند یک سلول سوختی مبتنی بر میکروسیستم غیرکاتالیزوری برای استفاده مستقیم از هیدروکربن‌ها برای تولید برق پیشنهاد دهند.

در این راستا پترسون و واندرهوف<sup>[7]</sup>، احتراق با استفاده از کاتالیزور را در داخل یک میکرو راکتور به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. ایشان در طی تحقیق خود به مطالعه خواص احتراق هیدروژن با هوا در داخل یک لوله کوارتزی به قطر داخلی ۰/۵۲ میلی‌متر و قطر خارجی ۰/۶۲ میلی‌متر پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که در شرایط احتراق میکرو هیدروژن با هوا، ۳۰ درصد از انرژی تولیدی در داخل راکتور، به وسیله انتقال حرارت جابجایی از طریق دیواره‌های خارجی آن تلف می‌گردد. یانگ و همکاران<sup>[8]</sup> بر روی تأثیر ایجاد پله و تغییر قطر در ابتدای ورودی مخلوط به محفظه احتراق استوانه‌ای از جنس فولاد برای استفاده در سیستم‌های ام-تی پی وی (Micro-Thermophotovoltaic) در احتراق هیدروژن - هوا پرداختند. ریموندو و همکاران<sup>[9]</sup> با انجام یک سری تحقیقات نشان دادند که از بین رفتن رادیکال‌ها در مجاورت دیواره راکتور، نقش مهمی در عدم انتشار شعله در داخل رآکتورهای مقیاس کوچک دارد. همچنین، لیچ و کادو<sup>[10,11]</sup> نشان دادند که هدایت حرارتی درون دیواره‌های راکتور نقش مهمی در تعیین عملکرد یک میکرو و یا مزو راکتور دارد. ایشان با ارائه مدلی مشتمل بر دو صفحه بینهایت و در نظر گرفتن شعله مابین این دو صفحه نشان دادند که هدایت حرارتی در راستای دیواره راکتور موجب گسترش ناحیه واکنش و در نتیجه افزایش نرخ سوزش مخلوط در داخل یک میکرو-مزو راکتور می‌شود. ماروتا و همکاران<sup>[12]</sup> به بررسی احتراق پیش‌آمیخته در یک راکتور استوانه-ای 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 پیش‌آمیخته در داخل رآکتورهای خمیده مقیاس مزو و میکرو توسط ریچیکور و همکاران<sup>[13]</sup> انجام شده است. آن‌ها دریافتند که خمیدگی بیشتر راکتور باعث کاهش ضخامت شعله، آمیختگی بهتر و افزایش پایداری شعله می‌گردد. در تحقیقی دیگر، جو و ژو<sup>[14]</sup> به مطالعه انتشار شعله پیش‌آمیخته متان و پروپان-هوا در لوله کوارتز و اگر پرداختند و توانستند شعله پایدار صفحه‌ای و شعله چرخشی را در مقیاس مزو مشاهده کنند و نیز دریافتند که شعله چرخشی برای مخلوط‌های فقیر/غنی از سوخت متان-هوا و پروپان-هوا وجود دارد. شعله چرخشی به علت انشعاب شعله و جفت‌شدگی حرارتی قوی بین شعله و دیواره ایجاد می‌شود و در عده‌های لوئیس مختلفی رخ می‌دهد. جهت چرخش شعله بستگی به نحوه شکل-گیری اولیه آن دارد و هم می‌تواند به صورت ساعتگرد و یا پادساعتگرد باشد. سرعت جریان بحرانی-که در آن شعله شروع به چرخش می‌کند- به شدت وابسته به نسبت هم‌ارزی بوده و نرخ چرخش تقریباً متناسب با سرعت شعله می‌باشد. همچنین، فن و همکاران<sup>[15]</sup> به مطالعه بر روی احتراق متان-هوا در داخل رآکتورهای کوارتزی میکرو مقیاس با قطرهای داخلی ۰/۷، ۱/۰ و

پیمایش و فرکانس شعله خاموش‌شونده و روشن‌شونده تکرارپذیر، با حرارت دادن به دیواره راکتور و همچنین افزایش طول آن، به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین افزودن کربن‌دی‌اکسید به مخلوط متان-اکسیژن، اثر قابل توجهی بر شکل شعله، به ویژه شعله ایستا دارد.

با وجود تحقیقات گسترده صورت گرفته در حوزه پدیده‌شناسی و دینامیک شعله‌های میکرو، هنوز کلیه ابعاد آن به طور کامل توسط محققان مورد بررسی و مطالعه قرار نگرفته‌است. از آن جمله می‌توان به دینامیک شعله‌های پیش‌مخلوط جزئی اشاره کرد. شعله‌های پیش‌مخلوط دارای راندمان احتراقی بیشتر و آلاینده‌های کمتر می‌باشند اما به دلیل احتمال انفجار در بیشتر تجهیزات صنعتی از شعله‌های غیر پیش‌مخلوط استفاده می‌شود. برای استفاده از مزایای هر دو شعله پیش‌مخلوط و غیر پیش‌مخلوط می‌توان از شعله‌های پیش‌مخلوط جزئی استفاده کرد؛ بدین صورت که مقداری از اکسیدکننده، قبل از فرایند احتراق به سوخت اضافه می‌شود و بقیه اکسیدکننده به شکل روش‌های احتراق غیرپیش‌مخلوط به شعله اضافه می‌گردد. با توجه به دشواری‌های موجود در مسیر ایجاد و کنترل شعله متان-اکسیژن به صورت تجربی در داخل راکتورهای مقیاس مزو و میکرو، بررسی رفتار دینامیکی شعله پیش‌آمیخته جزئی کمتر مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است. از این رو، در ادامه پژوهش‌های تجربی صورت گرفته در آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشکده هوافضا دانشگاه صنعتی امیرکبیر و در تکمیل زنجیره مطالعات صورت گرفته به بررسی تجربی اثر پارامترهای مختلف بر روی شعله پیش‌آمیخته جزئی متان-اکسیژن در داخل یک راکتور استوانه‌ای مقیاس مزو پرداخته شده است. در این تحقیق اثر متغیرهایی همچون نسبت هم‌ارزی، سرعت مخلوط ورودی، نسبت پیش‌آمیختگی جزئی و اثر طول محفظه بر روی احتراق متان - اکسیژن در داخل راکتور مزو مقیاس مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

## ۲-بستر آزمون

بستر آزمون، تجهیزات نصب شده بر روی آن و مشخصات و دقت اندازه‌گیری آن‌ها، تأثیر بسزایی بر کیفیت آزمایش‌ها و حصول نتایج دقیق و مطلوب دارد. بستر آزمون احتراق خرد در آزمایشگاه احتراق دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران) ساخته و استقرار یافته است. این بستر در سال ۱۳۸۹ ساخته شده است. در شکل ۱ نمای از بستر اولیه ساخته شده نشان داده شده است، جهت انجام این پژوهش، روزرسانی‌هایی در قسمت محفظه احتراق و محفظه اختلاط سوخت و اکسیدکننده صورت گرفته است که نماهای شماتیک و سه بعدی از آن‌ها نشان داده شده است.

