



# Experimental Study of the Effects of Input Flow Characteristics on Flame Dynamics and Oscillating Frequencies of a Partially-Premixed Flame in a Fixed-Geometry Meso-Cylindrical Reactor

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Zargarbashi A.<sup>1</sup>,  
Sarrafan Sadeghi S.<sup>1\*</sup>,  
Tabejamaat S.<sup>1</sup>

### How to cite this article

Zargarbashi A, Sarrafan Sadeghi S, Tabejamaat S. Experimental Study of the Effects of Input Flow Characteristics on Flame Dynamics and Oscillating Frequencies of a Partially-Premixed Flame in a Fixed-Geometry Meso-Cylindrical Reactor. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(04):213-223.

<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

soroush.s.s@aut.ac.ir

### Article History

Received: January 05, 2021

Accepted: August 30, 2021

Published: February 22, 2022

## ABSTRACT

An experimental study on the effects of methane-oxygen partially-premixed input flow characteristics in a mesoscale reactor with constant length and geometry was investigated in the present work. For this research, two partially-premixed ratios of 25% and 50% are considered. The reactor is mounted horizontally, made from quartz material and its geometric characteristics are internal diameter: 5 mm, wall thickness: 1 mm, and length: 10 cm. In this research, we have tried to determine the factors affecting flame regimes. The range of flame regimes, flame dynamics, the outer wall temperature distribution of the reactor, frequency, and oscillation of oscillating flames, along with the intensity of the Repetitive Extinction and ReIgnition (RERI) extinguishing sound, were analyzed and reported. This flame's dynamics are more affected by changes in mixing ratio, oxygen volume flow rate, and fuel volume flow rate, causing changes in inlet flow velocity and equivalence ratio, respectively. Examination of the results of acoustic oscillations indicates an increase in oscillating flame velocity with increasing volumetric flow and mixing ratio. Loud extinguishing sound of flames when quenching is caused by converting a portion of the thermal energy of the flame into sound in the flame arrestor and the acoustic vibration waves resulting from the extinguishing of the flame and the difference in gas velocity.

**Keywords** Methane-Oxygen Flame, Meso-scale Cylindrical Reactor, Partially-Premixed Combustion, Flame Dynamics, Flame Sound Oscillations

## CITATION LINKS

[1] Combustors for micro-gas turbine engines. [2] A computational fluid dynamics study of propane/air microflame stability in a heat recirculation reactor. [3] Flame and combustion. [4] Numerical simulation of the combustion of hydrogen-air mixture... [5] A numerical study on propagation of premixed flames in small tubes. [6] Flame quenching by a cold wall. [7] Combustion in microscale heat-recirculating burners. [8] Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors. [9] Igniters and temperature sensors for a micro-scale combustion system. [10] Characteristics of combustion in a narrow channel with a temperature gradient. [11] Catalyzed combustion of hydrogen-oxygen in platinum tubes... [12] Combustion of gaseous and liquid fuels in meso-scale tubes with wire mesh. [13] Experimental Study of the Micro-Combustion Chamber. [14] Laboratory test bed of micro-combustion in micro and meso scale reactor. [15] 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. [16] Alumina-based monopropellant microthruster with integrated heater, catalytic bed and temperature sensors. [17] Investigation on the combustion performance enhancement... [18] Numerical study of the effects of wire insertion on CH<sub>4</sub> (methane)/AIR... [19] An experimental study of methane-oxygen-carbon dioxide premixed flame dynamics in non-adiabatic cylindrical meso-scale reactors with the backward facing step. [20] 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. [21] Microcombustion for micro-tubular... [22] Investigation of microcombustion reforming of ethane/air... [23] Experimental study on a high efficient and ultra-lean burn meso-scale thermoelectric system based on porous media combustion. [24] Investigation on the flame characteristics of premixed propane/air in a micro opposed flow porous combustor. [25] Study on combustion characteristics of premixed methane-oxygen... [26] Experimental study of the effect of inlet flow characteristics and chamber length...

# بررسی تجربی اثر مشخصه‌های جریان ورودی بر دینامیک و بسامدهای نوسانی شعله پیش‌آمیخته جزئی در راکتور مزو استوانه‌ای شکل با هندسه ثابت

علی زرگرپاشی

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

سروش صرافان صادقی\*

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

صادق تابع جماعت

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

## چکیده

در پژوهش حاضر، به مطالعه تجربی اثر مشخصه‌های جریان ورودی پیش‌آمیخته متان-اکسیژن، درون یک راکتور مزو با طول و هندسه ثابت پرداخته شده است. جهت این تحقیق دو نسبت اختلاط جزئی ۲۵٪ و ۵۰٪ در نظر گرفته شده و نوع رژیم جریان از نوع آرام بوده است. راکتور مورد استفاده، از جنس کوارتز که به صورت افقی نصب گردیده و مشخصات هندسی آن عبارتند از: قطر داخلی ۵ میلی‌متر، ضخامت دیواره ۱ میلی‌متر و طول ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. در این تحقیق سعی شده است تا عوامل مؤثر بر رژیم‌های شعله، محدوده تشکیل انواع رژیم‌های شعله، دینامیک شعله، توزیع دمای دیواره خارجی راکتور، بسامد و نوسان شعله‌های نوسانی همراه با شدت صوت خاموشی شعله نوسانی تحلیل و گزارش گردد. رژیم اصلی شعله مزوی مشاهده شده طی این پژوهش، شعله نوسانی بوده است. دینامیک این شعله از تغییرات به ترتیب نسبت اختلاط، دبی حجمی اکسیژن و نهایتاً دبی حجمی سوخت، که باعث تغییرات در سرعت جریان ورودی و نسبت هم‌ارزی می‌گردد بیشتر تأثیر می‌پذیرد. بررسی نتایج حاصل از نوسانات صوتی بیانگر افزایش سرعت شعله نوسانی با افزایش دبی حجمی و نسبت اختلاط می‌باشد. صوت خاموشی بلند شعله‌ها هنگام خاموشی از تبدیل بخشی از انرژی حرارتی شعله به صوت، در شعله‌گیر و امواج مرتعش صوتی حاصل از خاموشی شعله و اختلاف سرعت گاز، ناشی می‌شود.

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۸

\*نویسنده مسئول: soroush.s.s@aut.ac.ir

## ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر با افزایش گسترده مصرف انرژی و از طرفی اثر گلخانه‌ای که از تولید بی‌سابقه کربن دی‌اکسید ناشی از آن بوده است توجه به منابع تأمین انرژی پایدار را به یکی از مهم‌ترین موضوعات کلان جهانی تبدیل نموده است. در عصر حاضر که از یک سو، انرژی‌های تجدیدپذیر و نوین هنوز در حال توسعه هستند و نمی‌توان تنها بر آنها تکیه کرد، و از طرفی، با توجه به کاهش ذخایر انرژی و مسائل زیست محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه بشر، نیاز به وسایل الکترومکانیکی مولد نیرو در ابعاد کوچک، با وزن اندک

و عمر طولانی بیشتر احساس می‌شود و 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>. با توجه به تحقیقات آزمایشگاهی پیشین صورت گرفته از منظر احتراق کلاسیک، غیر ممکن است بتوان در ابعادی که به عنوان فاصله یا قطر خاموشی مطرح هستند احتراق پایدار ایجاد کرد<sup>[2]</sup>. یکی از موانع ایجاد احتراق پایدار درون راکتورهایی با این مقیاس، وجود کوپلینگ حرارتی و شیمیایی قوی میان شعله و دیواره‌های راکتور، به دلیل نزدیکی شعله به دیواره جامد و وقوع پدیده فروکشی شعله می‌باشد. در نزدیکی یک سطح جامد، اتلاف گرما به قدری زیاد است که فروکشی یا خاموشی شعله رخ خواهد داد<sup>[3]</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. در جدول [4,5] و تعریف احتراق میکرو به شکل خلاصه نشان داده شده است.

