ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(04):213-223

# 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.[1],
Sarrafan Sadeghi S.[1]*,
Tabejamaat S.[1]

**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.

[1] 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
ePublished: 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 CH4 (methane)/AIR... [19] An experimental study of methane–oxygen–carbon dioxide premixed flame dynamics in non-adiabatic cylinderical 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...

*Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.*

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

**علی زرگرباشی**
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 پیش آمیخته 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 بی رویه 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 هیدروکربني 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 چگالي انرژي بالا در واحد حجم سوخت‌های هیدروکربنی در مقایسه با پیشرفته‌ترین باتری‌های شیمیایی موجود بسیار حائز اهمیت می‌باشد[1]. با توجه به تحقیقات آزمایشگاهی پیشین صورت گرفته از منظر احتراق کلاسیک، غیر ممکن است بتوان در ابعادی که به عنوان فاصله یا قطر خاموشي مطرح هستند احتراق پایدار ایجاد کرد[2]. 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 فروکشي یا خاموشي شعله رخ خواهد داد[3]. 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. در جدول ۱[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[6] 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 هم ارزی‌های مختلف در حدود ۲ برابر ضخامت شعله است. سیتزکي و همکاران[7] احتراق در یك محفظه احتراق خرد مارپیچی را با استفاده از یک دیواره کاتالیست مورد بررسی قراردادند؛ 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[8] به بررسی و مدل سازی حدهای خاموشی و مکانیزم‌های حدی در محفظه‌های احتراق استوانه‌ای با چرخش حرارتی پرداخت و نقش دیواره را در

**جدول ۱)** روش‌هاي طبقه بندي پيشنهاد شده براي جريان واكنش دهنده‌هاي احتراق خرد

| پایه | رژیم | شاخص |
|---|---|---|
| طول فیزیکی (L) | مقیاس میکرو<br>مقیاس مزو | L < 1 mm<br>1 mm < L < 10 mm |
| قطر خاموشی مرجع (δq) | مقیاس میکرو<br>مقیاس مزو | L< δq<br>L/ δq ~ (1-10) |
| نسبت سطح به حجمA/V | مقیاس میکرو<br>مقیاس مزو | 2000 < A/V<br>A/V ~ 1000 |
| طول دستگاه مرجع (LR) | مقیاس میکرو<br>مقیاس مزو | 10 < LR < 100<br>LR < 1000 |

خاموشی‌ها بررسی کرد، وی مدل‌سازی‌هایش را به صورت دو بعدی انجام داد ولی با وجود به‌کارگیری مدل‌های ساده شیمی احتراقی، کار او جهت مشخص کردن حدهای اشتعال‌پذیری بسیار مهم بود. ژانگ و همکاران[9] به مطالعه جرقه‌زن‌ها در محفظه‌های احتراق میکرو پرداختند. بر این اساس جرقه‌زن‌هاي پلي-سيليكون به صورت فيلم‌هاي نازك روي ميكرو موتورهاى سيليكوني قرار داده شده، با عبور جريان الكتريكي، اين فيلم‌ها در اثر مقاومت ايجاد شده گرم می‌شوند و در نتيجه احتراق آغاز می‌شود. دما بر روي جرقه‌زن‌ها به حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد مي‌رسد، كه براي استفاده در يك ميكروتوربين گازي مناسب می‌باشد. همچنین، ماروتا و همکاران[10] به بررسی احتراق پیش-آمیخته در یک راکتور استوانه‌ای پیش‌گرم 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. بویارکو و همکاران[11] بر روی احتراق کاتالیستی هیدروژن-اکسیژن در لوله‌های پلاتینیومی برای کاربردهای میکروپیشرانش به فعالیت پرداختند.

میکامی و همکاران[12] احتراق سوخت گازی پروپان و سوخت مایع اتانول- نرمال هپتان در یک راکتور میکرو مجهز به یک شبکه توری شکل از سیم‌های فلزی را مورد بررسی و تحقیق قرار دادند. ایشان طی این مطالعه، وقوع دو رژیم شعله ضعیف و معمولی را گزارش نموده‌اند. صرافان صادقی و همکاران[13-15] به بررسی اثر نسبت هم‌ارزی، عدد رینولدزِ 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 درون 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 این اساس تشکیل شعله پایدار یا شعله خاموش‌شونده و روشن‌شونده تکرارپذیر درون راکتور، با افزایش عدد رینولدز محدود می‌شود؛ به‌طوری‌که ممکن است با افزایش سرعت جریان داخل راکتور، حتی در نسبت هم‌ارزی‌های نزدیک به حالت استوکیومتریک نیز شعله درون 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 رقیق-سازی نیتروژن، کاهش می‌یابد.

