

بررسی تجربی اثرات رقیق ساز نیتروژن بر روی شعله میکرو متان-اکسیژن در محفظه کانالی به کمک روش طیف سنجی در محفظه‌ای همراه با بازیاب حرارتی

سروش صرافان صادقی^۱، صادق تابع جماعت^{۲*}، امیررضا قهرمانی^۳، سینا نریمانی اصل^۴

۱- دانشجو دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، Soroush.s.s@aut.ac.ir

۲- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، sadegh@aut.ac.ir

۳- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، A_ghahremani@aut.ac.ir

۴- کارشناسی، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، narimani@aut.ac.ir

* نویسنده مخاطب

چکیده

در این تحقیق به بررسی تجربی اثر رقیق ساز نیتروژن بر احتراق اکسیژن-متان درون محفظه‌های تخت همراه بازیاب حرارتی پرداخته شده است. در محفظه طراحی شده گازهای حاصل از احتراق غیر پیش آمیخته متان اکسیژن که در رژیم‌های مختلف احتراقی غنی از سوخت مورد بررسی قرار گرفته است، پس از طی یک مسیر موازی با جریان ورودی باعث پیش گرم شدن گازهای ورودی می‌گردد. اکسیژن قبل از قسمت ورودی به محفظه توسط نیتروژن رقیق شده و سپس وارد محفظه می‌گردد. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق با افزایش نسبت رقیق ساز، شاهد کاهش طیف تابشی H_2O که نمایانگر کامل تر بودن احتراق است می‌باشیم. به طور کلی با افزایش نسبت رقیق سازی شاهد کاهش دما در مقطع اندازه‌گیری شده و افزایش طول شعله در حالت کلی می‌باشیم.

کلمات کلیدی: احتراق میکرو، محفظه‌های تخت، بازیاب حرارتی، متان، اکسیژن، رقیق سازی

مقدمه

در سال‌های اخیر مطالعات بر روی محفظه‌های احتراق کوچک در مقیاس مزو و میکرو افزایش یافته است. این محفظه‌های احتراق کوچک، منابع بسیار خوبی برای تامین انرژی تجهیزات در مقیاس میلیمتر هستند [۱]. تجهیزاتی مانند میکرو ربات‌ها، سیستم‌های هوافضایی در ابعاد کوچک و سیستم‌های تولید توان میکرو در این دسته قرار می‌گیرند. به دلیل وزن زیاد باتری‌های شیمیایی به نسبت توان تولیدی استفاده از آن‌ها در اینگونه تجهیزات منطقی نیست. در صورتیکه محفظه‌های احتراق میکرو چگالی انرژی بسیار زیادی نسبت به باتری‌های شیمیایی دارند. همین عامل باعث شده تا علاقه به بررسی و تحلیل محفظه‌های احتراقی میکرو در میان پژوهش‌گران افزایش یابد [۱]. 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 [۲]. 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 [۳]. در سال‌های اخیر پژوهش‌های بسیاری شده که تلاش داشتند تا مشکلات ساخت محفظه احتراق در مقیاس میکرو را رفع کنند تا امکان استفاده و مطالعه دقیق تر این محفظه‌ها ممکن شود [۴]. محفظه‌های احتراق میکرو در ساخت هر سیستمی که نیاز به تولید توان در آن‌ها وجود داشته باشد قابل استفاده هستند [۵].

طیف سنجی روشی است که امکان اندازه‌گیری طول موج و شدت نور را ممکن ساخته است. در مطالعه‌ی احتراق، با استفاده از طیف سنج مشخصات شعله بررسی می‌شود. احتراق باعث برانگیختگی رادیکال‌های احتراقی می‌شود، رادیکال‌ها پس از بازگشت از حالت برانگیخته به حالت

قبل، نور در طول موج‌های مشخص از خود منتشر می‌کنند [۶]. در شرایط مختلف، غلظت رادیکال‌های برانگیخته متفاوت است و در نتیجه شدت نور انتشاری نیز تفاوت می‌کند. با توجه به قله‌های نمودار شدت نور، رادیکال‌های با غلظت بالا شناسایی می‌شوند و از این طریق به گونه‌های احتراقی موجود در شعله مشخص خواهند شد. در اندازه‌گیری دما نیز طیف سنج نسبت به روش‌های ترماسی مزایایی دارد. به منظور اندازه‌گیری دمای محفظه‌ی احتراق در شرایطی که دمای شعله‌ی بسیار بالاست، یا به هر دلیلی امکان دماسنجی مستقیم وجود ندارد، طیف سنج نسبت به ترموکوپل کارآمدتر است. همچنین طیف سنج در برابر اغتشاشات محیط مقاومت بیشتری برای اندازه‌گیری دما دارد [۷].

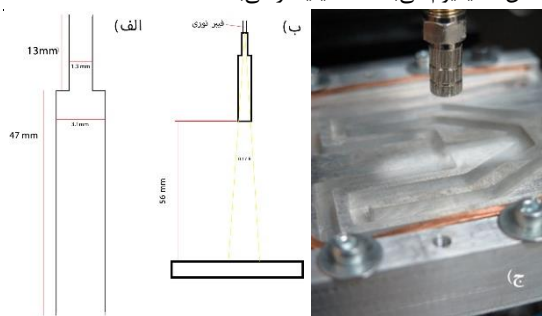
سیتزکی و همکارانش [۸] احتراق در یک محفظه احتراق خرد مارپیچی را با استفاده از یک دیواره کاتالیست مورد بررسی قرار دادند؛ آن‌ها در تحقیقات خود نشان دادند که اگر عدد رینولدز جریان کمتر از ۲۰ باشد می‌توان احتراق مناسبی را در این نوع محفظه احتراق میکرو شاهد بود. میکامی و همکاران [۹] احتراق سوخت گازی پروپان 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. ژائو و همکاران [۱۰] ویژگی‌های شعله میکرو پیش مخلوط پروپان/هوا، در یک احتراق متخلخل با جریان مخالف را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که در این نوع احتراق به طور موثر می‌توان با حفظ دمای یکنواخت بر روی دیوار خارجی به تثبیت محل شعله کمک نماید. نرخ همرفتی بین مخلوط‌های متخلخل 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.