از ابتدایی‌ترین تحقیقات تجربی در حوزه احتراق خرد می‌توان به کار جاروسینسکی<sup>[6]</sup> اشاره کرد؛ وی با مطالعه خاموشی شعله متان- هوا در کانال‌های باریک، نتیجه گرفت شعله‌ای که در کانال‌های باریک انتشار می‌یابد، به دلیل اتلاف حرارت رسانشی از سوی دیواره، از بین می‌رود و همچنین دریافت که فاصله خاموشی در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف در حدود ۲ برابر ضخامت شعله است. سیتزکی و همکاران<sup>[7]</sup> احتراق در یک محفظه احتراق خرد مارپیچی را با استفاده از یک دیواره کاتالیست مورد بررسی قرار دادند؛ آنها در تحقیقات خود نشان دادند که اگر عدد رینولدز جریان کمتر از ۲۰ باشد می‌توان احتراق مناسبی را در این نوع محفظه احتراق میکرو شاهد بود. رونی<sup>[8]</sup> به بررسی و مدل‌سازی حدهای خاموشی و مکانیزم‌های حدی در محفظه‌های احتراق استوانه‌ای با چرخش حرارتی پرداخت و نقش دیواره را در

**جدول ۱** روش‌های طبقه‌بندی پیشنهاد شده برای جریان واکنش دهنده‌های احتراق خرد

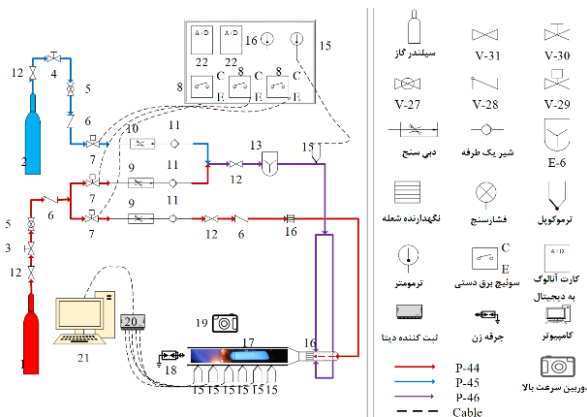
شاخص	رژیم	پایه
$L < 1 \text{ mm}$ $1 \text{ mm} < L < 10 \text{ mm}$	مقیاس میکرو مقیاس مزو	طول فیزیکی (L)
$L < \delta q$ $L / \delta q \sim (1-10)$	مقیاس میکرو مقیاس مزو	قطر خاموشی مرجع ( $\delta q$ )
$2000 < A/V$ $A/V \sim 1000$	مقیاس میکرو مقیاس مزو	نسبت سطح به حجم A/V
$10 < LR < 100$ $LR < 1000$	مقیاس میکرو مقیاس مزو	طول دستگاه مرجع (LR)

پلاتینیومی برای تجزیه کردن هیدروژن پراکسید می باشد. میکروپیشران ساخته شده توسط آنها با روی هم قرار دادن چهار لایه آلومینای بزرگ ۲/۵ در ۲/۵ سانتی متر با ضخامت ۱۵۰ میکرومتر ساخته شده است. در ادامه پژوهش ها بیگ محمدی و همکاران<sup>[17-19]</sup> به تحقیق بر روی اثرات هندسه راکتور و همچون ایجاد پله در ورودی جریان، عدد رینولدز و نسبت هم آرزوی بر دینامیک شعله پیش آمیخته متان- اکسیژن همراه با رقیق سازی با دی اکسید کربن و اثرات گرمادهی به دیواره راکتور را مورد بررسی قرار دادند. ای و همکاران<sup>[20]</sup> به بررسی افزایش عملکرد احتراق متان- هوا پیش مخلوط شده در یک محفظه احتراق خرد دو مرحله ای پرداختند، آنها نشان دادند که یک زاویه پله مناسب و سرعت ورودی برای تقویت پایداری احتراق پیش مخلوط متان متشکل از احتراق خرد دو مرحله ای بسیار مفید است، همچنین این جریان پیش مخلوط متان در احتراق خرد دو مرحله ای تحت تأثیر جنس مواد دیواره قرار دارد. میلرک و همکاران<sup>[21,22]</sup> بر روی کاربردهای سلول های توان- گرمایی و بهینه سازی این نوع احتراق برای کاربرد در سلول های سوخت جامد اکسیدکننده احتراق میکرو اتان- هوا به تحقیق پرداختند. کیان و همکاران<sup>[23]</sup> به بررسی تجربی احتراق در شرایط متخلخل مزو با بازدهی بالا در حالت نسبت هم آرزوی بسیار پایین برای کاربرد در سیستم های ترموالکتریک پرداختند. ژائو و همکاران<sup>[24]</sup> ویژگی های شعله میکرو پیش مخلوط پروپان/ هوا، در یک احتراق متخلخل با جریان مخالف را مورد بررسی قرار دادند، آنها دریافتند که در این نوع احتراق به طور موثر می توان با حفظ دمای یکنواخت بر روی دیوار خارجی به تثبیت محل شعله کمک شایانی نماید. و نرخ همرفتی بین مخلوط های متخلخل و تازه با افزایش قدرت مخلوط سوخت ورودی افزایش می یابد. علاوه بر این، تا حدی پر شدن یک محیط متخلخل و ساختار جریان مخالف در این نوع احتراق می تواند کمک نماید تا شعله با وجود کاهش سرعت جریان مخلوط ورودی در موقعیت خود تثبیت شود. کوئی و همکاران<sup>[25]</sup> بر روی ویژگی های احتراق متان- اکسیژن پیش آمیخته در یک محفظه متخلخل استوانه ای به تحقیق پرداختند بر اساس یافته های آنها مشخص شد که رابطه بین کارایی سیستم با نسبت اختلاط و سرعت ورودی یکنواخت نیست، بلکه به توزیع دمای دیوار و شرایط شعله مربوط می باشد. کارایی سیستم آنها زمانی به اوج خود می رسد که نسبت اختلاط سوخت به اکسنده در حدود ۰/۷۰ باشد. با وجود تحقیقات گسترده صورت گرفته در حوزه پدیده شناسی و دینامیک شعله های ابعاد کوچک، تا کنون کلیه ابعاد آن به طور کامل توسط محققان مورد بررسی و مطالعه قرار نگرفته است. از آن جمله می توان به دینامیک شعله های پیش مخلوط جزئی اشاره کرد، شعله های پیش مخلوط دارای راندمان احتراقی بیشتر و آلاینده های کمتر می باشند ولی به دلیل احتمال بروز انفجار در اکثر تجهیزات صنعتی از شعله های غیر پیش مخلوط استفاده می گردد.