در دانشکده هوافضا دانشگاه صنعتی امیرکبیر ایران از سال ۲۰۱۰ تا اکنون پژوهش‌های متعددی به شکل تئوری و تجربی بر روی پدیده‌شناسی و بررسی رفتار و دینامیک شعله‌های میکرو و مزو صورت گرفته است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به تحقیق زروندی و همکاران<sup>[20]</sup> اشاره کرد. آنها به مطالعه عددی احتراق جریان کاملاً آرام، استوکیومتری پیش اختلاط متان-هوا در یک محفظه احتراق دو بعدی پرداختند. ایشان در طی تحقیقات خود اثر سرعت ورودی مواد واکنش دهنده، ضخامت دیواره محفظه احتراق، ضریب رسانایی گرمایی دیواره محفظه احتراق و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی دیواره خارجی محفظه احتراق میکرو را بر توزیع دما و محل شعله در داخل یک محفظه احتراق میکرو دو بعدی را مورد بحث و بررسی قرار دادند. همچنین آنها<sup>[21]</sup> در سال ۲۰۱۲ به مطالعه عددی بر روی تأثیر ایجاد پله در جریان ورودی به محفظه احتراق خرد و نقش آن بر اختلاط بهتر و تشکیل شعله در محفظه‌های احتراق استوانه‌ای پرداختند. آن‌ها دریافتند ایجاد پله باعث اختلاط بهتر مخلوط و پایداری بیشتر شعله می‌شود. همچنین آنها دریافتند اضافه کردن هیدروژن، علاوه بر پایدارکردن هرچه بیشتر شعله، استفاده از این نوع محفظه‌ها را برای ترموفتولتائیک ژنراتورها مناسب‌تر می‌کند. از کارهای تجربی صورت گرفته در این آزمایشگاه می‌توان به کارهای صرافان صادقی و همکاران<sup>[22,23]</sup> که از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ به پژوهش پرداختند اشاره کرد، آنها به بررسی اثر نسبت هم‌ارزی، عدد رینولدز مخلوط ورودی و درصد رقیق‌سازی نیتروژن بر دینامیک شعله مخلوط پیش‌آمیخته متان-اکسیژن در راکتور استوانه‌ای از جنس کوارتز در مقیاس مزو پرداختند. براساس نتایج آزمایش‌های آنها، تشکیل شعله پایدار یا شعله خاموش‌شونده و روشن‌شونده تکرارپذیر در داخل راکتور، با افزایش عدد رینولدز محدود می‌شود، به طوری که ممکن است با افزایش سرعت جریان در داخل راکتور، حتی در نسبت هم‌ارزی‌های نزدیک به حالت استوکیومتری یک شعله در داخل راکتور تشکیل نگردد. بر اساس پژوهش‌های آنها همچنین رقیق‌سازی با نیتروژن، باعث افزایش قابل توجه زمان شروع واکنش در داخل راکتور می‌گردد. در ادامه در بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ بیگ محمدی و همکاران<sup>[24]</sup> <sup>[25,26]</sup> به تحقیق بر روی اثرات هندسه راکتور، عدد رینولدز و نسبت هم‌ارزی بر دینامیک شعله پیش‌آمیخته متان-اکسیژن و متان-دی‌اکسیدکربن-اکسیژن در راکتور استوانه‌ای شکل، به همراه ورودی عقب‌رفتگی پله‌ای شکل پرداختند. براساس نتایج آزمایش‌های ایشان، کاهش نسبت هم‌ارزی در عدد رینولدز و هندسه ثابت، منجر به تشکیل رژیم‌های شعله مختلفی از قبیل خروج شعله، شعله مرزی، شعله ثابت و خاموش‌شونده و روشن‌شونده تکرارپذیر می‌گردد. همچنین کاهش قطر داخلی راکتور (کاهش ارتفاع پله) باعث افزایش حساسیت جبهه شعله به اغتشاشات ورودی می‌شود. افزایش عدد رینولدز، باعث کاهش گستره حضور شعله در راکتورهای مقیاس خرد می‌گردد. سرعت

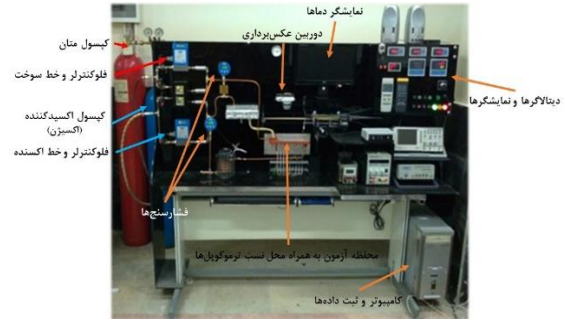
در شکل ۲، نمای سه بعدی برش خورده از محفظه بازطراحی جهت این تحقیق نشان داده شده است.

در این طرح حجم محفظه آرامش برابر ۰/۱۱۳۱ لیتر طراحی و در مدار بستر آزمون مطابق شکل ۳ قرار گرفته است.

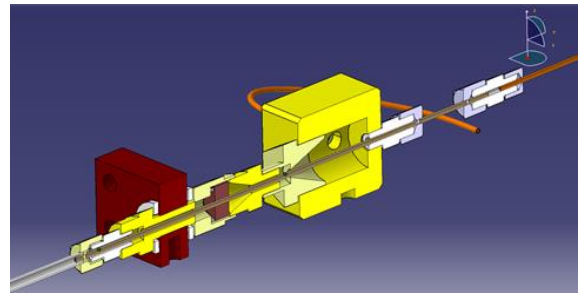
در مطالعه حاضر، راکتور مورد مطالعه به صورت استوانه‌ای از جنس کوارتز به قطر داخلی ۵ میلی‌متر، طول‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر و ضخامت دیواره ۱ میلی‌متر برای احتراق پیش‌آمیخته جزئی استفاده شده که به شکل افقی در بستر آزمون استقرار یافته است. تمامی آزمایش‌ها در دمای محیط ۱۸ الی ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفته‌اند. جهت اندازه‌گیری دبی سیال و فشار آن به ترتیب از دبی‌سنج‌ها و فشارسنج‌های دیجیتال شرکت نیوفلو (NewFlow) با خطای ۰/۱ درصد کل ظرفیت اندازه‌گیری، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دیاگرام جریانی بستر تست مورد نظر به همراه سیستم‌های اندازه‌گیری مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است.

### ۳- معرفی و تحلیل رژیم‌های شعله

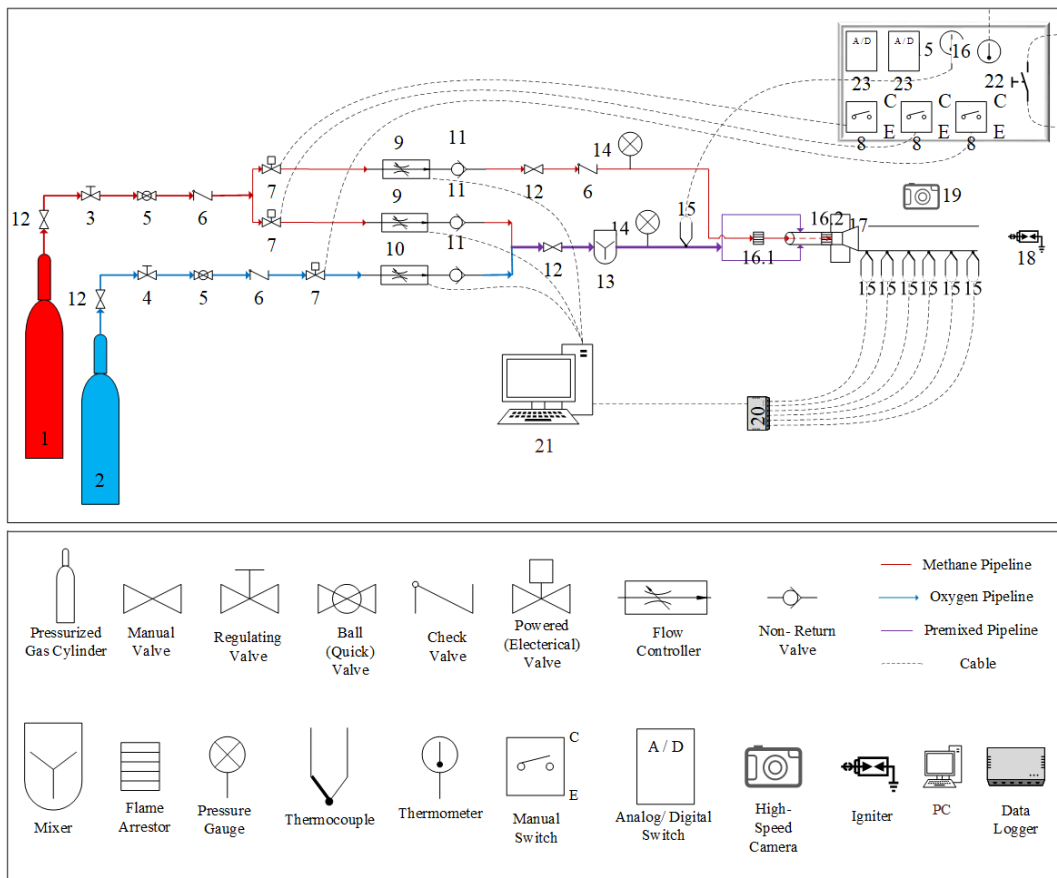
در این بخش به معرفی رژیم‌های شعله مشاهده شده در احتراق پیش‌آمیخته جزئی متان و اکسیژن، در راکتور مقیاس مزو و بررسی و تحلیل علت تشکیل هر رژیم شعله پرداخته شده است.