هلاند و اسپاچر [۱۱] از روش طیف‌سنجی مادون قرمز به تعیین محصولات عمده‌ی ناشی از احتراق در آگروزهای هواپیما پرداختند. فانسلا و همکاران [۱۲] غلظت سوخت را در موتور احتراق داخلی با استفاده از طیف انتشاری جرقه بررسی کردند. آن‌ها برای اندازه‌گیری غلظت سوخت، طیف انتشاری در محدوده‌ی فرابنفش را بررسی و مطالعه کردند. به این نتیجه رسیدند که شدت انتشاری گونه‌های احتراقی در این محدوده، ارتباط معناداری با غلظت سوخت دارد.

ویزر و آیزنراک [۱۳] به بررسی رفتار احتراق پیروتکنیک با روش طیف سنجی پرداختند. احتراق پیروتکنیک سریع و با انتشار زیاد رخ می‌دهد. روش طیف سنجی با تحلیل تابش ناشی از احتراق، باعث سهولت در بررسی احتراق پیروتکنیک شده است. در این پژوهش رادیکال‌های موجود در احتراق با بررسی شدت تابشی در محدوده‌ی فرابنفش شناسایی شدند. همچنین دریافتند که احتراق پیروتکنیکی یک پیوستار خاکستری در

میلیمتر است. به جهت ثابت نگه داشتن فیبرنوری و همچنین کاهش زاویه‌ی واگرایی از یک لوله استفاده شده است که در بخش (الف) شکل ۲ تصویر شماتیک آن نمایش داده شده است. زاویه‌ی واگرایی به منظور کاهش اختلالات محیطی با استفاده از لوله کاهش پیدا کرده است. زاویه‌ی واگرایی فیبرنوری بدون لوله ۰/۲۲ رادیان است و با استفاده از لوله این زاویه به ۰/۱۷ کاهش یافته است. با توجه به فاصله‌ی ۱۱۶ میلی‌متری، فیبرنوری از دایره‌ای به شعاع ۸/۸۹ میلی‌متر نور از شعله دریافت می‌کند. محدوده‌ی زمان نوردهی بر روی عدد ۱۰۰۰۰ میلی‌ثانیه بوده است. علت انتخاب زمان نوردهی بالا، کوچک بودن شعله و شدت نور اندک آن بوده که با بالا بردن این زمان، نور ورودی طیف سنج افزایش یافته و شدت نور به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. در هر آزمایش شدت طیف انتشاری شعله پس از سه دقیقه به گام یک نانومتر ذخیره شده است. همزمان با ثبت داده‌های طیف سنج، دمای زیر محفظه‌ی احتراق و طول شعله نیز ثبت شده است. در هر آزمایش ده مرتبه (به مدت ۳۰ دقیقه) اندازه‌گیری صورت گرفته است.

در این تحقیق از یک محفظه از جنس آلومینیوم به ابعاد ۲۵ در ۲۵ سانتی‌متر مطابق شکل ۲ استفاده شده است، این محفظه به شکلی طراحی شده است که مواد اولیه (سوخت و اکسند) توسط گرمای انتقالی حاصل از احتراق خود پیش گرم گردند. و در بالای آن از شیشه کوارتز ۵ به ضخامت ۵ میلیمتر استفاده شده است، همچنین در این محفظه ضخامت قطر گوشته پایینی که از جنس آلومینیوم می‌باشد ۶ میلیمتر می‌باشد.



شکل ۲: الف) تصویر لوله‌ی استفاده شده بر روی فیبر نوری، ب) وضعیت لوله نسبت به محفظه احتراق ج) نمایی از محفظه احتراق و پراپ اسپکترومتر و موقعیت آن

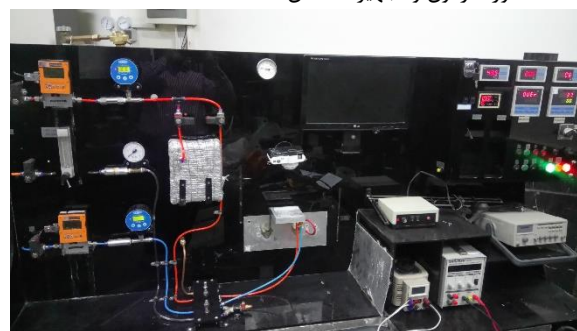
نتایج آزمایش‌ها

در شکل ۳ نمایی از شعله‌های میکرو به ترتیب در حالت رقیق سازی ۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۸٪ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل نمایان است با افزایش نسبت رقیق سازی شاهد افزایش طول شعله به طور کلی می‌باشیم و این مهم به علت اثر خنک‌کنندگی و نیاز به زمان اقامت بیشتر رادیکال‌ها جهت تکمیل واکنش می‌باشد که باعث افزایش طول شعله به علت سرعت اولیه گازها می‌باشد.

محدوده طیف فرسرخ نزدیک (از طول موج ۷۰۰ نانومتر تا ۲۵۰۰ نانومتر) منتشر می‌کند که می‌توان از آن برای تعیین دمای واکنش احتراق استفاده کرد. موراس فلورس و همکاران [۱۴] در یک مطالعه با استفاده از یک سیستم طیف سنجی اتمی عملکرد دستگاه میکرو شعله چندگانه (MM) را سنجیدند. در این پژوهش از لوله‌ی اتومایزر کوارتز (QTA) جهت کاهش تداخل استفاده شده بود. تداخل با استفاده از طیف سنجی در دو دستگاه MM و MMQTA سنجیده شد و نتایج حاصله عملکرد بهتری برای MMQTA را نشان می‌دهند.

روش و تجهیزات آزمون

آزمایش‌های مربوط به این تحقیق بر روی شعله استند آزمایشگاهی احتراق میکرو مستقر در آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشگاه صنعتی امیرکبیر صورت گرفت است. جهت این تحقیق از یک اسپکترومتر مدل V900 ساخت شرکت فناوریان فیزیک نور استفاده شده است و کلیه سیستم‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری شامل، سیستم اندازه‌گیری دبی سوخت و اکسند، ترموکوپل و اسپکترومتر مورد استفاده کالیبره گردیده‌اند. در شکل ۱ نمایی از محفظه مورد آزمون و تجهیزات نشان داده شده است.