خاموشی ها بررسی کرد، وی مدل سازی هایش را به صورت دو بعدی انجام داد ولی با وجود به کارگیری مدل های ساده شیمی احتراقی، کار او جهت مشخص کردن حدهای اشتعال پذیری بسیار مهم بود. ژانگ و همکاران<sup>[9]</sup> به مطالعه جرقه زن ها در محفظه های احتراق میکرو پرداختند. بر این اساس جرقه زن های پلی-سیلیکون به صورت فیلم های نازک روی میکرو موتورهای سیلیکونی قرار داده شده، با عبور جریان الکتریکی، این فیلم ها در اثر مقاومت ایجاد شده گرم می شوند و در نتیجه احتراق آغاز می شود. دما بر روی جرقه زن ها به حدود ۹۰۰ درجه سانتی گراد می رسد، که برای استفاده در یک میکروتوربین گازی مناسب می باشد. همچنین، ماروتا و همکاران<sup>[10]</sup> به بررسی احتراق پیش-آمیخته در یک راکتور استوانه ای پیش گرم شده از جنس کوارتز پرداختند. تحقیقات ایشان به صورت تجربی و عددی به بررسی ویژگی های شعله و حدود پایداری شعله های مختلف در ابعاد زیر قطر خاموشی پرداخته است. بویارکو و همکاران<sup>[11]</sup> بر روی احتراق کاتالیستی هیدروژن-اکسیژن در لوله های پلاتینیومی برای کاربردهای میکروپیشران به فعالیت پرداختند.

میکامی و همکاران<sup>[12]</sup> احتراق سوخت گازی پروپان و سوخت مایع اتانول- نرمال هپتان در یک راکتور میکرو مجهز به یک شبکه توری شکل از سیم های فلزی را مورد بررسی و تحقیق قرار دادند. ایشان طی این مطالعه، وقوع دو رژیم شعله ضعیف و معمولی را گزارش نموده اند. صرافان صادقی و همکاران<sup>[13-15]</sup> به بررسی اثر نسبت هم آرزوی، عدد رینولدز مخلوط ورودی و درصد رقیق سازی نیتروژن بر دینامیک شعله مخلوط پیش آمیخته متان- اکسیژن در راکتور استوانه ای از جنس کوارتز در مقیاس مزو پرداختند. بر اساس نتایج آزمایش های آنها، تشکیل شعله پایدار یا شعله خاموش شونده و روشن شونده تکرارپذیر درون راکتور، با افزایش عدد رینولدز محدود می شود، به طوری که ممکن است با افزایش سرعت جریان در داخل راکتور، حتی در نسبت هم آرزوی های نزدیک به حالت استوکیومتریک شعله در داخل راکتور تشکیل نگردد. بر این اساس تشکیل شعله پایدار یا شعله خاموش شونده و روشن شونده تکرارپذیر درون راکتور، با افزایش عدد رینولدز محدود می شود؛ به طوری که ممکن است با افزایش سرعت جریان داخل راکتور، حتی در نسبت هم آرزوی های نزدیک به حالت استوکیومتریک نیز شعله درون راکتور تشکیل نگردد. بر اساس آزمایش های آنها همچنین رقیق سازی با نیتروژن، باعث افزایش قابل توجه زمان شروع واکنش در داخل راکتور می گردد. همچنین دریافتند سرعت شعله با تغییرات نسبت هم آرزوی متناسب بوده و با افزایش درصد رقیق سازی نیتروژن، کاهش می یابد.

خاجی و همکاران<sup>[16]</sup> بر روی میکروپیشران تک پیشراندهی بر پایه ی آلومینا مجهز به گرم کن برقی در بستر کاتالیستی مجهز به حسگرهای دما به مطالعه و تحقیق پرداختند، میکروپیشران آن ها با پیشراندهی مایع بوده و ساخته شده از آلومینا با بستر کاتالیستی

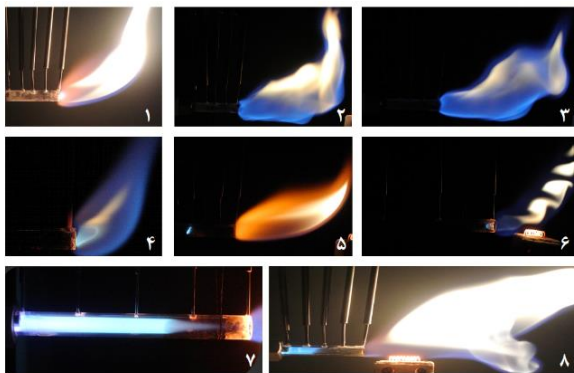


شکل ۲) طرح شماتیک مدار بستر آزمون و تجهیزات آن

### ۳- معرفی رژیم‌های شعله

در این بخش به معرفی رژیم‌های شعله مشاهده شده در احتراق پیش‌آمیخته جزئی متان و اکسیژن، در راکتور مزو و بررسی و تحلیل علل تشکیل هر نوع از رژیم‌های شعله پرداخته شده است. آزمون‌های اصلی انجام شده، همگی در محدوده اشتعال پذیری بوده و از این رو در آزمون‌های اصلی، خاموشی یا عدم تشکیل شعله رخ نداده است. رژیم‌های شعله مشاهده شده که نمایی از آنها در شکل ۳ نشان داده شده است. (به ترتیب از پایین دست به سمت بالادست جریان) عبارتند از:

- ۱) شعله خارجی؛
  - ۲) شعله جداشونده (جدا شده)؛
  - ۳) شعله چسبیده؛
  - ۴) شعله مرزی؛
  - ۵) شعله ایستای نامتقارن؛
  - ۶) شعله ایستای متقارن؛
  - ۷) شعله نوسانی (خاموشی و اشتعال مکرر)؛
  - ۸) بازگشت شعله (پس زنی شعله).
- در شکل ۲ سعی شده است تا نمونه‌ای جهت معرفی و نمای کلی



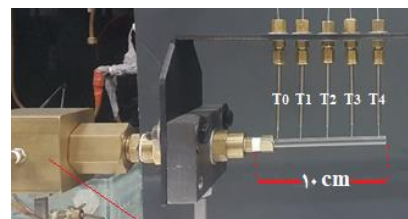
شکل ۳) نمایی از شعله‌های تشکیل شده (به ترتیب شماره): ۱) شعله خارجی، ۲) شعله جداشونده، ۳) شعله چسبیده، ۴) شعله مرزی، ۵) شعله ایستای نامتقارن، ۶) شعله ایستای متقارن، ۷) شعله نوسانی، ۸) بازگشت شعله

از این رو و در تکمیل زنجیره مطالعات صورت گرفته [26] به بررسی تجربی اثر پارامترهای مختلف بر روی شعله پیش آمیخته جزئی متان-اکسیژن در داخل یک راکتور استوانه‌ای مقیاس مزو با طول ثابت پرداخته شده است. در این تحقیق اثر متغیرهایی همچون نسبت هم‌ارزی، سرعت مخلوط ورودی، نسبت پیش‌آمیختگی جزئی بر روی احتراق متان-اکسیژن درون راکتور مقیاس مزو و تأثیر آن بر فرکانس شعله نوسانی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

### ۲- بستر آزمون

استفاده از تجهیزات و بستر آزمون استاندارد همراه با دقت عمل آزمون‌گیرنده تأثیر بسزایی بر کیفیت آزمایش‌ها و حصول نتایج دقیق و مطلوب دارد. بستر آزمون احتراق میکرو مورد استفاده از بستر آزمون موجود در آزمایشگاه احتراق دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران) [14,15,25] همراه با بروزسانی‌هایی در بخش محفظه اختلاط سوخت و اکسید کننده صورت گرفته است. در این بروزسانی بستر حجم محفظه آرامش برابر ۰/۱۱۳ لیتر طراحی و در مدار بستر آزمون مطابق شکل ۱ قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، راکتور استوانه‌ای شکل مورد استفاده از جنس کوارتز بوده و مشخصات ابعادی آن شامل قطر داخلی ۵ میلی‌متر و طول ۱۰ سانتی‌متر با ضخامت دیواره ۱ میلی‌متر می‌باشد که برای احتراق پیش‌آمیخته جزئی مورد استفاده واقع شده است، این راکتور به شکل افقی در بستر آزمون استقرار یافته است. در شکل ۱ محل استقرار و شماره ترموکوپل‌های مورد استفاده نشان داده شده است. در این پژوهش از متان گرید ۵ به عنوان سوخت و جهت اکسیدکننده از اکسیژن گرید ۴ مورد استفاده قرار گرفته است.