شکل ۱) نمای کلی از بستر آزمون احتراق میکرو و مزو اولیه



شکل ۲) نمای برش‌خورده بستر بازطراحی شده



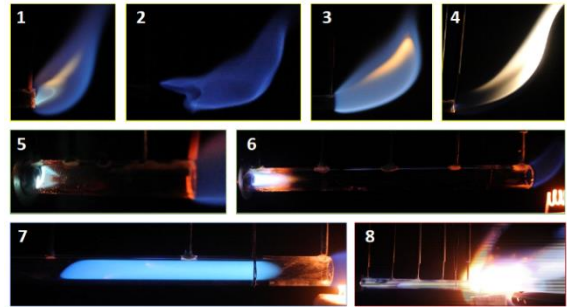
شکل ۳) طرح شماتیک مدار بستر آزمون و تجهیزات آن

از نظر ویژگی‌های ظاهری دارای دنباله سه لایه آبی‌رنگ، طول بلند و اشتعال دوده بوده و در نتیجه دارای تابشی نسبتاً نورانی می‌باشد.

شعله مرزی: در این رژیم شعله، جبهه شعله دقیقاً در لبه راکتور تشکیل شده یا بخشی از آن داخل و بخشی از آن خارج راکتور تشکیل می‌گردد و ایستا، پایا، دارای دنباله در خارج راکتور و بدون صوت است. این شعله حد میان تشکیل شعله در خارج و نفوذ آن به درون راکتور است. از نظر ظاهری معمولاً جبهه شعله دارای سطح کماتی نازک، طولی از مرتبه قطر داخلی راکتور و محدوده اشتعال دوده بسیار بزرگ و تابش نورانی است.

شعله ایستای نامتقارن: در این رژیم شعله، جبهه شعله به درون راکتور نفوذ کرده و پس از زمان گذار محدود، به تدریج و با سرعت کند از لبه راکتور تا محل توقف شعله در نزدیکی لوله سوخت مرکزی حرکت کرده و به طور خوداتکا، از آن پس ایستا، پایا، دارای دنباله در خارج راکتور و بدون صوت، تشکیل می‌گردد. در برخی از مطالعات پیشین، به دلیل حرکت ابتدایی شعله از بیرون راکتور (محل جرقه‌زن و تشکیل شعله) تا محل توقف آن، این رژیم شعله را شبه‌ایستا (Quasi- static) نامیده‌اند. از لحاظ ظاهری شکل‌های متنوعی از سطح تخت (بسته) (Close non- symmetric stationary) دارای اعوجاج تا سطح کشیده (باز) (Open non- symmetric stationary) - لاله‌ای (Tulip shaped flame)، از ۳۶۰ درجه کامل تا فقط قطعی از آن، از شیب مثبت تا شیب منفی جبهه شعله، حلقوی شکل شدن و برخی شکل‌های دیگر از آن وجود دارد و رویت شده‌است، همچنین این شعله‌ها دارای اشتعالی همراه با تولید دوده زیاد و سطح تابش نوری زیاد می‌باشد.

در آزمون‌های احتراق پیش‌آمیخته جزئی، رژیم شعله ایستای نامتقارن را شاهد می‌باشیم. در این رژیم، سرعت سوزش بسیار نزدیک به سرعت جریان است و مکانیزم اصلی حرکت شعله، انتقال حرارت از جبهه شعله به واکنش‌دهنده‌ها و پیش‌گرمایش آنهاست که در نزدیکی لوله سوخت مرکزی، هم به دلیل کوپلینگ حرارتی با لوله و هم متأثر از سوخت غیر پیش‌آمیخته، حلقوی شده و به تعادل حرارتی با دیواره‌ها و لوله رسیده و متوقف (ایستا) می‌شوند. در این رژیم احتراق، جبهه شعله با ایجاد کوپلینگ حرارتی میان خود و دیواره‌های راکتور، در ابتدا به صورت بسیار کند و پس از گذشت زمان زیاد، با حرکت آرام به سمت بالادست جریان در داخل راکتور حرکت می‌نماید و در نهایت، شعله به محلی می‌رسد که در آنجا حرارت ایجاد شده توسط جبهه شعله با دیواره‌های جامد (راکتور و لوله سوخت مرکزی) به پایداری رسیده و شعله به طور پایا، ایستا می‌شود. شعله‌های ایستا را می‌توان بر دو نوع متقارن و نامتقارن تقسیم‌بندی نمود. چنانچه ویژگی‌های هندسی همچون قطر داخلی راکتور و نیز سایر شرایط مرزی اعمالی بر روی دیواره راکتور از قبیل الگوی توزیع دمای شعاعی به گونه‌ای باشند که فرصت ایجاد و گسترش انواع ناپایداری‌های هیدرودینامیکی



شکل ۴) نمایی از شعله‌های تشکیل شده به ترتیب شماره: ۱) شعله خارجی، ۲) شعله جداشونده، ۳) شعله چسبیده، ۴) شعله مرزی، ۵) شعله ایستای نامتقارن، ۶) شعله ایستای متقارن، ۷) شعله نوسانی، ۸) بازگشت شعله

در این پژوهش از متان گرید ۵ و اکسیژن گرید ۴ استفاده شده‌است. آزمون‌های اصلی انجام شده، همگی در محدوده اشتعال‌پذیری بوده و از این رو خاموشی یا عدم تشکیل شعله اتفاق نیافته است. رژیم‌های شعله مشاهده شده (به ترتیب از پایین‌دست به سمت بالادست جریان) عبارتند از: ۱) دنباله شعله (تاج شعله یا Plume Flame)، ۲) شعله خارجی (Blow out)، ۳) شعله جداشونده (Lift off)، ۴) شعله چسبیده (Blow off attached)، ۵) شعله مرزی (Marginal)، ۶) شعله ایستای نامتقارن (Asymmetric non- axisymmetric stationary)، ۷) شعله ایستای متقارن (Symmetric stationary)، ۸) شعله نوسانی (خاموشی و اشتعال مکرر) (Repetitive Extinction and RelIgnition (Flame))، ۹) بازگشت شعله (Flash back).

نمایی از انواع شعله‌های بیان شده در شکل ۴ نشان داده شده است. ۱) دنباله شعله: این رژیم از شعله به علت سرعت بالای مواد اولیه درون محفظه امکان تشکیل نداشته به طور کامل در خارج از راکتور مشتعل و شکل می‌گیرد، این شعله همراه با جدا شدن شعله از لبه خروجی راکتور همراه است.

۲) شعله خارجی: در این رژیم، جبهه شعله که احتراق اصلی در آن انجام می‌شود خارج از راکتور قرار دارد که به صورت کاملاً خوداتکا (Self- sustain)، ایستا و پایا در خارج از راکتور مشتعل می‌شود.

۳) شعله جداشونده: این رژیم شعله نیز به طور کامل خارج از راکتور تشکیل شده و حتی با لبه راکتور فاصله نیز دارد. این شعله خوداتکا، ایستا (به سمت داخل راکتور حرکت نمی‌کند)، ناپایا و بدون جبهه شعله (غیر قابل تشخیص از دنباله) و دارای صوت نوسانی ممتد است. شکل شعله هر لحظه تغییر کرده و حتی از راکتور دور و به آن نزدیک می‌شود. از ویژگی‌های ظاهری آن می‌توان از پوسته‌ای بودن (ضخامت نازک)، رنگ آبی و طول بلند آن نام برد.