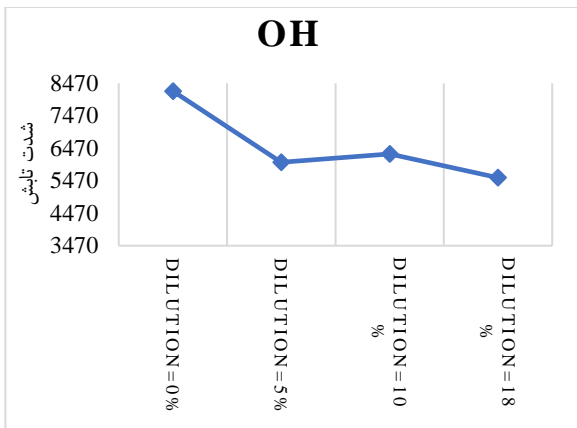
شکل ۱: نمایی از محفظه و مجموعه مورد استفاده

برای این تحقیق فیبر نوری اسپکترومتر مورد استفاده عمود بر شعله در به کمک بازو نگهدارنده در فاصله‌ی ثابت قرار گرفته است. در تمامی آزمایش‌ها دبی سوخت و اکسیژن ثابت بوده و به طبع نسبت سوخت به اکسند در آزمون‌های مورد استفاده ثابت و برابر ۱/۶۹۵۱ بوده است. شماره آزمایش و دبی‌ها در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. همچنین در این آزمون‌ها جهت رقیق‌سازی از نیتروژن گرید ۵ استفاده شده است. در ادامه برای راحتی نسبت رقیق ساز جهت سهولت به شکل ۱/۶۹ بیان می‌گردد.

جدول ۱: دبی سوخت، هوا و رقیق‌ساز و نسبت هم‌ارزی مربوط به هر آزمایش

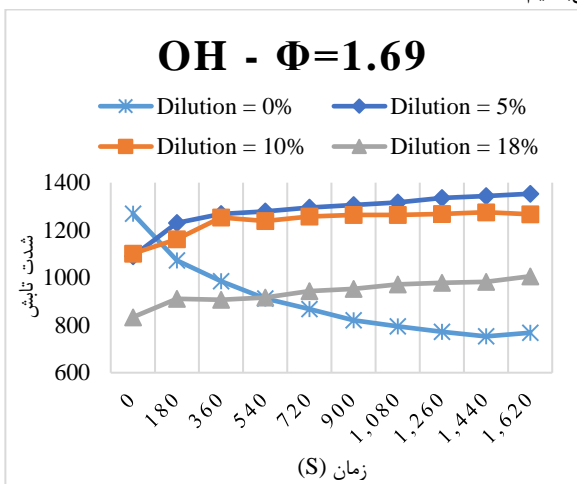
شماره آزمون	درصد رقیق سازی نیتروژن	نسبت هم‌ارزی	دبی اکسیژن (SLM)	دبی سوخت (SLM)
1	0	1.6951	7.609	7.014
2	5	1.6951	7.609	7.014
3	10	1.6951	7.609	7.014
4	18	1.6951	7.609	7.014

به وسیله‌ی یک ترموکوپل دمای زیر محفظه‌ی احتراق در محل تشکیل شعله اندازه‌گیری شده است و در لحظه‌ی اولین داده‌برداری در همه‌ی آزمایش‌ها، دمای زیر محفظه‌ی احتراق 4 ± 50 درجه‌ی بوده است. لازم به توضیح است ضخامت بین ترموکوپل و محل احتراق ۷ میلیمتر و جنس بدنه از آلومینیوم می‌باشد. در تمامی آزمایش‌ها فاصله‌ی فیبرنوری با شعله ثابت و برابر ۱۱۶



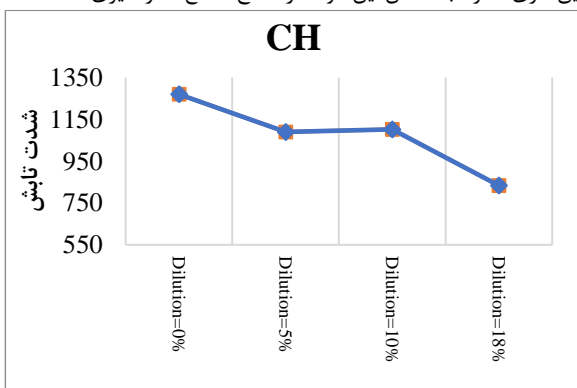
شکل ۵: مقایسه‌ی شدت تابش OH در درصد رقیق‌سازی‌های مختلف در لحظه اول

شکل ۶ میزان تابش رادیکال CH را نمایش می‌دهد. میزان تابش این رادیکال در هر سه آزمایش همراه با رقیق‌سازی با افزایش اندک همراه است. ولی همچون رفتار رادیکال OH در گذر زمان شاهد کاهش غلظت رادیکال CH می‌باشیم.

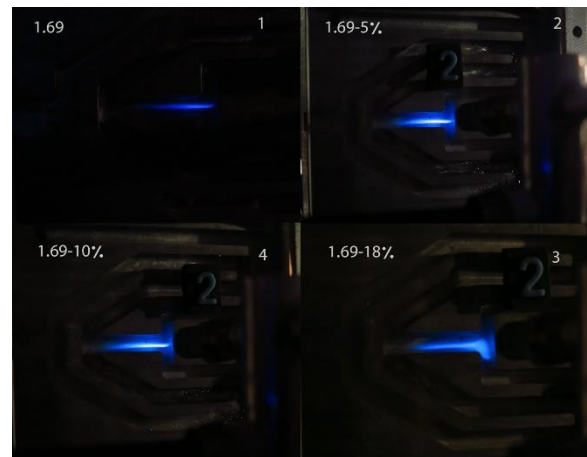


شکل ۶: مقایسه تابش رادیکال CH در آزمایش‌ها

تابش گونه‌ی رادیکالی CH نیز متاثر از نسبت هم‌ارزی محلی و فشار است [۱۵]. همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود با تغییرات نسبت رقیق‌سازی، تابش گونه‌ی CH نیز تغییر می‌کند. و این تغییر با افزایش نسبت رقیق‌سازی همراه با کاهش این گونه در سطح مقطع اندازه‌گیری شده است.