تمامی آزمایش‌ها در دمای محیط حدود  $20 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد انجام گرفته‌اند. جهت اندازه‌گیری دبی سیال و فشار آن به ترتیب از دبی‌سنج‌های و فشارسنج‌های دیجیتالی شرکت نیوفلو با خطای ۰/۱ درصد کل ظرفیت اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دیاگرام جریانی بستر تست آزمون مورد نظر به همراه سیستم‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است.



محفظه پیش‌مخلوط

شکل ۱) نمای از بستر بازطراحی شده

تأثیر سایر پدیده‌ها بر احتراق مزو پرداخت، که در ادامه به معرفی آن پرداخته شده است.

#### ۴- تشریح نتایج و بحث

##### ۴-۱- بررسی تأثیرات دبی حجمی، نسبت هم‌آزری و عدد رینولدز بر رژیم شعله ابعاد مزو

در ادامه تأثیر دبی حجمی واکنش‌دهنده‌ها، نسبت هم‌آزری، عدد رینولدز جریان (در محدوده جریان آرام) و نسبت پیش اختلاط بر احتراق مزو در یک راکتور با طول و هندسه ثابت بررسی می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده، شعله پایدار ایستا به صورت یک شعله با بازه پایداری بالا 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. به علاوه در این پژوهش، فرکانس شعله‌های نوسانی همراه با شدت صوت خاموشی مورد بحث و

از شعله ارائه گردد و در ادامه به بررسی و معرفی بیشتر رژیم شعله‌های معرفی شده و در جدول ۲ خواص فیزیکی و ظاهری انواع شعله‌های بالا ذکر گردیده است.

برای تحلیل خواص شعله لازم به یادآوری است که در احتراق میکرو، اثرات تأثیرگذار اصلی بر نوع و خواص شعله عبارتند از: نسبت هم‌آزری، نسبت پیش اختلاط، جنس و هندسه راکتور، ضخامت و خواص انتقال حرارت دیواره‌های راکتور، اثر سطح، سرعت و رینولدز جریان، نوع سوخت و اکسنده، به همین علت برای تحلیل احتراق و دینامیک شعله به تنهایی بر اساس چند پارامتر نمی‌توان به قطعیت صحبت کرد بلکه باید تمامی عوامل مختلف را همزمان مورد بررسی قرار داد که در عمل به دلیل تعدد پارامترها و تأثیرات بعضاً متضاد آنها بر یکدیگر و کوپل بودن پدیده‌های مختلف با یکدیگر، این عمر بسیار مشکل می‌باشد. در این پژوهش سعی شده است با ثابت نگه داشتن نوع سوخت و اکسنده در کنار ثابت بودن هندسه و نوع راکتور بتوان به بررسی و

جدول ۲) معرفی رژیم‌های شعله و خواص فیزیکی آن‌ها

ردیف	نوع رژیم شعله	نوع تشکیل جبهه شعله	محل تشکیل جبهه شعله	استاتیک/ دینامیک شعله	دنباله (تاج شعله)	وضعیت ظاهری- نور	صوت احتراق و خاموشی
۱	شعله خارجی	Blow out	مخروط به سمت پایین دست (خارج راکتور)	متصل به راکتور و خارج آن	ایستا- پایا- خوداتکا (خودکفا)	دنباله سه رنگ پر نور خیره کننده ناشی از احتراق کربن نسوخته در جبهه شعله	بدون صوت
۲	شعله جداشده	Lift off	به صورت پوسته‌ای توخالی و نازک	خارج و با فاصله از لبه راکتور	دور و نزدیک شونده به لبه راکتور- ناپایا- خوداتکا	بدون دنباله- شعله با طول بلند- رنگ آبی	صوت نوسانی ممتد
۳	شعله چسبیده	Blow off (attached)	به صورت پوسته‌ای توخالی و نازک	چسبیده به لبه و خارج از راکتور	ایستا- پایا- خوداتکا	بدون دنباله- شعله با طول بلند- رنگ آبی	صوت ممتد نوسانی با دو مود صدای زیر و بم
۴	شعله مرزی	Marginal	کمانی (صفحه خمیده) نازک و مورب با شیب مثبت	بخشی از جبهه شعله داخل و بخشی از آن خارج راکتور	ایستا- پایا- خوداتکا	دنباله سه رنگ به همراه دوده زیاد تابش نورانی	بدون صوت
۵	شعله ایستای نامتقارن (شبه‌ایستا)	Asymmetric (non-axisymmetric stationary/ Quasi-static)	کمانی نازک و مورب با شیب مثبت، حلقوی، مورب با شیب منفی و قطاعی (کمتر از ۳۶۰°)	نفوذ شعله به سمت بالادست و درون راکتور و توقف در نزدیکی محل تزریق سوخت	پس از زمان گذار: ایستا- پایا- خوداتکا	دنباله شعله جدا و در خارج راکتور به رنگ نارنجی و تولید دوده زیاد شکل - پر نور	بدون صوت
۶	شعله ایستای متقارن	Symmetric stationary	به صورت مخروطی به سمت پایین دست با توزیع متقارن محوری جبهه شعله	نفوذ شعله به درون راکتور و توقف در اطراف لوله تزریق سوخت	پس از زمان گذار: ایستا- پایا- خوداتکا	دارا یا فاقد دنباله جدا شده در خارج راکتور- تشکیل دوده درون راکتور	بدون صوت
۷	شعله نوسانی (خاموشی و اشتعال مکرر)	Repetitive Extinction and Relignition (RERI/ FREI)	معمولاً متقارن محوری و مخروطی به سمت بالا دست جریان	تشکیل در خارج، نفوذ شعله به درون راکتور، گاهی حرکت رفت و برگشتی و خاموشی در شعله‌گیر	متحرک، پایا، خودکفا (تشکیل شعله مجدد پس از خاموشی شعله پیشین)	دارای دنباله خارج از محفظه با رنگ متغیر یا فاقد دنباله پایا	صوت خاموشی بلند و غیر ممتد و صوت احتراق ضعیف غیر ممتد یا بدون صوت
۸	بازگشت شعله	Flashback	جبهه شعله غیر قابل تشخیص با سرعت بازگشت بالا	تشکیل در خارج، نفوذ شعله به درون راکتور و خاموشی در شعله‌گیر	متحرک (حرکت به سمت بالادست با سرعت بسیار زیاد)، ناپایا، غیر خوداتکا	بدون دنباله (شعله پیوسته از خارج راکتور تا شعله‌گیر)	صوت خاموشی شدید انفجارگونه آبی‌رنگ