۴) شعله چسبیده: این رژیم شعله به هر دو شعله خارجی و جداشونده مشابهت دارد؛ این شعله خارج از راکتور و چسبیده به لبه راکتور تشکیل شده و خوداتکا، ایستا، پایا، بدون جبهه شعله و دارای صوت ممتد نوسانی با دو مود (Mode) صدای زیر و بم است.

۹) بازگشت شعله: در این رژیم، مشابه شعله نوسانی با تشکیل شعله در خارج راکتور، نفوذ شعله به درون آن و حرکت به سمت انتهای راکتور با سرعت بسیار بالا و خاموشی در انتهای راکتور با صوت شدید انفجارگونه به وقوع می‌پیوندد. این رژیم بر خلاف شعله نوسانی، خوداتکا نبوده و متحرک، ناپایا، بدون دنباله و دارای صوت خاموشی قوی است. این نوع رژیم احتراقی زمانی رخ می‌دهد که سرعت مخلوط واکنش‌دهنده ورودی به محفظه احتراق از سرعت سوزش آن (که عمدتاً تابعی از نسبت هم‌ارزی و دما است) کمتر باشد. در این حالت، شعله به سمت بالا دست جریان، با سرعت بسیار بالا حرکت می‌کند تا در شعله‌گیر و همراه با صوت خاموشی شدید، خاموش شود. این شعله غیر خوداتکا بوده و پس از خاموشی، نیازمند منبع حرارت برای تشکیل مجدد است. در شکل ۴ نمای از انواع شعله‌های تشریح شده نشان داده شده است.

#### ۴- بررسی اثر طول راکتور، نسبت هم‌ارزی و اثر نسبت پیش‌اختلاط بر رژیم شعله ابعاد مزو

در این مطالعه تاثیر دبی حجمی واکنش‌دهنده‌ها، نسبت هم‌ارزی، عدد رینولدز جریان و تاثیر نسبت اختلاط بر آن بررسی شده است، در ادامه به بررسی تغییرات توزیع دمای دیواره خارجی راکتور پرداخته خواهد شد. در این آزمون‌ها انواع شعله‌های معرفی شده در بالا مشاهده گردیده است. و به علت اهمیت آغازین شروع شعله‌های ایستای نامتقارن و شعله‌های پایدار که بر اساس گذر از حالت تشکیل شعله در خارج از لوله به شعله مرزی و شعله ایستای نامتقارن و پایداری درون لوله می‌باشد به عنوان حدود گذر نوع شعله و رسیدن به شکل شعله‌های مطلوب معرفی و مورد بحث و اندازه‌گیری قرار گرفته است.

در ابتدا به بررسی رژیم‌های شعله احتراق پیش‌آمیخته جزئی در راکتور به طول ۵ سانتی‌متر پرداخته می‌شود. بر این اساس نتایج آزمایش‌های احتراق پیش‌آمیخته جزئی (نسبت اختلاط‌های ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪) در قطر داخلی راکتور ۵ میلی‌متر با طول راکتور ۵ سانتی‌متر در دبی حجمی‌های اکسیژن ۰/۴۰، ۰/۵۰ و ۰/۶۰ لیتر استاندارد بر دقیقه و دبی حجمی‌های متان از ۰/۱۵ تا ۲/۰۰ با گام ۰/۰۵ لیتر استاندارد بر دقیقه بررسی گردید که نتایج حاصل در نمودارهای شکل ۵ نشان داده شده است، این نتایج حاصل انجام مجموعاً ۳۴۲ آزمون اصلی و ۲۷ آزمون صحت‌سنجی می‌باشد.

در آزمایش‌های صورت‌گرفته و در محدوده اشتعال‌پذیری، رژیم‌های بازگشت شعله، شعله نوسانی، شعله پایدار ایستای نامتقارن، شعله مرزی و شعله خارجی مشاهده گردید. شعله‌های ایستای نامتقارن در نزدیکی و اطراف لوله مرکزی - که تنها حاوی سوخت است - تشکیل می‌شود، یا به شکل حلقوی ناقص به طوری که ۳۶۰ درجه کامل نبوده و قطعی از آن خاموش یا به طور محسوس نازک‌تر از سایر قسمت‌های شعله می‌باشد تشکیل

(Hydrodynamic instabilities) از قبیل داریوس- لاندائو (Darrieus-Landau (D-L) و سافمن-تیلور (Saffman-Taylor (S-T) و حرارتی- نفوذی (Diffusive-Thermal (D-T) (عدد لوییس مخالف یک) [27] را بر روی سطح شعله بدهند، تا جایی که امکان تشکیل شعله پایدار وجود داشته باشد، شکل شعله در داخل راکتور مقیاس خرد به صورت نامتقارن خواهد بود.

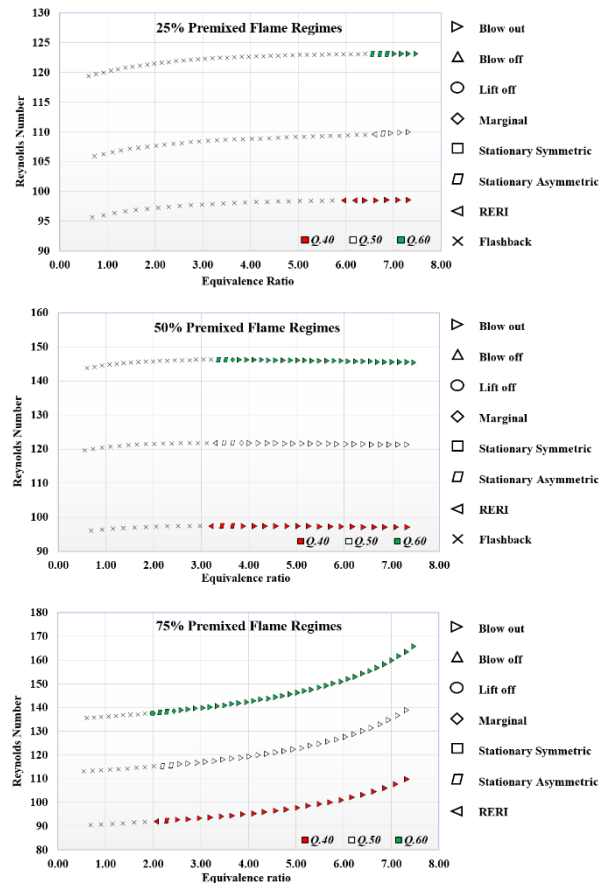
۷) شعله ایستای متقارن: این رژیم شعله نیز مشابه شعله ایستای نامتقارن، ابتدا شعله در خارج از راکتور تشکیل شده و به سمت بالا دست جریان حرکت کرده و چسبیده به لوله سوخت مرکزی، متوقف شده و کاملاً خوداتکا، از آن پس ایستا، پایا، با توزیع متقارن محوری جبهه شعله، دارا یا فاقد دنباله در خارج راکتور و بدون صوت است. این نوع شعله را می‌توان مشابه شعله خارجی نسبت به لوله سوخت مرکزی درون جریان هم‌محور دانست. این رژیم شعله که تنها در حالت حدی در آزمون‌های احتراق غیر پیش‌آمیخته مشاهده گردید، در محدوده وسیعی از آزمایش‌ها و به صورت متقارن محوری و چسبیده به لوله سوخت مرکزی درون راکتور، تشکیل می‌گردد. این شعله رفتاری مشابه شعله خارجی (دیفیوژن) نسبت به لوله سوخت مرکزی درون جریان هم‌محور را داشته و به همین دلیل با تغییر سرعت جریان، (چون همواره کمتر از سرعت سوزش درون راکتور و بیشتر از سرعت سوزش درون لوله سوخت مرکزی است) ایستا باقی مانده و با افزایش نسبت هم‌ارزی، ابتدا طول شعله افزایش یافته، سپس دنباله شعله تشکیل شده و شروع به رشد می‌کند. همچنین بخشی از سوخت اضافی که در جبهه شعله نسوخته است، منجر به تشکیل دوده درون راکتور می‌شود.