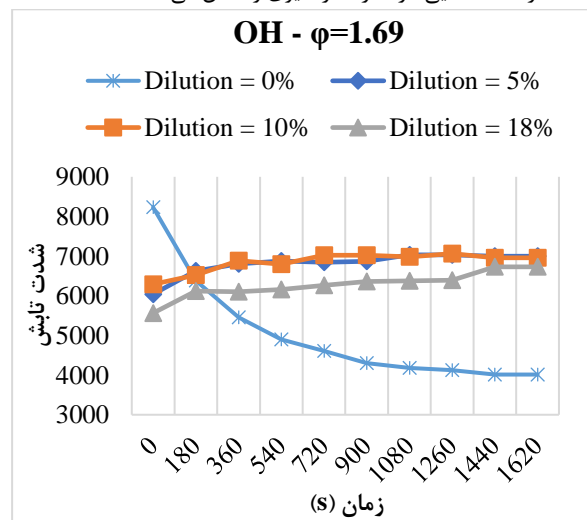
شکل ۷: نمودار تغییرات شدت تابش CH در درصد رقیق‌سازی‌های مختلف در لحظه اول



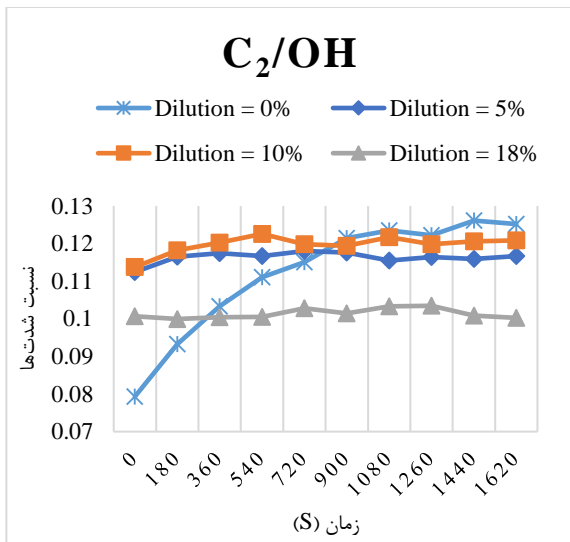
شکل ۳: نمایی از شعله در زمان ۹۰۰ ثانیه برای چهار حالت بدون رقیق‌سازی (۱)، با رقیق‌سازی ۵ درصد (۲)، با رقیق‌سازی ۱۰ درصد (۳)، با رقیق‌سازی ۱۵ درصد (۴).

بررسی رادیکال‌های موجود در شعله

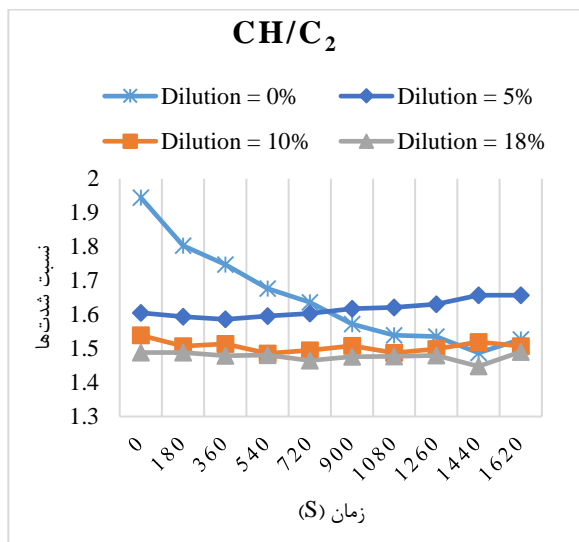
شکل ۴ میزان تابش رادیکال OH در آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد. رادیکال OH به عنوان نشانگری از میزان گرمای آزاد شده در احتراق شناخته می‌شود [۱۵]. شعله‌ی میکرو با نسبت هم‌ارزی 1/69 صورت گرفته است همانگونه که از شکل ۴ مشخص است، در حالت بدون رقیق‌سازی با نیتروژن در طول زمان و با همگن شدن دما محفظه آزمایش و افزایش حالت پیش‌گرم شدن، شدت رادیکال OH در بخش ابتدایی و مرکزی شعله که مورد بررسی بوده است، کاهش یافته است. ولی در حالت رقیق‌سازی و حضور N₂، شدت رادیکال OH افزایش یافته است که این مهم را شاید بتوان به علت تغییر طول شعله و تغییر روند مکانیزم‌های درختی واکنش نسبت داد، در ادامه با بررسی سایر رادیکال‌ها این مهم می‌تواند واضح‌تر گردد. نمودار شکل ۵ تفاوت‌های و تاثیر رقیق‌سازی را بر روی شدت تابش رادیکال OH در زمان ۶۰۰ ثانیه (اولین داده برداری در آزمایش به علت همگن شدن کلی مجموعه محفظه از لحاظ دمایی) از آغاز اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل ۴: مقایسه‌ی تابش رادیکال OH