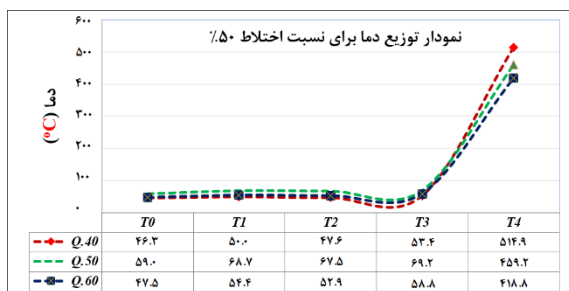
میانگین آزمون‌ها برای دیواره خارجی راکتور برای رژیم شعله مرزی را برای دبی ثابت ۰/۵ لیتر بر دقیقه و نسبت اختلاط ۵۰٪ نشان داده شده است. داده‌ها نشان از همگرایی دمایی برای درصد دبی سوخت مختلف دارد. این مهم را می‌توان به کوپل بودن عوامل مختلف و نوع شعله مرتبط دانست. ضمناً در نمودار زیر، دمای بالای ترموکوپل ۴ متأثر از دنباله شعله است. در این آزمایش‌ها افزایش پراکندگی دما (افزایش طول شعله) با افزایش دبی حجمی اکسیژن؛ و همچنین کاهش دبی حجمی متان در دبی حجمی ثابت اکسیژن، در شکل ۷ 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 بالاتر ترموکوپل ۴، از نزدیکی به تشعشع شعله 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 به عبارت ساده‌تر این فرآیند تشکیل یک کوپل به هم وابسته از علت و معلول را جهت دوام در تشکیل قطرات آب و ایجاد دمای پائین‌تر راکتور در نقاط ترموکوپل‌های ۲ و ۳ ناشی می‌گردد. بدین معنا که به علت دمای پایین‌تر ترموکوپل و تاثیر آن بر بدنه راکتور شرایط را برای تشکیل قطرات آب مهیا کرده و تاثیر 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 (شکل ۸) و به علت خارج شدن شعله از درون محفظه و آن نقطه کمک به سردتر شدن آن ناحیه می‌نماید. مطابق شکل ۹، در نسبت اختلاط‌های بالاتر، توزیع دما یکنواخت‌تری مشاهده می‌شود. با افزایش دبی جریان و طول راکتور، یکنواختی توزیع

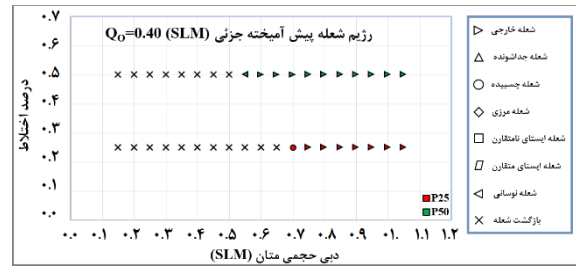


نمایی از تشکیل قطرات آب در خروجی راکتور

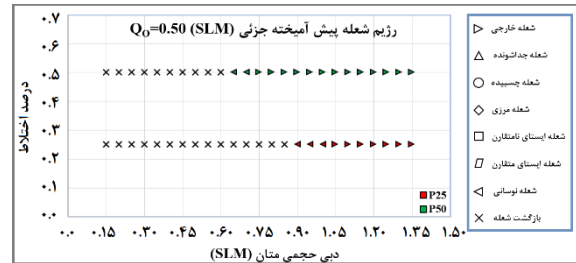
شکل ۸) نمایی از تشکیل قطرات آب درون راکتور



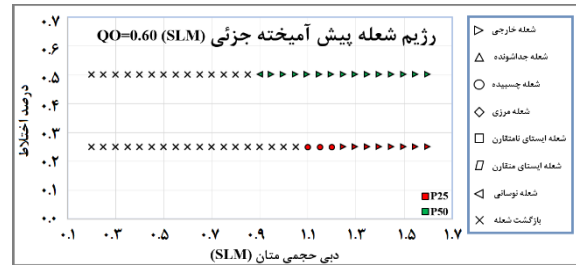
شکل ۹) نمودار توزیع دمای متوسط دیواره خارجی راکتور در دبی اکسیژن‌های ۰/۴۰، ۰/۵۰ و ۰/۶۰ لیتر بر دقیقه برای نسبت اختلاط ۵۰٪.



(الف)



(ب)

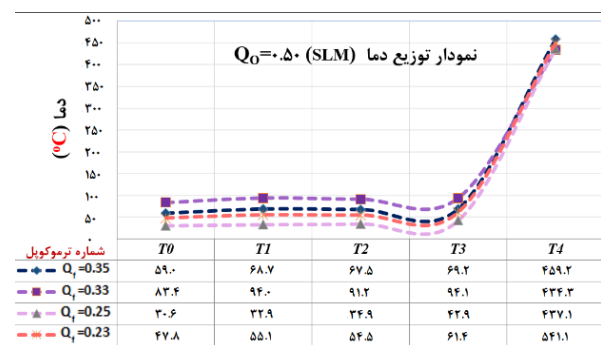


(ج)

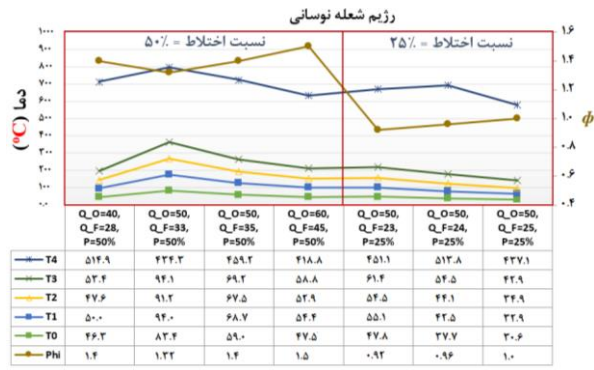
شکل ۶) نمودار رژیم شعله در نسبت اختلاط‌های ۲۵٪ و ۵۰٪ برای دبی حجمی اکسیژن ۰/۴۰، ۰/۵۰، ۰/۶۰ لیتر بر دقیقه

#### ۴-۲- بررسی توزیع دمای میانگین دیواره خارجی راکتور برای رژیم‌های شعله مرزی، جداشونده و نوسانی

اکنون به بررسی نتایج نمودارهای توزیع دمای دیواره خارجی راکتور جهت رژیم‌های شعله مرزی، جداشونده و نوسانی پرداخته شده است. ترموکوپل‌های مورد استفاده از تیپ K با قطر ۲ میلی‌متری بوده اند که به دیواره بیرونی راکتور به صورت عمودی (مطابق شکل ۳) متصل شده است. برای حصول اطمینان از انتقال حرارت بی‌نقص از راکتور به ترموکوپل، در محل اتصال از خمیر حرارتی استفاده شده است. در نمودارهای شکل ۷ توزیع دمای