خاجی و همکاران[16] بر روی میکروپیشران تک‌پیشرانه‌ی بر پایه‌ی آلومینا مجهز به گرم‌کن برقی در بستر کاتالیستی مجهز به حسگرهای دما به مطالعه و تحقیق پرداختند، میکروپیشران آن‌ها با پیشرانه‌ی مایع بوده و ساخته شده از آلومینا با بستر کاتالیستی پلاتینیومی برای تجزیه کردن هیدروژن پراکسید می‌باشد. میکروپیشران ساخته شده توسط آنها با روی هم قرار دادن چهار لایه آلومینای بزرگ ۲/۵ در ۲/۵ سانتی‌متر با ضخامت ۱۵۰ میکرومتر ساخته شده است. در ادامه پژوهش‌ها بیگ‌محمدی و همکاران[17-19] به تحقیق بر روی اثرات هندسه راکتور و همچون ایجاد پله در ورودی جریان، عدد رینولدز و نسبت هم‌ارزی بر دینامیک شعله پیش‌آمیخته متان- اکسیژن همراه با رقیق‌سازی با دی‌اکسیدکربن و اثرات گرمادهی به دیواره راکتور را مورد بررسی قرار دادند. ای و همکاران[20] به بررسی افزایش عملکرد احتراق متان-هوا پیش مخلوط شده در یک محفظه احتراق خرد دو مرحله‌ای 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 پیش‌مخلوط متان در احتراق خرد دو مرحله‌ای تحت تأثیر جنس مواد دیواره قرار دارد. میلکرک و همکاران[21,22] بر روی کاربردهای سلول‌های توان- گرمایی و بهینه‌سازی این نوع احتراق برای کاربرد در سلول‌های سوخت جامد اکسیدکننده احتراق میکرو اتان-هوا به تحقیق پرداختند. کیان و همکاران[23] به بررسی تجربی احتراق در شرایط متخلخل مزو با بازده‌ای بالا در حالت نسبت هم ارزی بسیار پایین برای کاربرد در سیستم‌های ترموالکتریک پرداختند. ژائو و همکارن[24] ویژگی‌های 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 می‌توان 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 می‌یابد. علاوه بر این، تا حدی پر شدن یک محیط متخلخل و ساختار جریان مخالف در این نوع احتراق می‌تواند کمک نماید تا شعله با وجود کاهش سرعت جریان مخلوط ورودی در موقعیت خود تثبیت شود. کوئی و همکاران[25] بر روی ویژگی‌های احتراق متان-اکسیژن پیش آمیخته در یک محفظه متخلخل استوانه‌ای به تحقیق پرداختند بر اساس یافته‌های 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 می‌باشد. کارایی سیستم آنها زمانی به اوج خود می‌رسد که نسبت اختلاط سوخت به اکسنده در حدود ۰/۷۰ باشد.

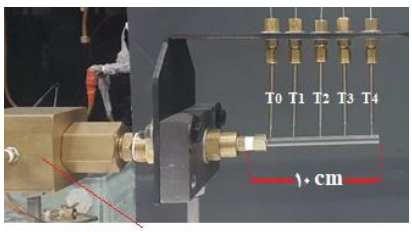
با وجود تحقیقات گسترده صورت گرفته در حوزه پدیده‌شناسی و دینامیک شعله‌های ابعاد کوچک، تا کنون کلیه ابعاد آن به طور کامل توسط محققان مورد بررسی و مطالعه قرار نگرفته‌است. از آن جمله می‌توان به دینامیک شعله‌های پیش‌مخلوط جزئی اشاره کرد، شعله‌های پیش‌مخلوط دارای راندمان احتراقی بیشتر و آلاینده‌های کمتر می‌باشند ولی به دلیل احتمال بروز انفجار در اکثر تجهیزات صنعتی از شعله‌های غیر پیش‌مخلوط استفاده می‌گردد.

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.

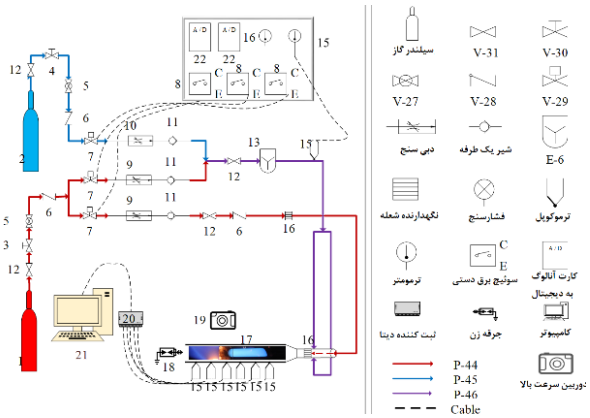
## ۲- بستر آزمون

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 آژمون موجود در آزمایشگاه احتراق دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران[14,15,25] همراه با بروزرسانی‌هایی در بخش محفظه اختلاط سوخت و اکسید کننده صورت گرفته است. در این بروزرسانی 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 ۱۰سانتی‌متر 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 ۲±۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفته‌اند. جهت اندازه‌گیری دبی سیال و فشار آن به ترتیب از دبی‌سنج‌های و فشارسنج‌های دیجیتالی شرکت نیوفِلو 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 شده‌است.