۸) شعله نوسانی: در این رژیم شعله، پس از اشتعال اولیه در خارج از راکتور، شعله به درون راکتور نفوذ و به سمت بالادست جریان حرکت کرده و در انتهای راکتور خاموش می‌شود و سپس واکنش‌دهنده‌های نسوخته به دلیل دمای محلی بالای (تا حد خوداشتعالی (Self-ignition) واکنش‌دهنده‌ها) لبه راکتور یا دنباله شعله در خارج راکتور، شعله دیگری را پدید آورده و مجدداً به سمت بالادست جریان حرکت نموده و در انتهای راکتور خاموش می‌شود و به همین ترتیب، خاموشی و تشکیل مجدد شعله به صورت خوداتکا، متحرک، پایا، دارای دنباله خارج از راکتور یا فاقد دنباله پایا و همراه صوت خاموشی بلند غیر ممتد و صوت احتراق ضعیف غیر ممتد یا بدون صوت، ادامه می‌یابد. بسامد سیکل خاموشی و اشتعال مکرر شعله نوسانی، متغیر بوده و به ویژگی‌های جریان و شرایط ترمودینامیکی راکتور بستگی دارد. این رژیم شعله می‌تواند با نوسان رفت و برگشتی موقت شعله از لبه یا ابتدای راکتور تا محل معینی در میان راکتور و سپس حرکت تا انتهای راکتور و خاموشی و تشکیل شعله مجدد همراه باشد. در این صورت، معمولاً صوت نوسانی ممتد شعله رفت و برگشتی که قوی و ضعیف می‌شود نیز به صوت خاموشی شعله اضافه می‌گردد.

به عبارت دیگر، در این شرایط به علت سرعت بالای مخلوط و عدم وجود زمان کافی جهت حضور آن در درون راکتور، امکان ایجاد شرایط مطلوب جهت اختلاط و ایجاد شرایط لازم جهت شروع واکنش مهیا نمی‌باشد، که این مهم با افزایش پیش مخلوطی مخلوط به خودی خود تا حدودی رفع شده و امکان تشکیل شعله مزو درون راکتور مهیا می‌گردد.

در ادامه جهت بررسی اثر طول راکتور، رژیم‌های شعله احتراق پیش‌آمیخته جزئی در راکتور به طول ۱۰ سانتی‌متر با نسبت اختلاط‌های ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ آزمایش شد، در قطر داخلی راکتور ۵ میلی‌متر، طول راکتور ۱۰ سانتی‌متر، دبی حجمی‌های اکسیژن ۰/۴۰، ۰/۵۰ و ۰/۶۰ لیتر استاندارد بر دقیقه و دبی حجمی‌های متان از ۰/۱۵ تا ۱/۶۰ با گام ۰/۰۵ لیتر استاندارد بر دقیقه و مجموعاً ۲۱۹ آزمون اصلی و ۳۰ آزمون صحت سنجی صورت گرفت که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است.

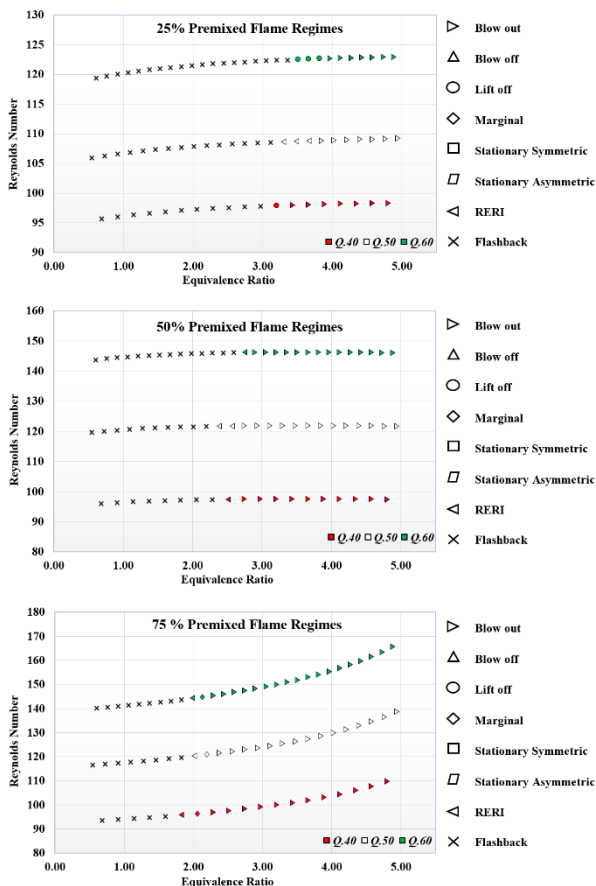
در این آزمایش‌ها و در محدوده اشتعال‌پذیری، رژیم‌های بازگشت شعله، شعله نوسانی، شعله مرزی، شعله جداشونده و شعله خارجی مشاهده گردید. شعله‌های جداشونده ماهیتی مشابه بازگشت شعله داشتند به طوری که در ابتدای آزمون، بازگشت شعله موقتی بود و پس از گذشت زمان اندک، با تشکیل آب مایع درون راکتور، (در نزدیکی لبه انتهایی) شعله به خارج از راکتور رانده



شکل ۵) رژیم شعله‌های مشاهده شده در راکتور ۵ سانتی‌متری

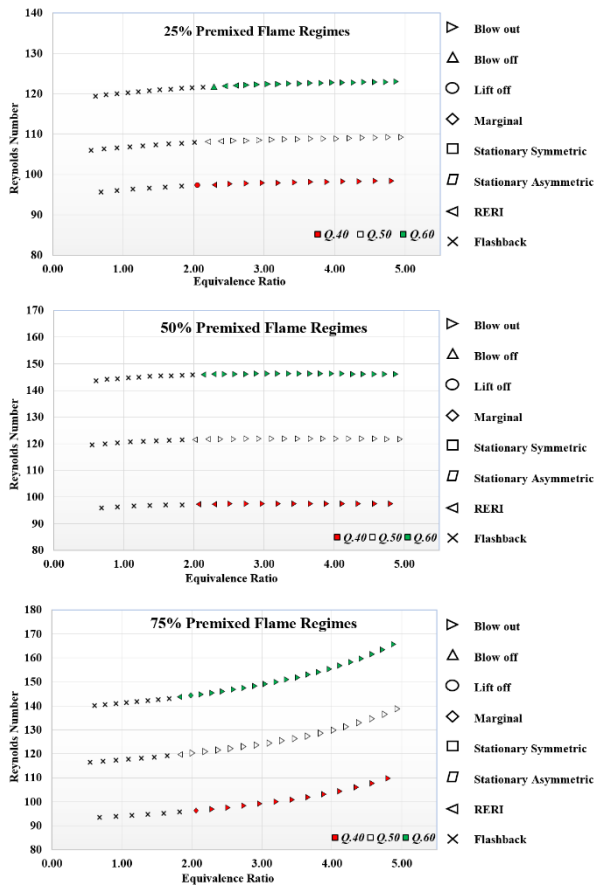
می‌گردد، همچنین جبهه شعله، متقارن محوری نبوده و اغلب به شکل مایل با شیب مثبت تشکیل می‌گردد، که می‌توان گفت علت اصلی وجود شیب در آن اثرات بویانسی می‌باشد. شعله‌های ایستای نامتقارن، معمولاً ابتدا در خارج از راکتور تشکیل شده، به آرامی (به شکل نامتقارن) وارد راکتور شده و به تدریج (با سرعت بسیار کم) به سمت انتهای راکتور حرکت کرده و در نزدیکی لوله سوخت مرکزی متوقف می‌گردیدند.