شکل ۷) آنالیز EDS از شمش تولید شده در جهت طول شمش



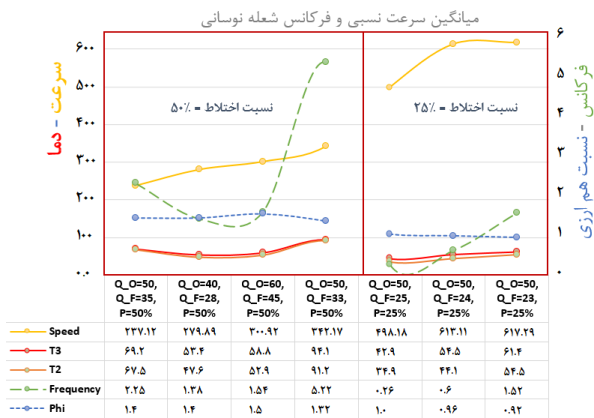
شکل ۱۱) نمودار توزیع درجه حرارت دیواره خارجی راکتور دارای رژیم شعله نوسانی

این مهم‌ترین تأثیر را بر روی دوام و طول عمر راکتور دارد؛ ولی برای بسیاری از سیستم‌های کاربردی که به دمای دیواره بالاتری نیاز است، شاید بتوان نسبت هم‌ارزی ۱/۳۲ در نسبت اختلاط ۵۰٪ را گزینه‌ای مناسب‌تری تلقی نمود. البته این شاخص به تنهایی کفایت نمی‌کند و باید در این رابطه پارامترهای دیگری همچون پایداری شعله و کاربرد آن مدنظر قرار گیرد.

با توجه به بازه تشکیل شعله نوسانی مزو در نسبت پیش‌مخلوط‌های کمتر می‌توان این امر را ناشی از تأثیر گرادیان‌های بیشتر دمایی و بویانسی و اثر آن در میزان تأثیر دیفیوز گازها در جهت ایجاد مخلوط همگن مربوط دانست. البته شکل شعله‌های تشکیل شده در این بازه از پیش‌مخلوط جزئی و زاویه زیاد شعله نسبت به افق نیز این فرض را تأیید می‌کند.

### ۳-۴- نمودارهای سرعت نسبی میانگین شعله نوسانی و بسامد میانگین آن

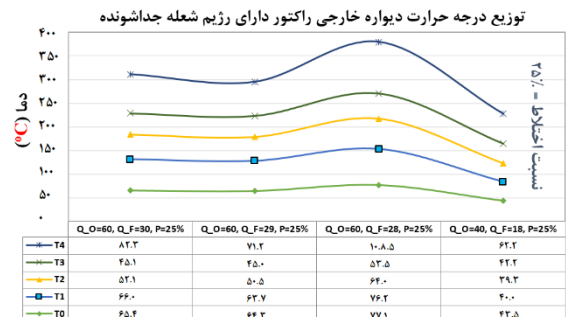
نمودارهای میانگین سرعت نسبی شعله نوسانی و بسامد (فرکانس) خاموشی و تشکیل مجدد شعله‌های نوسانی، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این شکل جهت درک بهتر اثرات مختلف دمای ترموکوپل‌های ۲ و ۳ که در مرکز راکتور واقع هستند



شکل ۱۲) نمودارهای میانگین سرعت نسبی و فرکانس شعله نوسانی برای تمامی آزمایشات با این رژیم شعله

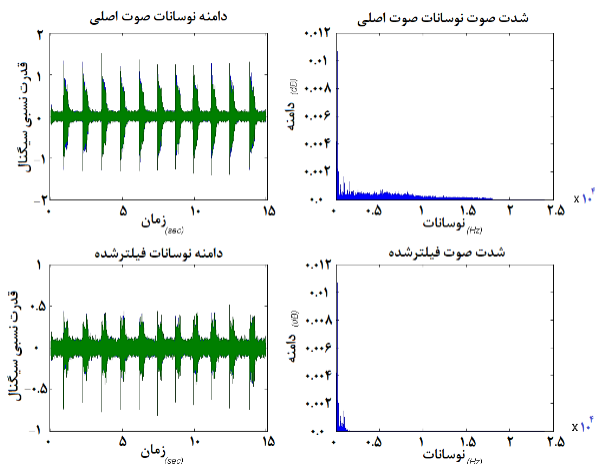
دمای دیواره خارجی راکتور کاهش می‌یابد ولی در نسبت‌های اختلاط بالا، گرادیان دمای پایین‌تری در مقایسه با دبی جریان و طول راکتور کمتر و نسبت اختلاط یکسان مشاهده می‌شود. در نمودار شکل ۹ افزایش پراکندگی دما (افزایش طول شعله) در درصد اختلاط ثابت ۵۰٪ را شاهد هستیم در این حالت با افزایش دبی حجمی اکسیژن را شاهد هستیم این مهم می‌توان به علت بالاتر رفتن نرخ دبی کل و سرعت مخلوط مرتبط دانست که با افزایش دبی کل، کاهش دمای ترموکوپل ۴ مشهود است که به علت انتقال حرارت بالاتر به دلیل دبی کل مخلوط بالاتر، قابل توضیح می‌باشد. در نمودار شکل ۱۰، تغییرات دمایی دیواره راکتور برای رژیم شعله جدا شونده برای نسبت اختلاط ۲۵٪ نشان داده شده است. در این نمودار، افزایش دمای کلی راکتور با کاهش نسبت هم‌ارزی که همراه با کاهش نسبی دبی کلی جریان برای دبی اکسیژن ثابت ۰/۶۰ لیتر بر دقیقه می‌باشد، مشاهده می‌شود. این مهم را می‌توان به دلیل نزدیک شدن نسبت هم‌ارزی به نسبت استوکیومتری توأم با تأثیر کاهش دبی کل مرتبط دانست که باعث افزایش دمای کلی راکتور به خصوص دمای نقاط نزدیک به خروجی راکتور (محل استقرار ترموکوپل ۴) شده است.

در نمودار شکل ۱۱ تغییرات دمای دیواره خارجی راکتور برای شعله نوسانی در دو نسبت اختلاط ۲۵٪ و ۵۰٪ نشان داده شده است. دنده‌های نمودارهای توزیع دمای دیواره خارجی راکتور برای شعله‌های نوسانی، در طول بازه زمانی ۵ ثانیه‌ای فعالیت رژیم شعله نوسانی توسط ترموکوپل‌ها ثبت گردیده‌اند. همان‌گونه که در نمودار مشخص است، بین دمای دیواره با نسبت سوخت و اکسنده رابطه عکس برقرار است و این نشان دهنده آن است که با نزدیک شدن به نسبت هم‌ارزی استوکیومتری، همگرایی و یک نواختی بیشتری در دماهای دیواره خارجی راکتور قابل مشاهده است؛ البته این مهم باید با نوسان شعله و فرکانس آن در نظر گرفته شود. برای نسبت اختلاط ۲۵ درصد و نسبت هم‌ارزی سوخت به اکسنده ۱، بهترین حالت از یکنواختی و کاهش نسبی دمای دیواره (گرادیان دمای مطلوب‌تر) مشاهده گردیده، که البته این مهم به تنهایی نمی‌تواند معیاری برای تلقی شرایط بهینه محسوب شود، هر چند