شکل ۱) نمای از بستر بازطراحی‌شده



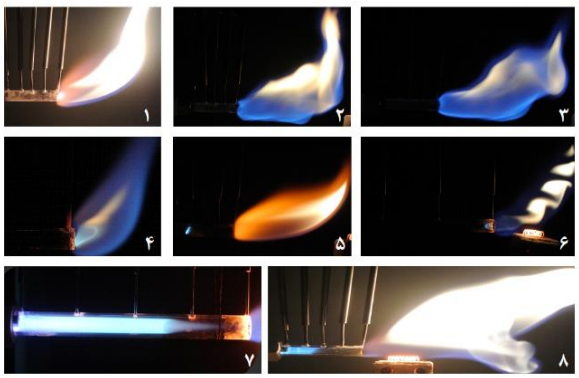

**شکل ۲)** طرح شماتیک مدار بستر آزمون و تجهیزات آن

## 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 انجام‌شده، همگی در محدوده اشتعال‌پذیری 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 پایین‌دست 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 (پس‌زنی 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 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 هم‌ارزی، 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 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 هم‌ارزی و عدد رینولدز بر رژیم شعله ابعاد مزو

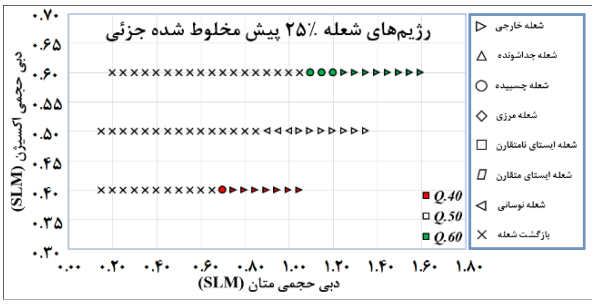
در ادامه تأثیر دبی حجمی واکنش‌دهنده‌ها، نسبت هم‌ارزی، عدد رینولدز جریان (در محدوده جریان آرام) و نسبت پیش اختلاط بر احتراق مزو در یک راکتور با طول و هندسه ثابت بررسی می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده، شعله پایدار ایستا به صورت یک شعله با بازه پایداری بالا درون راکتور مشاهده نشده ولی در نسبت اختلاط بالا، 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

**جدول ۲)** معرفی رژیم‌های شعله و خواص فیزیکی آن‌ها

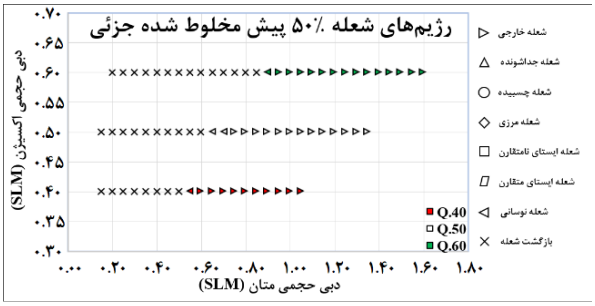
| ردیف | نوع رژیم شعله | | نوع تشکیل جبهه شعله | محل تشکیل جبهه شعله | استاتیک/ دینامیک شعله | دنباله (تاج شعله) | وضعیت ظاهری- نور | صوت احتراق و خاموشی |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | شعله خارجی | Blow out | مخروط به سمت پایین دست (خارج راکتور) | متصل به راکتور و خارج آن | ایستا- پایا- خوداتکا (خودکفا) | دنباله سه رنگ پر نور | 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- تشکیل آب در نزدیکی لبه راکتور | 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- تشکیل آب مایع در نزدیکی لبه راکتور | 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 | طول شعله از مرتبه قطر داخلی راکتور- دارای 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 | اشکال متنوع از سطح تخت (بسته) دارای اعوجاج تا سطح کشیده (باز) و همچنین لاله‌ای شکل - پر نور | بدون صوت |
| ۶ | شعله ایستای متقارن | Symmetric stationary | به صورت مخروطی به سمت پایین دست با توزیع متقارن‌محوری 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 | با افزایش نسبت هم‌ارزی، طول شعله افزایش و سپس دنباله شعله تشکیل و رشد می‌کند | بدون صوت |
| ۷ | شعله نوسانی (خاموشی و اشتعال مکرر) | Repetitive Extinction and ReIgnition (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 | بسامد سیکل خاموشی و اشتعال مکرر متغیر، با گستردگی بالا- تابش ضعیف لبه راکتور | صوت خاموشی بلند 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) | دارای گستردگی بسیار بالا، حالت انفجاری قارچی شکل و اکثراً آبی‌رنگ | صوت خاموشی شدید انفجارگونه |

بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های احتراق پیش‌آمیخته جزئی با نسبت اختلاط‌های ۲۵٪ و ۵۰٪ درصد در محفظه احتراقی به قطر داخلی ۵ میلی‌متر و طول ۱۰ سانتی‌متر صورت گرفته است که در این سری آزمون‌ها، دبی حجمی‌های اکسیژن ۰/۴۰، ۰/۵۰ و ۰/۶۰ لیتر استاندارد بر دقیقه انتخاب شده و دبی حجمی متان از ۰/۱۵ تا ۱/۶۰ با گام ۰/۰۵ لیتر استاندارد بر دقیقه تغییر یافته است. در این بررسی‌ها مجموعاً ۱۴۷ آزمون که شامل ۲۰ آزمون صحه‌گذاری (با صرف نظر از آزمایش‌های مربوط به یافتن حدود اشتعال‌پذیری و رژیم‌های قابل مشاهده شعله) صورت پذیرفته است.

رژیم شعله‌های مشاهده شده در نمودارهای شکل ۵ بر اساس دبی حجمی‌های متفاوت سوخت و اکسنده نشان داده شده است. بر این اساس مشاهده گردید که به ازای دبی حجمی اکسیژن ۰/۵۰ لیتر بر دقیقه در نسبت پیش‌مخلوط‌های ۲۵٪ و ۵۰٪، پایداری شعله بیشتر بوده و با دور شدن از این دبی، پایداری و حدود تشکیل شعله کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد سوخت واکسنده پیش‌مخلوط، پایداری و بازه تشکیل شعله نوسانی درون راکتور مزو افزایش یافته است. در ادامه و در نمودارهای شکل ۶ تغییرات رژیم شعله پیش‌آمیخته جزئی با درصد اختلاط ۲۵٪ و ۵۰٪ در نسبت هم‌ارزی و اعداد رینولدز متفاوت نشان داده شده است. همان‌گونه که در نمودارهای شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌گردد، در محدوده اشتعال‌پذیری، رژیم‌های بازگشت شعله، شعله نوسانی، شعله جداشده و شعله خارجی تشکیل گردیده است. شعله‌های جداشده ماهیتی مشابه بازگشت شعله داشتند؛ به طوری که در ابتدای آزمون‌ها، بازگشت شعله موقتی را شاهد بودیم

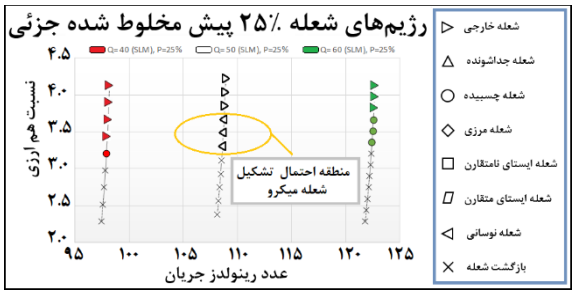



(الف)

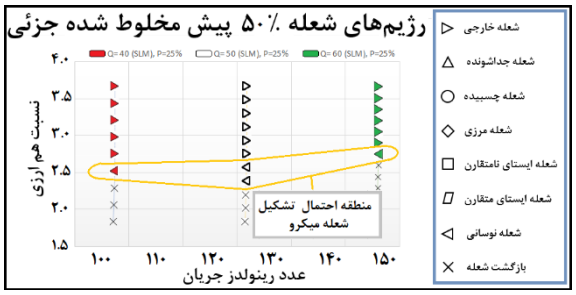



(ب)

**شکل ۴)** نمودارهای رژیم‌های شعله پیش‌آمیخته جزئی با درصد اختلاط ۲۵٪ و ۵۰٪ در دبی حجمی‌های اکسیژن و متان متفاوت




(الف)

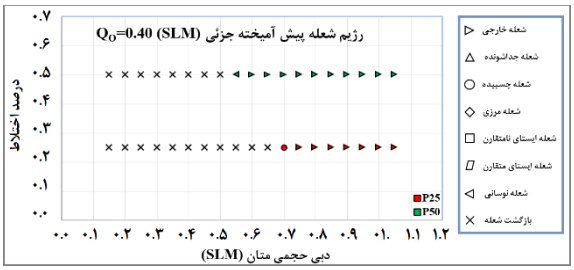



(ب)