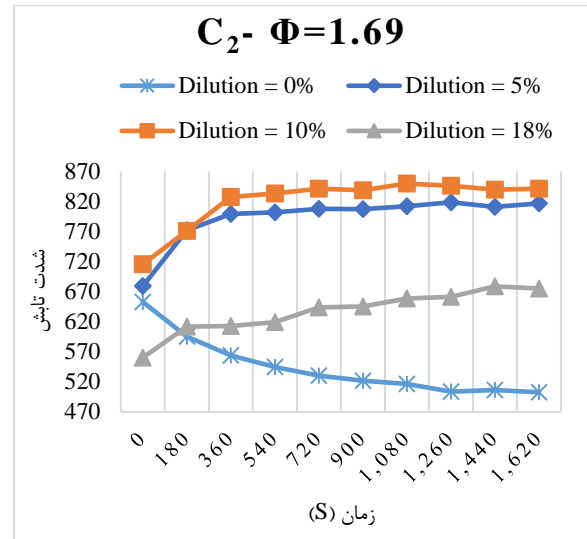
شکل ۱۰: نمودار نسبت C₂/OH در واکنش‌ها



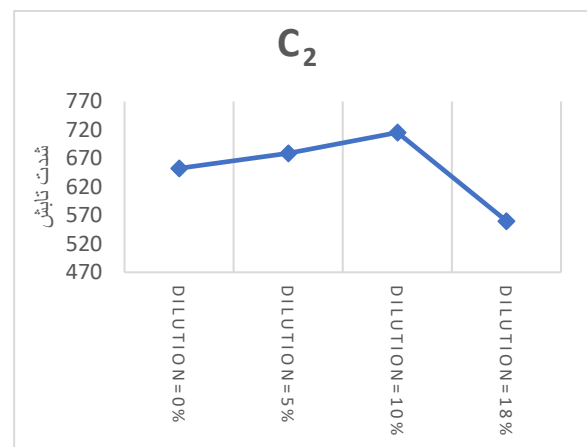
شکل ۱۱: نمودار نسبت CH/C₂ در واکنش‌ها

نمودار OH/CH که در شکل ۱۲ نمایش داده شده است، یکی از نمودارهایی است که با نسبت هم‌ارزی شعله مرتبط است [۱۶]. در نتیجه در این تحقیق با توجه به ثابت بودن نسبت هم‌ارزی شاهد ثبات در تغییرات در طول زمان در این نسبت می‌باشیم، با نگاهی دقیق‌تر به نمودار شکل ۱۲ با افزایش نسبت رقیق‌سازی نیتروژن شاهد افزایش نسبت وجود رادیکال‌های OH/CH در سطح مقطع اندازه‌گیری شده که ابتدای شعله را پوشش می‌دهد می‌باشیم.

شکل ۸ نمودار مقایسه‌ی تابش رادیکال C₂ در آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد. نمودار تغییرات شدت تابش C₂ مطابق با تغییرات رادیکال‌های OH و CH می‌باشد و تغییرات و نوع این تغییرات در حالت وجود رقیق‌ساز و بدون وجود رقیق‌ساز نمایان می‌باشد که در شکل ۹ نحوه تغییرات و شدت آن در نسبت رقیق‌سازی‌های مختلف نیز نشان داده شده است.

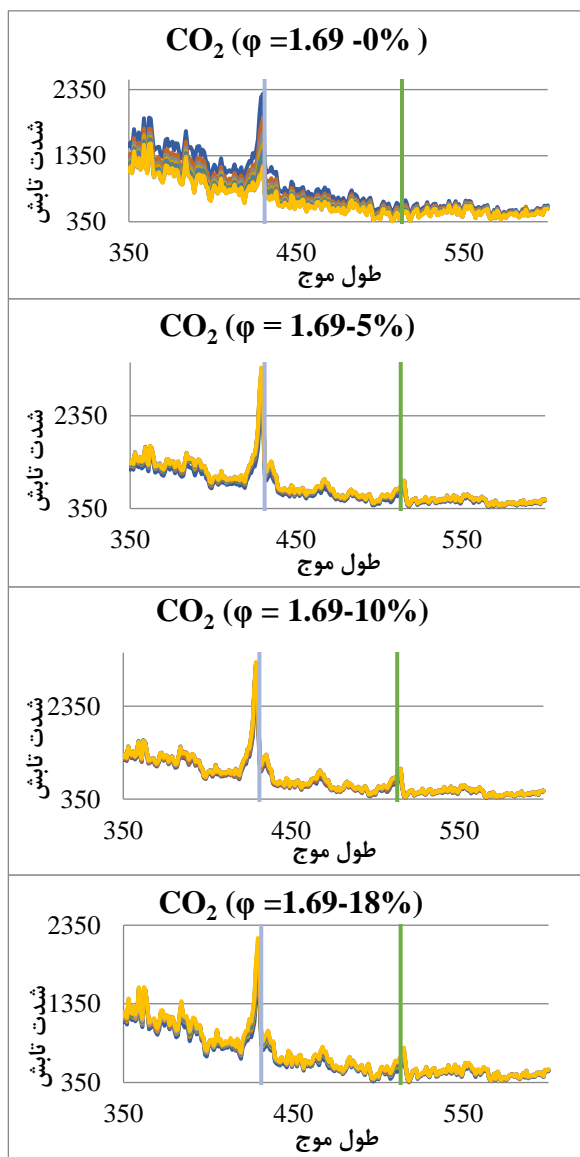


شکل ۸: مقایسه تابش رادیکال C₂ در آزمایش‌ها



شکل ۹: نمودار تغییرات تابش C₂ نسبت به درصد رقیق‌سازی‌های مختلف در لحظه اول

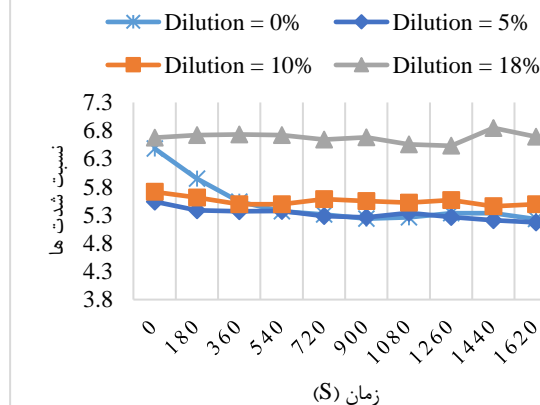
نسبت C₂/OH (نمودار شکل ۱۰) و نسبت CH/C₂ (نمودار شکل ۱۱) برای یافتن نقطه‌ی استوکیومتری مناسب هستند [۱۶]. ولی در این آزمایش با شرایط نسبت هم‌ارزی ثابت تحقیق صورت گرفته است بنابراین حالت تغییرات نسبت C₂/OH (نمودار شکل ۱۰) و نسبت CH/C₂ (نمودار شکل ۱۱) یک روند ثابت را طی می‌کند، البته این مهم برای حالت رقیق شده با نیتروژن بیشتر صادق است و تغییرات و افزایش نسبت C₂/OH را در حالت غیر رقیق‌ساز شاهد می‌باشیم.