در آزمایش‌های صورت گرفته شعله در محدوده کوچکی پایدار است و با افزایش دبی حجمی جریان ورودی، پایداری شعله افزایش می‌یابد و تغییرات شدید رژیم شعله با تغییر نسبت اختلاط مشاهده گردید، به طوری که با افزایش نسبت اختلاط، در نسبت هم‌ارزی بسیار پایین‌تری، شعله پایدار مشاهده می‌گردد. با توجه به نمودارهای فوق به نتایجی همچون افزایش پایداری شعله‌های نوسانی و ایستای نامتقارن با افزایش نسبت اختلاط، و همچنین تأثیر زیاد درصد اختلاط سوخت و اکسیدکننده، بر کاهش مصرف آنها برای دستیابی به رژیم شعله همسان می‌توان اشاره کرد. این مهم پایداری شعله‌ها و تشکیل رژیم شعله پایدار نامتقارن که با افزایش نسبت اختلاط در لوله ۵ سانتی متری رخ می‌دهد را نشان می‌دهد. این موضوع را می‌توان به علت کم بودن زمان مناسب اختلاط جهت ایجاد شرایط مطلوب برای ایجاد اختلاط نسبت داد،



شکل ۶) رژیم شعله‌های مشاهده شده در راکتور ۱۰ سانتی‌متری





شکل ۸) رژیم شعله‌های مشاهده شده در راکتور ۱۵ سانتی‌متری

آزمایش‌های صورت گرفته در راکتور ۱۵ سانتی‌متری در محدوده اشتعال‌پذیری، رژیم‌های بازگشت شعله، شعله نوسانی، شعله مرزی، شعله جداشونده، شعله چسبیده و شعله خارجی مشاهده گردید. شعله‌های جداشونده و چسبیده، ماهیتی مشابه بازگشت شعله دارند به طوری که در ابتدای آزمون، بازگشت شعله موقتی مشاهده شده و پس از گذشت زمان اندک، با تشکیل آب مایع درون راکتور (در نزدیکی لبه انتهایی در داخل و زیر راکتور) شعله به خارج از راکتور پس‌زده شده و به صورت شعله جداشونده، به صورت ناپایا و نامتقارن از لبه راکتور دور و مجدداً به آن نزدیک می‌شود؛ لیکن در مورد شعله چسبیده، شعله به طور کامل و پایا خارج از راکتور و چسبیده به لبه آن تشکیل می‌شود. دو رژیم شعله جداشونده و چسبیده، از لحاظ نمایان نبودن جبهه شعله، به راحتی از رژیم شعله خارجی قابل تفکیک هستند.

در آزمایش‌های راکتور ۱۵ سانتی‌متری، شعله پایدار ایستا مشاهده نشده و نمودارهای فوق به افزایش پایداری شعله نوسانی در نسبت اختلاط‌های بالاتر و همچنین تشکیل شدن سریع‌تر شعله نوسانی (در نسبت هم‌ارزی‌های پایین‌تر) با افزایش نسبت اختلاط، اشاره دارند. محدوده نسبت هم‌ارزی و رژیم‌های شعله مشاهده شده تا حدودی مشابه آزمون‌های راکتور با طول ۱۰ سانتی‌متر است. در طول راکتور ۱۵ سانتی‌متری با توجه به زمان مناسب ماند مخلوط درون راکتور، بازه تشکیل شعله مزو در درصد هم‌ارزی‌های مختلف

شده و به صورت ناپایا و نامتقارن از لبه راکتور دور و مجدداً به آن نزدیک می‌گردد، نمایی از این پدیده در شکل ۷ نشان داده شده است.

در آزمایش‌های انجام شده در راکتور ۱۰ سانتی‌متری، شعله پایدار ایستا درون راکتور مشاهده نشده ولی در نسبت اختلاط بالا، شعله پایدار در لبه راکتور مشاهده شده است. همچنین پایداری شعله نوسانی در نسبت اختلاط‌های بالاتر، افزایش اندکی می‌یابد. با مقایسه نمودارهای فوق با نمودارهای راکتور ۵ سانتی‌متری، کاهش شدید تأثیر وضعیت نسبی رژیم شعله با تغییرات نسبت اختلاط و دبی حجمی اکسیژن مشاهده می‌گردد.

در آزمایش‌های انجام شده در راکتور ۱۰ سانتی‌متری، شعله پایدار ایستا درون راکتور مشاهده نشده ولی در نسبت اختلاط بالا، شعله پایدار در لبه راکتور مشاهده شده است. همچنین پایداری شعله نوسانی در نسبت اختلاط‌های بالاتر، افزایش اندکی می‌یابد. با مقایسه نمودارهای فوق با نمودارهای راکتور ۵ سانتی‌متری، کاهش شدید تأثیر وضعیت نسبی رژیم شعله با تغییرات نسبت اختلاط و دبی حجمی اکسیژن مشاهده می‌گردد.

در آزمایش‌های انجام شده در راکتور ۱۰ سانتی‌متری، شعله پایدار ایستا درون راکتور مشاهده نشده ولی در نسبت اختلاط بالا، شعله پایدار در لبه راکتور مشاهده شده است. همچنین پایداری شعله نوسانی در نسبت اختلاط‌های بالاتر، افزایش اندکی می‌یابد. با مقایسه نمودارهای فوق با نمودارهای راکتور ۵ سانتی‌متری، کاهش شدید تأثیر وضعیت نسبی رژیم شعله با تغییرات نسبت اختلاط و دبی حجمی اکسیژن مشاهده می‌گردد.

در این سری آزمایش‌ها با افزایش طول راکتور، به علت افزایش زمان ماند بیشتر مخلوط درون راکتور، اختلاط بهتری صورت گرفته، و در نسبت پیش اختلاط کمتر، در نسبت‌های هم ارزی کمتری نسبت به راکتور با طول ۵ سانتی‌متر، تشکیل شعله‌های مزو مشاهده می‌شود، ولی این اختلاف با افزایش درصد پیش‌اختلاط، کم‌رنگ‌تر شده که قابل پیش‌بینی می‌باشد.

رژیم‌های شعله احتراق پیش‌آمیخته جزئی در راکتور به طول ۱۵ سانتی‌متر با نسبت اختلاط‌های ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ در قطر داخلی راکتور ۵ میلی‌متر، دبی حجمی‌های اکسیژن ۰/۴۰، ۰/۵۰ و ۰/۶۰ لیتر استاندارد بر دقیقه و دبی حجمی‌های متان از ۰/۱۵ تا ۰/۶۰ با گام ۰/۰۵ لیتر استاندارد بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفت و مجموعاً ۲۱۹ آزمون اصلی و ۲۹ آزمون صحه‌گذاری انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.



نمایی از تشکیل آب مایع در راکتور

شکل ۷) نمایی از تشکیل آب مایع درون راکتور

برای راکتور ۱۰ سانتی‌متری، افزایش پراکندگی دما (افزایش طول شعله) با افزایش دبی حجمی اکسیژن؛ و همچنین کاهش دبی حجمی متان در دبی حجمی ثابت اکسیژن، در شکل نمایان می‌باشد. در نمودار دمایی، دمای بالای ترموکوپل ۴ متأثر از دنباله شعله است و چون زمان حضور شعله درون راکتور بسیار اندک است، سایر ترموکوپل‌ها، دمای پایینی را نمایش می‌دهند.

برای شعله جداشونده، دمای نسبتاً بالاتری از ترموکوپل ۴، از شعله پس‌زده شده نشأت می‌گیرد؛ اما نکته قابل تأمل در این مورد، دمای نسبتاً پایین ترموکوپل‌های ۲ و ۳ می‌باشد؛ که هم علت و هم معلول تشکیل آب درون راکتور است. بدین معنا که به علت دمای پایین‌تر ترموکوپل و تأثیر آن بر بدنه راکتور، شرایط را برای تشکیل قطرات آب مهیا کرده و تأثیر دوگانه‌ای در ایجاد این رژیم از شعله به علت کم‌تر شدن سطح مقطع قطر داخلی لوله و به طبع آن بالاتر رفتن سرعت جریان در آن مقطع و هدایت شعله به بیرون از راکتور ایفا می‌نماید و به علت خارج شدن شعله از درون محفظه و نقطه مذکور، کمک به سردتر شدن آن ناحیه می‌نماید. مطابق نمودار فوق، در نسبت اختلاط‌های بالاتر، توزیع دما یکنواخت‌تری مشاهده می‌شود. با افزایش دبی جریان و طول راکتور، یکنواختی توزیع دمای دیواره خارجی راکتور کاهش می‌یابد ولی در نسبت‌های اختلاط بالا، گرادیان دمای پایین‌تری در مقایسه با دبی جریان و طول راکتور کمتر و نسبت اختلاط یکسان مشاهده می‌شود.