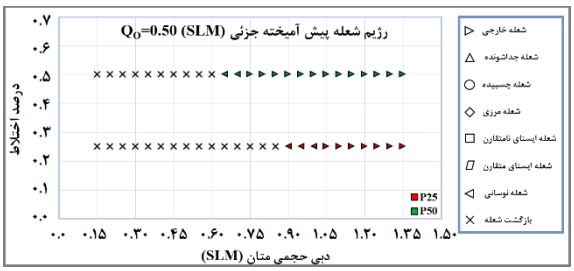
**شکل ۵)** آنالیز EDS از شمش تولید شده در جهت طول شمش

و پس از گذشت زمان اندک، با تشکیل آب مایع درون راکتور، (در نزدیکی لبه انتهایی) شعله به خارج از راکتور پس‌زده شده و به صورت ناپایا و نامتقارن از لبه راکتور دور و مجدداً به آن نزدیک می‌شود. در شکل ۶ نواحی و محدوده تشکیل احتراق مزو برای دو حالت پیش‌آمیخته جزئی با درصد اختلاط ۲۵% و ۵۰٪ نشان داده شده است. با توجه به بازه نسبت هم‌ارزی تشکیل شعله پایدار، این نتیجه مهم حاصل می‌شود که با افزایش نسبت اختلاط، نسبت هم‌ارزی تشکیل رژیم شعله نوسانی کاهش می‌یابد.

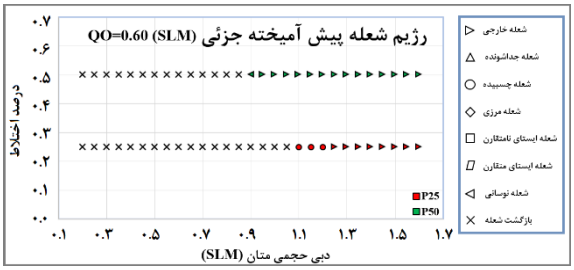
نمودارهای شکل ۶، رژیم شعله در دبی‌های مختلف متان برای دبی حجمی‌های اکسیژن ۰/۴۰ ، ۰/۵۰ و ۰/۶۰ لیتر بر دقیقه نشان داده شده است، در این نمودارها نسبت اختلاط‌های ۲۵٪ و ۵۰٪ برای دبی حجمی‌های مختلف اکسیژن مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس این اطلاعات می‌توان نتیجه گرفت که ضمن افزایش پایداری شعله نوسانی در نسبت اختلاط‌های بالاتر، تأثیر منفی افزایش دبی حجمی اکسیژن بر پایداری و تشکیل شعله نوسانی نیز مشهود است. به عبارت دیگر حد پایین و بالای دبی حجمی اکسیژن باعث کاهش مناطق تشکیل شعله شده که این مهم را می‌توان به علت عدم امکان ایجاد تعادل میان سرعت مخلوط با مؤلفه‌های تأثیرگذار بر پایداری شعله همچون دما، عدد رینولدز، اثر سطح و سرعت شعله نسبت داد و در حالت دبی حجمی اکسیژن ۰/۵۰ لیتر شاهد یک حالت متعادل‌تر و بهینه‌تر بوده و بازه تشکیل شعله در حدود ۵۰ درصد بیشتر از دو دبی حجمی دیگر می‌باشد. از سوی دیگر، می‌توان افزایش دبی حجمی سوخت مورد نیاز برای تشکیل شعله پایدار را با افزایش دبی حجمی اکسیژن مشاهده نمود که مطابق انتظار، اثر قدرتمند نسبت هم‌ارزی بر تشکیل شعله را تأیید می‌کند.




(الف)




(ب)

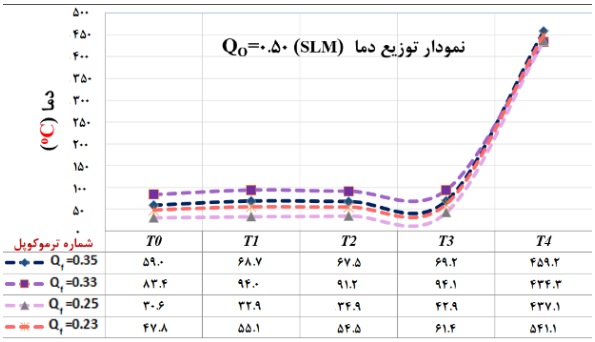



(ج)