شکل ۱۴: طیف تابش رادیکال CO₂ در آزمایش‌ها

بررسی دمای شعله

شکل ۱۵ دمای شعله نسبت به نسبت رقیق‌سازی نیتروژن در آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد. در طول زمان تغییرات دمای شعله نوسان بسیار زیادی داشته است. به همین دلیل در نمودار از دمای محاسبه شده بر اساس داده‌های دقیقه‌ی سوم (آخرین خروجی آزمایش‌ها) استفاده شده است. چرا که در این زمان تغییرات طول شعله و میزان انتقال حرارت کاهش یافته، در نتیجه شعله در حالت پایا قرار دارد. با توجه به اندازه‌گیری دما و تغییرات کم آن می‌توان این گونه بیان داشت که با توجه به مقطع ابتدایی شعله که مورد سنجش قرار می‌گیرد با افزایش نسبت رقیق‌سازی دمای مقطع ابتدایی شعله شاهد افزایش دما می‌باشیم، افزایش دما مقطع ابتدایی شعله میزان چندان زیادی نبوده و به طور کلی می‌توان تاثیر رقیق‌سازی را بر روی مقطع ابتدایی

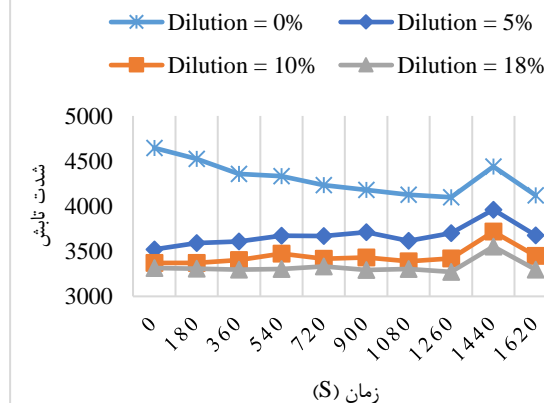
OH/CH



شکل ۱۲: نمودار OH/CH در آزمایش‌ها

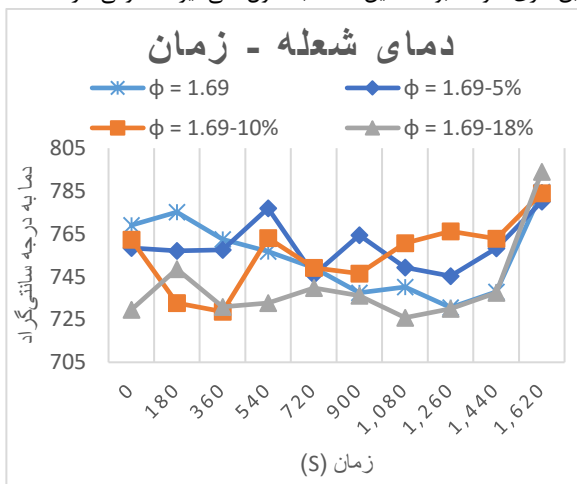
شکل ۱۳ نمودار تابش گونه‌ی H₂O را نمایش می‌دهد. این گونه فرآورده‌ی اصلی آزمایش نیز محسوب می‌شود و میزان تابش آن نمایان‌گر کامل‌تر بودن احتراق است [۱۶] به تبع آن همانطور که در نمودار شکل ۱۳ نیز نمایان است با افزایش نسبت رقیق‌سازی نیتروژن شاهد کاهش شدت تابش H₂O در مقطع اندازه‌گیری شده می‌باشیم که این خود مسلماً از نتایج رقیق‌سازی بوده و همین عامل یکی از عوامل مهم در افزایش طول شعله خواهد بود. لازم به ذکر است باتوجه به دمای واکنش، امکان شکست مولکول‌های نیتروژن و تشکیل رادیکال‌های جدید و تغییر روند کلی واکنش کم بوده در نتیجه بر اساس تکمیل واکنش می‌توان گفت باقی مولکول‌های آب در ادامه شعله و خارج از سطح اندازه‌گیری شده شکل خواهند گرفت.

H₂O

شکل ۱۳: مقایسه تابش رادیکال H₂O در آزمایش‌ها

شکل ۱۴ نمودار طیف تابش CO₂ در آزمایش‌های مختلف را نمایش می‌دهد. رادیکال CO₂ به صورت یک طیف از طول موج ۳۵۰ تا ۶۰۰ نانومتر نورتابی شیمیایی دارد. تابش رادیکال‌های C₂ و CH نیز با طیف CO₂ هم‌پوشانی دارد. با توجه به نمودارها بیشترین تغییر و کاهش در تابش CO₂ مربوط به شعله با نسبت رقیق‌سازی ۵ درصد می‌باشد و با افزایش نسبت رقیق‌سازی شاهد کاهش شدت تابش CO₂ می‌باشیم. تابش این گونه یک معیار مهم در سنجش حرارت آزاد شده محسوب می‌شود [۱۶]. با توجه به این مسئله می‌توان دریافت که بیشترین حرارت آزاد شده از واکنش احتراق با نسبت رقیق‌سازی ۵ درصد بوده و کمترین حرارت آزاد شده مربوط به احتراق با نسبت رقیق‌سازی ۱۸ درصد می‌باشد. حالت بدون رقیق‌سازی شرایط نزدیک به شرایط رقیق‌سازی ۱۰ درصد را دارا می‌باشد.