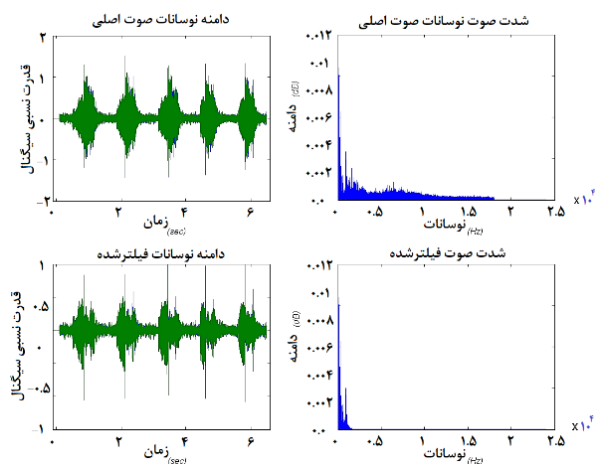


شکل ۱۰) نمودار توزیع درجه حرارت دیواره خارجی راکتور دارای رژیم شعله جداشونده

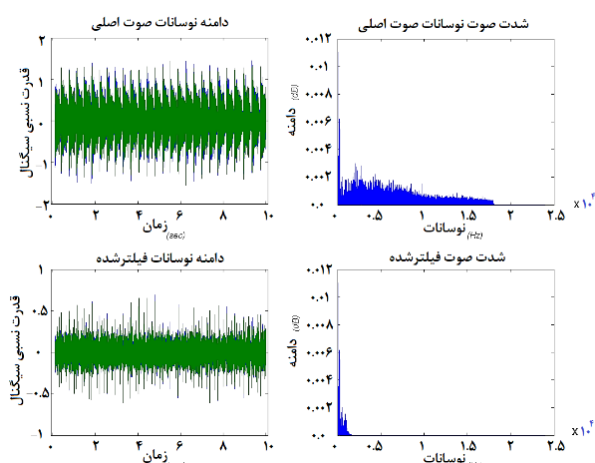




شکل ۱۳) نمودارهای شدت صوت و دامنه نوسانات صوت اصلی و فیلترشده برای شعله نوسانی با دبی حجمی اکسیژن ۰٫۴۰٪ و دبی حجمی سوخت ۰٫۲۸ لیتر بر دقیقه با نسبت پیش مخلوط ۵۰٪



شکل ۱۴) نمودارهای شدت صوت و دامنه نوسانات صوت اصلی و فیلترشده برای شعله نوسانی با دبی حجمی اکسیژن ۰٫۵۰٪ و دبی حجمی سوخت ۰٫۳۵ لیتر بر دقیقه با نسبت پیش مخلوط ۵۰٪



شکل ۱۵) نمودارهای شدت صوت و دامنه نوسانات صوت اصلی و فیلترشده برای شعله نوسانی با دبی حجمی اکسیژن ۰٫۵۰٪ و دبی حجمی سوخت ۰٫۲۳ لیتر بر دقیقه با نسبت پیش مخلوط ۲۵٪

در کنار نسبت هم‌ارزی ارائه شده است، همچنین جهت تحلیل بهتر پدیده‌ها نسبت اختلاط ۲۵٪ و ۵۰٪ در شکل تفکیک شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است فرکانس شعله نوسانی متأثر از تأثیرات متضاد سرعت جریان با نسبت هم‌ارزی و دمای دیواره‌ها می‌باشد، رفتار سرعت جریان و شعله نوسانی با نسبت هم‌ارزی عکس یکدیگر می‌باشد. البته شدت این رفتار در نسبت‌های هم‌ارزی نزدیک تر به نسبت استوکیومتری کمتر می‌باشد ولی با افزایش نسبت هم‌ارزی و ایجاد مخلوط غنی از سوخت، این تضاد بیشتر می‌گردد. البته سرعت جریان رابطه مستقیمی با دمای دیواره‌ها دارد؛ زیرا دمای بالاتر دیواره باعث افزایش سرعت جریان و شعله نوسانی می‌گردد. به عبارت دیگر، می‌توان گفت با توجه به نمودار سرعت شعله نوسانی، شاهد افزایش سرعت نسبی شعله در آزمایش‌هایی با دبی حجمی اکسیژن و نسبت اختلاط ثابت، و دبی حجمی متان کمتر، هستیم که مطابق انتظار است. از طرفی برای نسبت اختلاط ۵۰٪، تغییرات دبی حجمی اکسیژن، چندان تأثیری بر تغییر سرعت شعله ندارد.

#### ۴-۴-۴- نمودارهای شدت صوت احتراق و خاموشی شعله و دامنه و بسامد آن

در این بخش به نتایج حاصل از آزمایش‌ها و بررسی صوت احتراق پرداخته می‌شود. با توجه به ذات راکتور و ابعاد آن تشکیل شعله و عبور جریان درون آن همراه با صوت می‌باشد و هر نوع از شعله دارای سری خواص صوتی مختص خویش می‌باشند که در ادامه، چند نمونه از نمودارهای صوت احتراق و خاموشی شعله، (نمودارهای شدت صوت بر حسب زمان و دامنه بر حسب فرکانس، هم برای صوت اصلی و هم برای صوت فیلترشده با فیلتر ButterWorth مرتبه هفتم) ارائه می‌گردد. در نمودارهای شکل ۱۳ نمودارهای شدت صوت و دامنه نوسانات صوت اصلی و فیلترشده برای شعله نوسانی با دبی حجمی اکسیژن ۰٫۴۰٪ و دبی حجمی سوخت ۰٫۲۸ لیتر بر دقیقه با نسبت پیش مخلوط ۵۰٪ و در نمودارهای شکل ۱۴ نمودارهای شدت صوت و دامنه نوسانات صوت اصلی و فیلترشده برای شعله نوسانی با دبی حجمی اکسیژن ۰٫۵۰٪ و دبی حجمی سوخت ۰٫۳۳ لیتر بر دقیقه با نسبت پیش مخلوط ۵۰٪ ارائه شده است و در انتها و در شکل ۱۵ نمودارهای شدت صوت و دامنه نوسانات صوت اصلی و فیلترشده برای شعله نوسانی با دبی حجمی اکسیژن ۰٫۵۰٪ و دبی حجمی سوخت ۰٫۲۳ لیتر بر دقیقه با نسبت پیش مخلوط ۲۵٪ ارائه گردیده است. در نمودارهای فوق، قله‌ها، نماینده شدت صوت خاموشی شعله، دره‌ها، نماینده شدت صوت احتراق و دوره تناوب، نماینده فرکانس خاموشی و تشکیل مجدد شعله و میزان مشابهت دوره‌ها به هم، را می‌توان به عنوان شاخص پایایی احتراق دانست. نمودارهای صوت فوق همچنین بیانگر افزایش سرعت شعله نوسانی با افزایش دبی حجمی و نسبت اختلاط هستند. صوت خاموشی بلند، از

**تشکر و قدردانی:** این پژوهش تجربی در آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است. نویسندگان این اثر، کمال تشکر و سپاسگزاری خویش را از کلیه همکاران این آزمایشگاه و یاری کنندگان و مسئولان دانشکده، ابراز می‌دارند.

**تاییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. 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 منافی با پایان نامه/رساله و طرح پژوهشی ندارد.

**سهم نویسندگان:** علی زرگرباشی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛

سروش صرافان صادقی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۰٪)؛

صادق تابع جماعت (نویسنده سوم)، استاد راهنما/پژوهشگر اصلی (۲۰٪).

**منابع مالی:** منابع مالی استفاده شده برای این تحقیق از محل تسهیلات مالی آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر تأمین شده است.