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

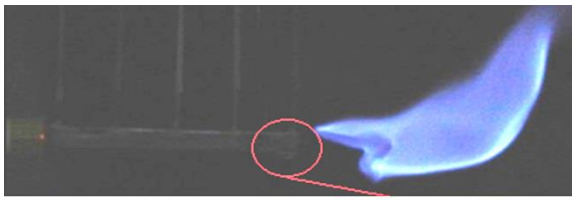



| شماره ترموکوپل | T0 | T1 | T2 | T3 | T4 |
|---|---|---|---|---|---|
| $Q_f$=0.35 | ۵۹.۰ | ۶۸.۷ | ۶۷.۵ | ۶۹.۲ | ۴۵۹.۲ |
| $Q_f$=0.33 | ۸۳.۴ | ۹۴.۰ | ۹۱.۲ | ۹۴.۱ | ۴۳۴.۳ |
| $Q_f$=0.25 | ۳۰.۶ | ۳۲.۹ | ۳۴.۹ | ۴۲.۹ | ۴۳۷.۱ |
| $Q_f$=0.23 | ۴۷.۸ | ۵۵.۱ | ۵۴.۵ | ۶۱.۴ | ۵۴۱.۱ |

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

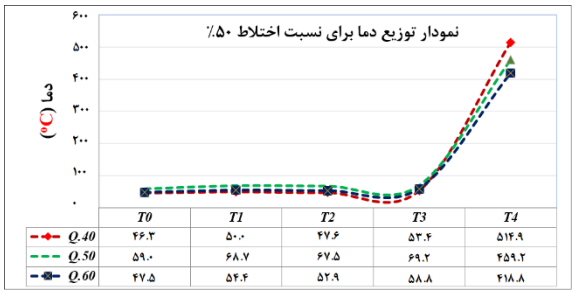
میانگین آزمون‌ها برای دیواره خارجی راکتور برای رژیم شعله مرزی را برای دبی ثابت ۰/۵ لیتر بر دقیقه و نسبت اختلاط ۵۰٪ نشان داده شده است. داده‌ها نشان از همگرایی دمایی برای درصد دبی سوخت مختلف دارد. این مهم را می‌توان به کوپل بودن عوامل مختلف و نوع شعله مرتبط دانست. ضمناً در نمودار زیر، دمای بالای ترموکوپل 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 ترموکوپل های 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 بربدنه 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 (شکل۸) 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

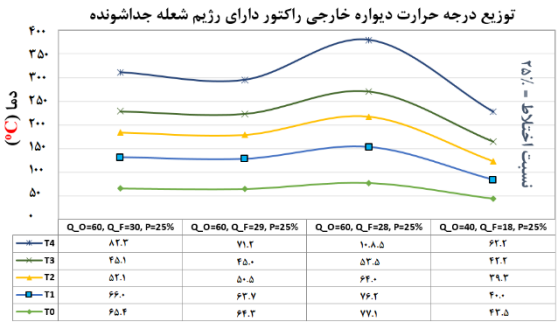



| | T0 | T1 | T2 | T3 | T4 |
|---|---|---|---|---|---|
| Q.40 | ۴۶.۳ | ۵۰.۰ | ۴۷.۶ | ۵۳.۴ | ۵۱۴.۹ |
| Q.50 | ۵۹.۰ | ۶۸.۷ | ۶۷.۵ | ۶۹.۲ | ۴۵۹.۲ |
| Q.60 | ۴۷.۵ | ۵۴.۴ | ۵۲.۹ | ۵۸.۸ | ۴۱۸.۸ |

**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٪.

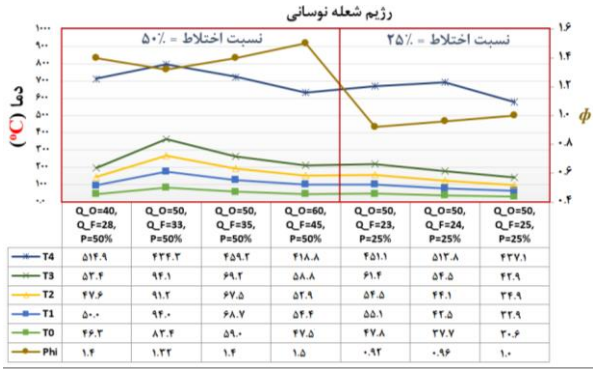
دمای دیواره خارجی راکتور کاهش می‌یابد ولی در نسبت‌های اختلاط بالا، گرادیان دمای پایین‌تری در مقایسه با دبی جریان و طول راکتور کمتر و نسبت اختلاط یکسان مشاهده می‌شود.در نمودار شکل ۹ افزایش پراکندگی دما (افزایش طول شعله) در درصد اختلاط ثابت ۵۰٪ را شاهد هستیم در این حالت با افزایش دبی حجمی اکسیژن را شاهد 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 هم ارزی 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. دتده‌های 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