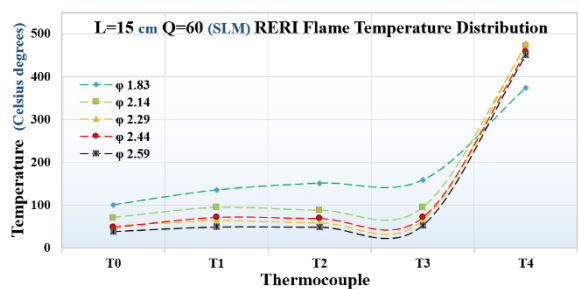
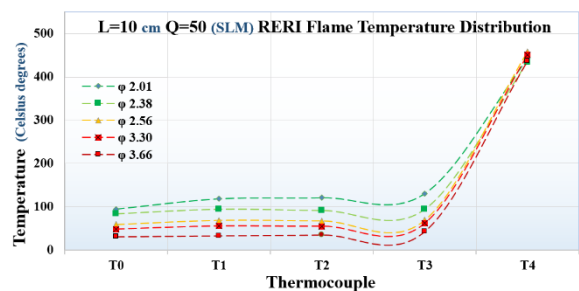
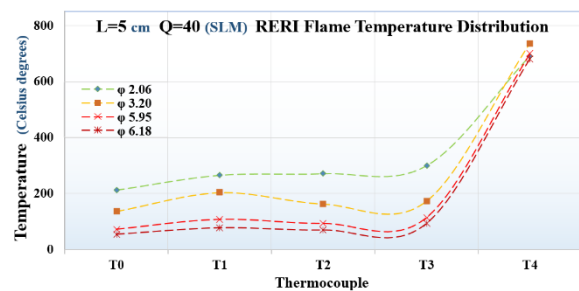
در راکتور ۱۵ سانتی‌متری، گرادیان دمای پایین‌تر (افزایش پراکندگی دما) در دبی حجمی اکسیژن میانی (۰/۵۰ لیتر استاندارد بر دقیقه) مشهود است. در نمودار فوق، دمای بالای ترموکوپل ۴ متأثر از دنباله شعله است و این مهم به علت زمان اندک حضور شعله درون راکتور است، سایر ترموکوپل‌ها دمای پایینی را نمایش می‌دهند. همچنین در آزمایش‌هایی که دمای ترموکوپل ۴ نسبت به سایر آزمایش‌ها، بیشتر است، دمای سایر ترموکوپل‌ها در همان آزمایش نیز کمتر است؛ در نتیجه، مدت زمان حضور شعله درون راکتور کمتر است. (سرعت نسبی شعله نوسانی بیشتر است.)، مشابه قبل، در نسبت اختلاط‌های بالاتر، توزیع دما یکنواخت‌تری حاصل می‌شود. با افزایش دبی جریان و طول راکتور، یکنواختی توزیع دمای دیواره خارجی راکتور کاهش می‌یابد ولی در نسبت‌های اختلاط بالا، گرادیان دمای پایین‌تری در مقایسه با دبی جریان و طول راکتور کمتر و نسبت اختلاط یکسان مشاهده می‌شود.

در خصوص تأثیر پیش‌اختلاط جزئی بر پایداری شعله همانگونه که مشاهده شد، با افزایش درصد پیش‌اختلاط جزئی، پایداری افزایش یافته و شعله در نسبت هم‌ارزی کمتری تشکیل می‌گردد، که این به معنی بازه بالاتر تشکیل شعله در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف می‌باشد، همچنین با افزایش نسبت پیش‌اختلاط جزئی تأثیر طول راکتور کم‌تر شده که این مهم، نیاز زمانی کم‌تر مخلوط جهت همگن شدن را نشان می‌دهد. در خصوص تأثیر طول راکتور همانگونه که

نزدیک به هم بوده و این نشان از میزان مناسب طولی جهت همگن شدن مخلوط در طول راکتور فوق‌الذکر را دارد.

در ادامه به بررسی نتایج نمودارهای توزیع دمای دیواره خارجی راکتور برای شعله‌های نوسانی که در طول بازه زمانی ۵ ثانیه‌ای فعالیت رژیم شعله نوسانی توسط ترموکوپل‌ها ثبت گردیده است، پرداخته شد و نتایج بدست آمده در شکل ۹ نشان داده شده است. این نمودارها برای سه راکتور با طول‌های مختلف بررسی و رسم شده است، ترموکوپل‌های مورد استفاده از مدل تیپ K با قطر ۲ میلی‌متری بوده است که به دیواره بیرونی راکتور به شکل مستقیم متصل شده است.

در شکل ۹ و برای راکتور ۵ سانتی‌متری پراکندگی یکنواخت‌تر دما (گرادیان دمای کمتر) در دبی‌های (سوخت و اکسنده) بالاتر، مشاهده گردید؛ این مهم تا حد بالایی دبی سوخت (در دبی اکسنده ثابت) ادامه پیدا کرده و از آن پس، شعله مرزی تشکیل شده و بعد از آن پراکندگی دما به شدت کاهش می‌یابد. در نمودار فوق، دمای بالای ترموکوپل ۴ متأثر از دنباله شعله است؛ و چون زمان حضور شعله درون راکتور بسیار اندک است، سایر ترموکوپل‌ها دمای پایین‌تری را دارا هستند. در نسبت اختلاط‌های بالاتر، توزیع دما یکنواخت‌تری مشاهده می‌شود.



شکل ۹) نمودارهای توزیع دمای دیواره خارجی راکتورهای ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری

ایجاد شعله پایدار درون راکتوری به طول ۱۰ سانتی‌متر می‌باشیم. این حالت و نسبت برای سایر ابعاد نیز تا حدودی قابل تعمیم می‌باشد.

**تشکر و قدردانی:** این کار تجربی در آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شد. لذا جا دارد کمال تشکر و سپاسگذاری را از کلیه همکاران در این آزمایشگاه ابراز داریم.

**تاییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل و یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده محتوای ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله برعهده نویسندگان مقاله است.

**تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافعی با پایان نامه ارسال و طرح پژوهشی ندارد.

**سهم نویسندگان:** علی زرگرباشی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ صادق تابع جماعت (نویسنده دوم)، استاد راهنما/پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ سروش صرافان صادقی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۰٪). سروش شیخ‌بگلو (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (۱۰٪).

**منابع مالی:** منابع مالی استفاده شده برای این تحقیق به روش تامین مالی شخصی و کمک‌های آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر صورت گرفته است.

#### منابع

- [1] Waitz IA, Gauba G, Tzeng YS. Combustors for micro-gas turbine engines. *Journal of Fluids Engineering*. 1998; 120(1):109-117.
- [2] Federici JA, Vlachos DG. A computational fluid dynamics study of propane/air microflame stability in a heat recirculation reactor. *Combustion and Flame*. 2008;153(1-2):258-269.
- [3] Barnard, J. A., Bradley, J. N., Khoshnoudi, M., editors, *Flame and combustion*. 1<sup>st</sup> edition. University Publication Center, Tehran, 1989. [Persian]
- [4] Groshenry C. Preliminary design study of a micro-gas turbine engine (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology), 1995.
- [5] Hua J, Wu M, Kumar K. Numerical simulation of the combustion of hydrogen-air mixture in micro-scaled chambers. Part I: Fundamental study. *Chemical engineering science*. 2005;60(13):3497-3506.
- [6] Kim NI, Maruta K. A numerical study on propagation of premixed flames in small tubes. *Combustion and flame*. 2006;146(1-2):283-301.
- [7] Peterson RB, Vanderhoff JA. A catalytic combustor for microscale applications. *Combustion Science and Technology Communications*. 2000;1:10-3.
- [8] Yang WM, Chou SK, Shu C, Li ZW, Xue H. Combustion in micro-cylindrical combustors with and without a backward facing step. *Applied Thermal Engineering*. 2002;22(16):1777-1787.
- [9] Raimondeau S, Norton D, Vlachos DG, Masel RI. Modeling of high-temperature microburners.