نمایش می‌دهد. همانطور که در بالا گفته شد تابش رادیکال‌های CO_2 و OH بیانگر خوبی از حرارت آزاد شده در اثر احتراق هستند که در شکل‌های ۱۴ و ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. در طول زمان محفظه احتراق در حال گرم شدن و همگرا شدن دمای آن می‌باشد در ادامه با توجه به شکل و ساختار محفظه‌ی احتراق مورد نظر، این افزایش دما به منزله‌ی پیش‌گرم کردن سوخت و اکسیژن می‌باشد. با افزایش رقیق‌سازی دمای کلی محفظه کاهش می‌یابد و این روند هم‌گرایی را برای درصدهای مختلف رقیق‌سازی بر اساس این اصل کلی شاهد هستیم، نکته قابل توجه در این حالت بالاتر بودن دمای نهایی محفظه در حالت رقیق‌ساز ۱۰ و ۵ درصد می‌باشیم، البته این حالت به علت عدم همگرا شدن نهایی و دمای محفظه در حالت غیر رقیق‌ساز می‌باشد که در صورت ادامه آرایش می‌توان با توجه به روند افزایش دمای محفظه این توقع را داشت که دمای نهایی در حالت غیر رقیق‌ساز بالاتر از حالت رقیق‌سازی خواهد بود که این حالت با اصول کلی نیز همخوانی دارد.



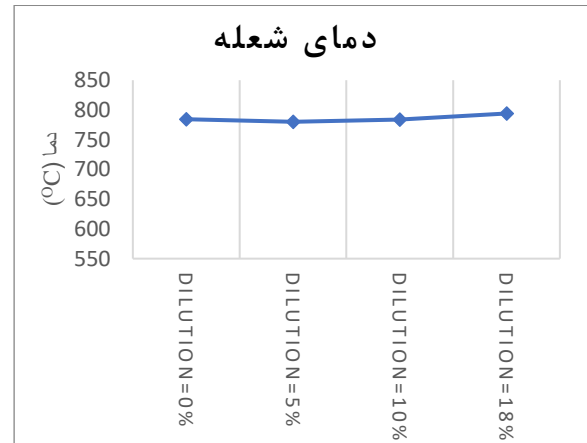
شکل ۱۷: مقایسه‌ی تغییرات دمای زیر محفظه‌ی احتراق در آزمایش‌های مختلف

نتیجه‌گیری

بر اساس این تحقیق می‌توان گرمای آزاد شده در اثر احتراق را با توجه به تابش گونه‌های احتراقی OH و CO_2 در نسبت‌های رقیق‌سازی گوناگون بررسی و مقایسه کرد. مقایسه‌ی تابش این دو گونه با نمودار مربوط به دمای زیر محفظه‌ی احتراق نشان می‌دهد که با افزایش تابش این دو گونه، گرمای آزاد شده در اثر احتراق نیز افزایش می‌یابد. بیشترین حرارت آزاد شده از واکنش احتراق با نسبت رقیق‌سازی ۵ درصد بوده و کمترین حرارت آزاد شده مربوط به احتراق با نسبت رقیق‌سازی ۱۸ درصد می‌باشد. با افزایش نسبت رقیق‌سازی شاهد کاهش شدت تابش H_2O می‌باشیم نتایج رقیق‌سازی بوده و همین عامل یکی از عوامل مهم در افزایش طول شعله خواهد بود.

با تغییرات نسبت رقیق‌سازی، تابش گونه‌ی CH نیز تغییر می‌کند. و این تغییر با افزایش نسبت رقیق‌سازی همراه با کاهش این گونه در سطح مقطع اندازه‌گیری شده همراه است. با اندازه‌گیری و بررسی نسبت تغییرات C_2/OH و نسبت CH/C_2 شاهد یک روند ثابت و یکنواخت از تابش اینگونه در طول زمان می‌باشیم که تاثیر کم پیش‌گرم بر تولید این رادیکال‌ها در سطح مقطع ابتدایی شعله می‌باشد، البته این مهم برای حالت رقیق شده با نیتروژن بیشتر صادق است و تغییرات و افزایش نسبت C_2/OH را در حالت غیر رقیق‌ساز شاهد می‌باشیم. و این روند برای نسبت CH/C_2 در حالت غیر رقیق‌ساز روند کاهشی را نشان می‌دهد و این به علت کاهش C_2 در مقطع اندازه‌گیری شده می‌باشد. با افزایش نسبت

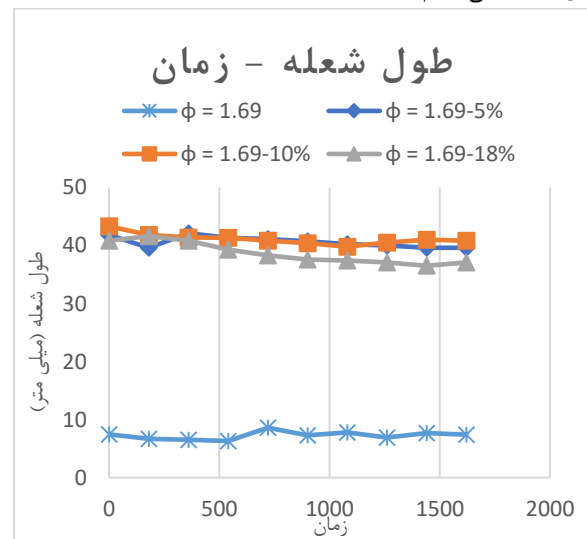
شعله و ناحیه پوششی از شعله حداقل دانست. این حداقل تاثیر، تاثیر افزایشده نیز محسوب کرد، البته می‌دانیم که افزایش رقیق‌سازی به طور کلی باعث کاهش دمای شعله می‌گردد ولی در مقطع اندازه‌گیری شده این اصل کلی دیده نشده و تاثیر بعضاً معکوس دارد، البته این بیان باید در حالت کلی و بررسی کلی شعله بیان گردد.



شکل ۱۵: نمودار دمای شعله نسبت به درصد رقیق‌سازی

مقایسه‌ی طول شعله

طول شعله یکی از پارامترهایی بوده است که همزمان با ذخیره‌ی داده‌های طیف سنجی هر ۳ دقیقه ثبت شده است. شکل ۱۶ طول شعله را در نسبت رقیق‌سازی‌های مختلف نمایش می‌دهد. بر همین اساس با هرگونه رقیق‌سازی طول شعله به طور کلی افزایش یافته، ولی نسبت‌های مختلف رقیق‌سازی دارای طول شعله نزدیک به هم می‌باشد، در ادامه با گرم شدن محفظه و رد طول زمان بر اساس یک روند کلی، در همه حالت‌ها شاهد کاهش جزئی طول شعله و تثبیت شدن طول شعله بر اساس یکنواخت شدن دمای محفظه می‌باشیم.