| | Q_O=60, Q_F=30, P=25% | Q_O=60, Q_F=29, P=25% | Q_O=60, Q_F=28, P=25% | Q_O=40, Q_F=18, P=25% |
|---|---|---|---|---|
| T4 | ۸۲.۳ | ۷۱.۲ | ۱۰۸.۵ | ۶۲.۲ |
| T3 | ۴۵.۱ | ۴۵.۰ | ۵۳.۵ | ۴۲.۲ |
| T2 | ۵۲.۱ | ۵۰.۵ | ۶۴.۰ | ۳۹.۳ |
| T1 | ۶۶.۰ | ۶۳.۷ | ۷۶.۲ | ۴۰.۰ |
| T0 | ۶۵.۴ | ۶۴.۳ | ۷۷.۱ | ۴۳.۵ |

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




| | Q_O=40, Q_F=28, P=50% | Q_O=50, Q_F=33, P=50% | Q_O=50, Q_F=35, P=50% | Q_O=60, Q_F=45, P=50% | Q_O=50, Q_F=23, P=25% | Q_O=50, Q_F=24, P=25% | Q_O=50, Q_F=25, P=25% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T4 | ۵۱۴.۹ | ۴۳۴.۳ | ۴۵۹.۲ | ۴۱۸.۸ | ۴۵۱.۱ | ۵۱۳.۸ | ۴۳۷.۱ |
| T3 | ۵۳.۴ | ۹۴.۱ | ۶۹.۲ | ۵۸.۸ | ۶۱.۴ | ۵۴.۵ | ۴۲.۹ |
| T2 | ۴۷.۶ | ۹۱.۲ | ۶۷.۵ | ۵۲.۹ | ۵۴.۵ | ۴۴.۱ | ۳۴.۹ |
| T1 | ۵۰.۰ | ۹۴.۰ | ۶۸.۷ | ۵۴.۴ | ۵۵.۱ | ۴۳.۵ | ۳۲.۹ |
| T0 | ۴۶.۳ | ۸۳.۴ | ۵۹.۰ | ۴۷.۵ | ۴۷.۸ | ۳۷.۷ | ۳۰.۶ |
| Phi | ۱.۴ | ۱.۳۲ | ۱.۴ | ۱.۵ | ۰.۹۲ | ۰.۹۶ | ۱.۰ |

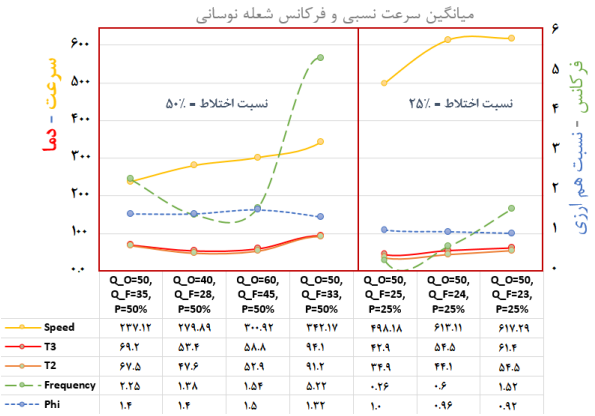
**شکل ۱۱)** نمودار توزیع درجه حرارت دیواره خارجی راکتور دارای رژیم شعله نوسانی

این مهم بیشترین 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.