در بالا اشاره شد، با افزایش طول راکتور، زمان لازم جهت همگن شدن مخلوط فراهم شده، و این امکان را برای شعله مزو فراهم می‌کند که در بازه تشکیل شعله در نسبت هم‌ارزی‌های کمتر در نسبت‌های پیش مخلوط کمتر ایجاد گردد، البته همانگونه که در قبل اشاره شد، تاثیر این مهم با افزایش نسبت پیش‌مخلوط کاهش می‌یابد.

هم‌چنین با توجه به بازه تشکیل شعله نوسانی در شعله‌های مزو در نسبت پیش‌مخلوط‌های کمتر می‌توان این مهم را ناشی از تاثیر گردادیان‌های بیشتر دمائی و بویانسی و اثر آن در میزان تاثیر دیفیوژ گازها جهت تلاش برای ایجاد مخلوط همگن مربوط دانست، البته شکل شعله‌های تشکیل شده در این بازه از پیش مخلوط جزئی و زاویه زیاد شعله نسبت به افق نیز موید این نکته می‌باشد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

رژیم شعله‌های مشاهده شده در احتراق پیش‌آمیخته جزئی، پایداری کمی داشته و تحت تأثیر پارامترهایی چون نسبت اختلاط، طول راکتور، سرعت جریان و شرایط ترمودینامیکی محفظه احتراق بوده و رژیم‌های متنوعی را شامل می‌شوند. شعله نوسانی را می‌توان اصلی‌ترین رژیم شبه پایدار در این نوع احتراق نامید که توزیع حرارت مطلوبی در طول راکتور داشته و در اکثر آزمایش‌ها، قابل دستیابی است. نحوه تأثیرپذیری دینامیک شعله نوسانی از متغیرهای آزمایش، در ادامه ارائه می‌شوند:

- با افزایش نسبت اختلاط (پیش‌آمیختگی جریان)، پایداری شعله پیش‌آمیخته جزئی، پراکندگی دما، سرعت نسبی شعله و شدت میزان خاموشی شعله افزایش می‌یابد.

- با افزایش طول راکتور (پارامتر هندسی)، اثرات نسبت اختلاط بر شعله، سرعت نسبی شعله کاهش و پراکندگی دما افزایش می‌یابد، رژیم‌های پایدار شعله و گستره پایداری شعله، کاهش می‌یابند و شدت میزان خاموشی افزایش می‌یابد.

- با افزایش طول راکتور به علت فراهم شدن زمان لازم جهت همگن شدن مخلوط، تفاوت‌ها در بازه تشکیل شعله در نسبت پیش‌اختلاط‌های مختلف کم می‌گردد، و این مهم به علت زمان مناسبی است که به دلیل افزایش طول راکتور برای تشکیل شعله مزو مهیا می‌گردد.

- با افزایش دبی جریان (سرعت جریان)، پایداری شعله، پراکندگی دما، شدت میزان خاموشی افزایش می‌یابد و سرعت نسبی شعله نوسانی کاهش می‌یابد.

- اثرپذیری دینامیک شعله نوسانی تشکیل شده نسبت به تغییرات نسبت اختلاط، بیشتر از تغییرات طول راکتور، تغییرات دبی حجمی اکسیژن (سرعت جریان) و تغییر دبی حجمی سوخت (نسبت هم‌ارزی) می‌باشد.

- با تغییرات ۵۰ درصدی در عدد رینولدز به علت تغییرات دبی از ۴۰ به ۶۰ لیتر بر دقیقه شاهد رشد ۱۰ درصدی نسبت هم‌ارزی برای

- combustion in micro and meso scale reactor. Iran Patent 80027, 2013; 15: 07.
- [24] Baigmohammadi M, Tabejamaat S, Farsiani Y. An experimental study of methane-oxygen-carbon dioxide premixed flame dynamics in non-adiabatic cylindrical meso-scale reactors with the backward facing step. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2015;95:105-123.
- [25] Baigmohammadi M, Tabejamaat S, Farsiani Y. Experimental study of the effects of geometrical parameters, Reynolds number, and equivalence ratio on methane-oxygen premixed flame dynamics in non-adiabatic cylindrical meso-scale reactors with the backward facing step. *Chemical Engineering Science*. 2015;132:215-233.
- [26] Baigmohammadi M, Tabejamaat S, Faghani-Lamraski M. Experimental study on the effects of mixture flow rate, equivalence ratio, oxygen enhancement, and geometrical parameters on propane-air premixed flame dynamics in non-adiabatic meso-scale reactors. *Energy*. 2017;121:657-675.
- [27] Kang SH, Baek SW, Im HG. Effects of heat and momentum losses on the stability of premixed flames in a narrow channel. *Combustion Theory and Modelling*. 2006;10(4):659-681.
- Proceedings of the Combustion Institute. 2002;29(1):901-907.
- [10] Leach T, Cadou C. Effect of Structural Heat Conduction on the Power Density of Micro-Combustors. In 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 2004 (p. 300).
- [11] Leach TT, Cadou CP. The role of structural heat exchange and heat loss in the design of efficient silicon micro-combustors. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2005;30(2):2437-2444.
- [12] Maruta K, Kataoka T, Kim NI, Minaev S, Fursenko R. Characteristics of combustion in a narrow channel with a temperature gradient. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2005;30(2):2429-2436.
- [13] Richecoeur F, Kyritsis DC. Experimental study of flame stabilization in low Reynolds and Dean number flows in curved mesoscale ducts. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2005;30(2):2419-2427.
- [14] Xu B, Ju Y. Experimental study of spinning combustion in a mesoscale divergent channel. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2007;31(2):3285-3292.
- [15] Fan Y, Suzuki Y, Kasagi N. Experimental study of micro-scale premixed flame in quartz channels. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2009;32(2):3083-3090.
- [16] Smyth SA, Kyritsis DC. Experimental determination of the structure of catalytic micro-combustion flows over small-scale flat plates for methane and propane fuel. *Combustion and Flame*. 2012;159(2):802-816.
- [17] Sadeghi SS, Tabejamaat S, Baigmohammadi M, Zarvandi J. An experimental study of the effects of equivalence ratio, mixture velocity and nitrogen dilution on methane/oxygen pre-mixed flame dynamics in a meso-scale reactor. *Energy conversion and management*. 2014;81:169-183.
- [18] Li X, Zhang J, Yang H, Jiang L, Wang X, Zhao D. Combustion characteristics of non-premixed methane micro-jet flame in coflow air and thermal interaction between flame and micro tube. *Applied thermal engineering*. 2017;112:296-303.
- [19] Milcarek RJ, Nakamura H, Tezuka T, Maruta K, Ahn J. Microcombustion for micro-tubular flame-assisted fuel cell power and heat cogeneration. *Journal of Power Sources*. 2019;413:191-197.
- [20] Zarvandi J, Tabejamaat S, Baig Mm. Numerical Simulation Of The Effective Parameters On The Stability Of Stoichiometric CH<sub>4</sub>/air Premixed Combustion In A Micro-combustion Chamber. 2010; 6 (2): 31-45.
- [21] Zarvandi J, Tabejamaat S, Baigmohammadi M. Numerical study of the effects of heat transfer methods on CH<sub>4</sub>/(CH<sub>4</sub>+ H<sub>2</sub>)-AIR pre-mixed flames in a micro-stepped tube. *Energy*. 2012;44(1):396-409.
- [22] Sarrafan Sadeghi, S., An Experimental Study of the Micro-Combustion Chamber. Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic). MSc thesis. Tehran, 2013.
- [23] Sarrafan Sadeghi, S., Tabejamaat, S., Baigmohammadi M., Laboratory test bed of micro-