#### منابع

- 1- Waitz IA, Gauba G, Tzeng YS. Combustors for micro-gas turbine engines. *Journal of Fluids Engineering*. 1998; 120: 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):258-69.
- 3- Barnard, J. A., Bradley, J. N., Khoshnoudi, M., editors, *Flame and combustion*. 1st edition. University Publication Center, Tehran, 1989. [Persian].
- 4- Hua J, Wu M, 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*. 2005;60(13):3507-15.
- 5- Kim NI, Maruta K. A numerical study on propagation of premixed flames in small tubes. *Combustion and flame*. 2006;146(1-2):283-301.
- 6- Jarosiński J. Flame quenching by a cold wall. *Combustion and Flame*. 1983;50:167-75.
- 7- Sitzki L, Borer K, Wussow S, Maruta E, Ronney P. Combustion in microscale heat-recirculating burners. In 39th Aerospace sciences meeting and exhibit 2001 (p. 1087).
- 8- Ronney PD. Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors. *Combustion and Flame*. 2003;135(4):421-39.
- 9- Zhang X, Mehra A, Ayón AA, Waitz IA. Igniters and temperature sensors for a micro-scale combustion system. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2003;103(1-2):253-62.
- 10- Maruta K, Kataoka T, Kim NI, Minaev S, Fursenko R. Characteristics of combustion in a narrow channel with

تبدیل بخشی از انرژی حرارتی شعله به صوت، در شعله‌گیر و امواج مرتعش صوتی حاصل از خاموشی شعله و اختلاف سرعت گاز، ناشی می‌شود. که به مرور دمپ می‌گردد، در این حالت شاهد تأثیر مستقیم نسبت پیش اختلاط و نسبت هم‌ارزی بر شدت صوت خاموشی شعله می‌باشیم. با افزایش نسبت هم‌ارزی سوخت به اکسیژن شاهد افزایش شدید صوت خاموشی هستیم البته این مهم همراه با افزایش زمان پایای نوسانات شعله می‌باشد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

رژیم‌های شعله‌ی مشاهده شده در احتراق پیش‌آمیخته جزئی در راکتور مزو با طول ثابت، پایداری کمی داشته و تحت تأثیر پارامترهایی چون نسبت اختلاط، نسبت هم‌ارزی، سرعت جریان و شرایط ترمودینامیکی محفظه احتراق می‌باشند. شعله نوسانی را می‌توان اصلی‌ترین رژیم احتراق اصلی درون راکتور در این نوع احتراق نامید که برای درصد اختلاط‌های متفاوت دارای توزیع حرارت مطلوبی در طول راکتور می‌باشد (گرادیان دمایی پایین‌تر). در ادامه به بیان نتایج حاصل از آزمون‌ها در مورد تأثیرپذیری دینامیک شعله نوسانی از متغیرهای آزمایش، پرداخته شده است: با افزایش نسبت پیش‌آمیختگی جریان، شاهد افزایش پایداری شعله پیش‌آمیخته جزئی می‌باشیم، پراکندگی دما، شدت میزان خاموشی شعله و سرعت نسبی شعله نیز افزایش می‌یابد.

با افزایش سرعت جریان، پایداری شعله، شدت میزان خاموشی آن و پراکندگی دما افزایش می‌یابد. از طرفی سرعت نسبی شعله نوسانی کاهش می‌یابد.

فرکانس شعله نوسانی متأثر از تأثیرات متضاد سرعت جریان با نسبت هم‌ارزی و دمای دیواره‌ها می‌باشد. سرعت جریان رابطه مستقیمی با دمای دیواره‌ها داشته زیرا دمای بالاتر دیواره باعث افزایش سرعت جریان و فرکانس شعله نوسانی می‌گردد. به عبارت دیگر دمای دیواره راکتور اثر مستقیمی بر فرکانس شعله در احتراق نوسانی دارد.

با افزایش دبی جریان (سرعت جریان)، پایداری شعله توأم با پراکندگی دما افزایش می‌یابد. صوت احتراق و خاموشی نیز افزایش ولی سرعت نسبی شعله نوسانی کاهش می‌یابد.

نسبت پیش اختلاط و نسبت هم‌ارزی تأثیر مستقیمی بر شدت صوت خاموشی شعله دارند. افزایش نسبت هم‌ارزی، منجر به افزایش شدید صوت خاموشی که همراه با افزایش زمان پایای نوسانات شعله است، می‌شود.

و سرانجام دینامیک و رژیم شعله ابعاد مزو، تشکیل شده در احتراق آرام پیش‌آمیخته جزئی، به ترتیب از نسبت اختلاط سوخت و اکسنده، سپس نسبت هم‌ارزی و در نهایت از سرعت جریان واکنش‌دهنده‌ها، تأثیر می‌پذیرد.

- 24- Zhao Z, Wang W, Zuo Z, Kuang N. Investigation on the flame characteristics of premixed propane/air in a micro opposed flow porous combustor. *Energy*. 2022;238:121721.
- 25- Quaye EK, Pan J, Lu Q, Zhang Y, Wang Y, Alubokin AA. Study on combustion characteristics of premixed methane-oxygen in a cylindrical porous media combustor. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2021;159:108207.
- 26- Zargarbashi A, Tabejamaat S, Sarrafan Sadeghi 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):2697-705.
- a temperature gradient. *Proceedings of the combustion institute*. 2005;30(2):2429-36.
- 11- Boyarko GA, Sung CJ, Schneider SJ. Catalyzed combustion of hydrogen-oxygen in platinum tubes for micro-propulsion applications. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2005;30(2):2481-8.
- 12- Mikami M, Maeda Y, Matsui K, Seo T, Yuliati L. Combustion of gaseous and liquid fuels in meso-scale tubes with wire mesh. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2013;34(2):3387-94.
- 13- Sarrafan Sadeghi S. An Experimental Study of the Micro-Combustion Chamber. Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic) (Doctoral dissertation, MSc thesis. Tehran).
- 14- Sarrafan Sadeghi, S., Tabejamaat, S., Baigmohammadi M., Laboratory test bed of micro-combustion in micro and meso scale reactor. Iran Patent 80027, 2013; 15: 07
- 15- 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;81:169-83.
- 16- Khaji Z, Klintberg L, Barbade D, Palmer K, Thornell G. Alumina-based monopropellant microthruster with integrated heater, catalytic bed and temperature sensors. In *Journal of Physics: Conference Series 2016* (Vol. 757, No. 1, p. 012025). IOP Publishing.
- 17- Jiaqiang E, Liu H, Zhao X, Han D, Peng Q, Zuo W, Meng T, Qiu R. Investigation on the combustion performance enhancement of the premixed methane/air in a two-step micro combustor. *Applied Thermal Engineering*. 2018;141:114-25.
- 18- Baigmohammadi M, Sadeghi SS, Tabejamaat S, Zarvandi J. Numerical study of the effects of wire insertion on CH<sub>4</sub> (methane)/AIR pre-mixed flame in a micro combustor. *Energy*. 2013;54:271-84.
- 19- 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;95:105-23.
- 20- 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;121:657-75.
- 21- 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;413:191-7.
- 22- Milcarek RJ, Nakamura H, Tezuka T, Maruta K, Ahn J. Investigation of microcombustion reforming of ethane/air and micro-Tubular Solid Oxide Fuel Cells. *Journal of Power Sources*. 2020;450:227606.
- 23- Qian P, Yuan X, Chen Z, Luo C, Huang Z, Zhu X, Liu M. Experimental study on a high efficient and ultra-lean burn meso-scale thermoelectric system based on porous media combustion. *Energy Conversion and Management*. 2021;234:113966.