## ۴-۳- 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



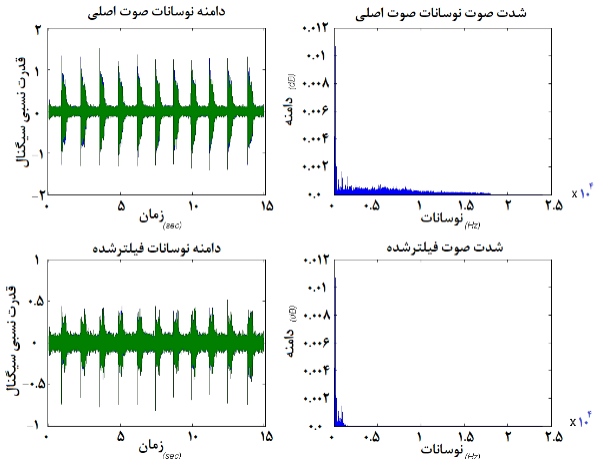

| | Q_O=50, Q_F=35, P=50% | Q_O=40, Q_F=28, P=50% | Q_O=60, Q_F=45, P=50% | Q_O=50, Q_F=33, P=50% | Q_O=50, Q_F=25, P=25% | Q_O=50, Q_F=24, P=25% | Q_O=50, Q_F=23, P=25% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Speed | ۲۳۷.۱۲ | ۲۷۹.۸۹ | ۳۰۰.۹۲ | ۳۴۲.۱۷ | ۴۹۸.۱۸ | ۶۱۳.۱۱ | ۶۱۷.۲۹ |
| T3 | ۶۹.۲ | ۵۳.۴ | ۵۸.۸ | ۹۴.۱ | ۴۲.۹ | ۵۴.۵ | ۶۱.۴ |
| T2 | ۶۷.۵ | ۴۷.۶ | ۵۲.۹ | ۹۱.۲ | ۳۴.۹ | ۴۴.۱ | ۵۴.۵ |
| Frequency | ۲.۲۵ | ۱.۳۸ | ۱.۵۴ | ۵.۲۲ | ۰.۲۶ | ۰.۶ | ۱.۵۲ |
| Phi | ۱.۴ | ۱.۴ | ۱.۵ | ۱.۳۲ | ۱.۰ | ۰.۹۶ | ۰.۹۲ |

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

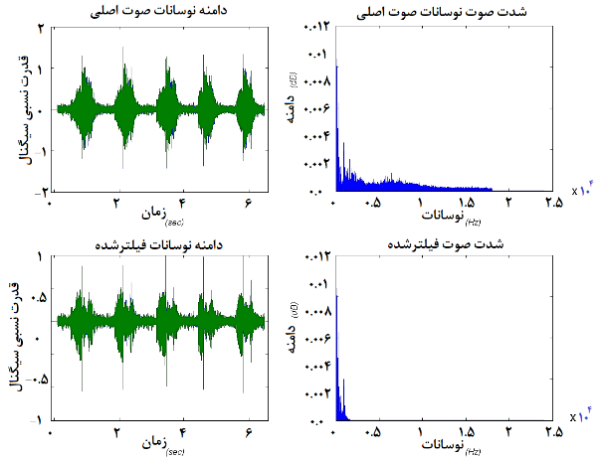
در کنار نسبت هم‌ارزی ارائه شده است، همچنین جهت تحلیل بهتر پدیده‌ها نسبت اختلاط ۲۵٪ و ۵۰٪ در شکل تفکیک شده است.
همان‌گونه که از شکل مشخص است فرکانس شعله نوسانی متأثر از تأثیرات متضاد سرعت جریان با نسبت هم‌ارزی و دمای دیواره‌ها می‌باشد، رفتار سرعت جریان و شعله نوسانی با نسبت هم‌ارزی عکس یکدیگر می‌باشد. 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- نمودارهای شدت صوت احتراق و خاموشی شعله و دامنه و بسامد آن

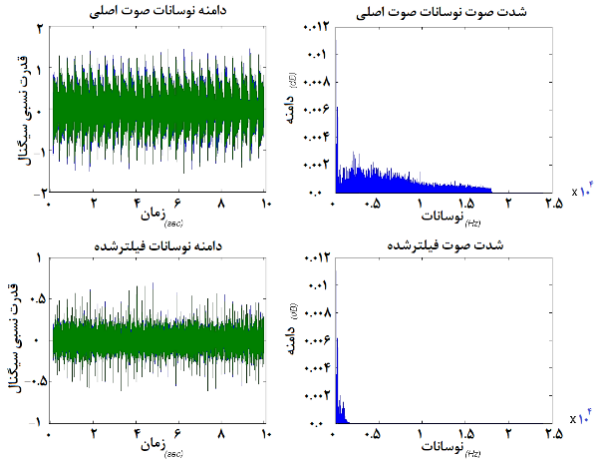
در این بخش به نتایج حاصل از آزمایش‌ها و بررسی صوت احتراق پرداخته می‌شود. با توجه به ذات راکتور و ابعاد آن تشکیل شعله و عبور جریان درون آن همراه با صوت می‌باشد و هر نوع از شعله دارای سری خواص صوتی مختص خویش می‌باشند که در ادامه، چند نمونه از نمودارهای صوت احتراق و خاموشی شعله، (نمودارهای شدت صوت بر حسب 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 اکسیژن۰/۴۰ 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 ۱۴ نمودارهای شدت صوت و دامنه نوسانات صوت اصلی و فیلترشده برای شعله نوسانی با دبی حجمی اکسیژن ۰/۵۰ و دبی حجمی سوخت ۰/۲۳ لیتر بر دقیقه با نسبت پیش‌مخلوط 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




**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٪

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 تاثیر مستقیم نسبت پیش اختلاط و نسبت هم‌ارزی بر شدت صوت خاموشی شعله می‌باشیم. با افزایش نسبت هم ارزی 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.

**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 منافعی 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. In39th 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

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. InJournal 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 CH4 (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 cylinderical 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.
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.