شکل ۱۶: نمودار طول شعله در زمان‌های مختلف برای آزمایش‌های گوناگون

دمای زیر محفظه‌ی احتراق

همانطور که در بالا گفته شد به وسیله‌ی یک ترموکوپل، دمای زیر محفظه‌ی احتراق نیز اندازه‌گیری و ثبت شده است. دمای اولیه جهت آغاز اندازه‌گیری‌ها در تمام آزمایش‌ها 50 ± 4 درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. شکل ۱۷ نمودار تغییرات دمای محفظه‌ی احتراق برحسب زمان را در آزمایش‌های مختلف

مزو مقیاس، بیست و یکمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران.

[6] Ballester, J., García-Armingol, T., 2010, Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames, *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(4), 375-411.

[7] Józsa, V., 2016, Application of lean premixed prevaporized burner for renewable fuels, *Environmental Science*.

[8] Sitzki, L., Borer, K., Schuster, E., Ronney, P., 2001, Combustion in micro scale heat- recirculating burners, *The Third Asia- pacific conference on combustion*, Seoul.

[9] Mikami, M., Maeda, Y., Matsui, K., Seo, T., Yuliati, L., 2013, Combustion of gaseous and liquid fuels in meso-scale tubes with wire mesh, *Proceedings of the Combustion Institute*, 34(2); 3387-3394.

[10] Zhao, Z., Wang, W., Zuo, Z., Kuang, N., 2021, Investigation on the flame characteristics of premixed propane/air in a micro opposed flow porous combustor. *Energy*, 238; 1-30.

[11] Heland, J., Schafer, K., 1998, Determination of major combustion products in aircraft exhausts by ftir emission spectroscopy, *Atmospheric Environment*, 32; 367-372.

[12] Fansler, T.D., Stojkovic, B., Drake, M.C., Rosalik, M.E., 2002, Local fuel concentration measurements in internal combustion engines using spark-emission spectroscopy, *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 75(4-5); 577-590.

[13] Weiser, V., Eisenreich, N., 2005, Fast Emission Spectroscopy for a Better Understanding of Pyrotechnic Combustion Behavior, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 30(1); 67-78.

[14] De Moraes Flores, É.M., Medeiros Nunes, A., Luiz Dressler, V., Dēdina, J., 2009, Multiple microflame quartz tube atomizer: Study and minimization of interferences in quartz tube atomizers in hydride generation atomic absorption spectrometry, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 64(2), 173-178.

[۱۵] اسکندری، ف.، ۱۳۹۸، بررسی آزمایشگاهی پارامترهای حرارتی در مشعل شعله سطحی با استفاده از طیف سنجی تابشی، دانشگاه تربیت مدرس.

[۱۶] فرحمند، ف.، ۱۳۹۸، بررسی آزمایشگاهی میدان دمای شعله با استفاده از طیف سنجی تابشی طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس.

رقیق‌سازی نیتروژن شاهد افزایش نسبت شدت وجود رادیکال‌های OH/CH می‌باشیم.

با افزایش رقیق‌سازی دمای کلی محفظه کاهش می‌یابد و این روند هم‌گرایی را برای درصدهای مختلف رقیق‌سازی بر اساس این اصل کلی شاهد هستیم، نکته قابل توجه در این حالت بالاتر بودن دمای نهایی محفظه در حالت رقیق‌ساز ۱۰ و ۵ درصد می‌باشیم، البته این حالت به علت عدم هم‌گرایی شدن نهایی و دمای محفظه در حالت غیر رقیق‌ساز می‌باشد که در صورت ادامه آزمایش می‌توان با توجه به روند افزایش دمای محفظه این توقع را داشت که دمای نهایی در حالت غیر رقیق‌ساز بالاتر از حالت رقیق‌سازی خواهد بود که این حالت با اصول کلی نیز همخوانی دارد.

بر اساس داده‌های حاصل از این تحقیق بهترین درصد رقیق‌سازی از منظر میزان تولید و یکنواختی حرارت آزاد شده برای محفظه در حالت رقیق‌سازی بین ۵ تا ۱۰ درصد خواهد بود، بر همین اساس در این حدود درصد رقیق‌سازی‌ها شاهد عملکرد یکنواخت‌تر، طول مناسب‌تر شعله و عدم وابستگی زیاد به پیش‌گرم محفظه می‌باشیم و برای استفاده به عنوان یک منبع گرمایی در حالت کارکرد مداوم مناسب‌تر از حالت غیر رقیق‌ساز و با رقیق‌سازی بالا می‌باشد.

فهرست علائم

c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت، J/kgK
time	زمان، s
T	دما، °C
فهرست علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m ³
ϕ	نسبت هم‌ارزی
f	زیر نویس‌ها سیال
	بالا نویس‌ها
*	شرایط مرجع

مراجع

[1] Sarrafan Sadeghi, S., Tabejamaat, S., Baigmohammadi, M., Zarvandi, J., 2014, 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*, 81, 169-183.

[2] Davy, H., Trans, R., A, 1817, Computational fluid dynamics study of propane/air micro flame stability in a heat recirculation reactor. *Soc. London*, 107, 45-76.

[3] Barnard, J. A., Bradley, J. N., Khoshnoudi, M., editors, 1817, *Flame and combustion*. 1st edition. University Publication Center, Tehran. [Persian]

[۴] صرافان صادقی، س.، تابع جماعت، ص.، بیگ محمدی، م.، ۱۳۹۲، طراحی و ساخت بستر تست به همراه پدیده شناسی احتراق در محفظه‌های مزو و میکرو مقیاس، بیست و یکمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران.

[۵] صرافان صادقی، س.، تابع جماعت، ص.، بیگ محمدی، م.، ۱۳۹۲، بررسی اثر نسبت رقیق‌سازی اختلاط بر پایداری شعله در محفظه احتراق