

## معرفی یک محفظه احتراق ماریچ-کانالی جدید و بررسی تجربی اثر رقیق‌ساز نیتروژن بر شعله غیر پیش‌آمیخته میکرو متان - اکسیژن به کمک روش طیف‌سنجی

سروش صرافان صادقی<sup>۱</sup>، صادق تابع جماعت<sup>۲\*</sup>، امیررضا قهرمانی<sup>۳</sup>، سینا نریمانی اصل<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی 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\_gahremani@aut.ac.ir

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

\*نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۳، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸)

**چکیده:** در پژوهش حاضر، به بررسی تجربی احتراق، اکسیژن-متان با بررسی اثر رقیق‌سازی نیتروژن درون محفظه‌های کانالی تخت همراه با بازیابی انرژی حرارتی ناشی از دمای گازهای حاصل از احتراق پرداخته شده است و احتراق غیر پیش‌آمیخته متان-اکسیژن با نسبت هم‌ارزی ثابت ۱/۶۹ با درصد‌های رقیق‌سازی نیتروژن ۰/۰، ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۱۸ به کمک روش طیف‌سنجی مورد بررسی قرار گرفته است، برای این تحقیق از یک محفظه جدید طراحی و ساخته شده از جنس آلومینیوم استفاده شده است، این محفظه بر اساس طراحی ماریچ-کانالی جهت کمک به بازیابی حرارتی طراحی شده است. در این محفظه جهت پیش گرم کردن گازهای ورودی، گازهای حاصل از احتراق پس از طی یک مسیر موازی با جریان ورودی باعث پیش گرم شدن گازهای ورودی می‌شوند. همچنین اکسیژن قبل از قسمت ورودی به محفظه توسط نیتروژن رقیق و مخلوط شده و سپس وارد محفظه می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق با افزایش نسبت رقیق‌ساز، کاهش طیف تابشی رادیکال  $H_2O^*$  که نمایانگر کامل‌تر بودن احتراق است مشاهده شده است. به‌طور کلی با افزایش نسبت رقیق‌سازی افزایش طول شعله مشاهده می‌شود و در حالت رقیق‌سازی ۵ و ۱۰ درصد بهترین حالت یکنواختی توزیع دمایی و طول مناسب شعله مشاهده می‌شود.

**کلیدواژه‌گان:** احتراق متان-اکسیژن، رقیق‌سازی نیتروژن، محفظه‌های احتراق ماریچ-کانالی، احتراق غیر پیش‌آمیخته، طیف‌سنجی شعله

### مقدمه

با نگاهی به شتاب روزافزون گسترش صنایع و علوم وابسته به آن در حوزه دستگاه‌های میکرو الکترومکانیکی در کلیه حوزه‌هایی همچون هوافضا، پزشکی و ... نیاز به تأمین انرژی موردنیاز این دستگاه‌ها بیش از پیش موردتوجه قرار گرفته است. استفاده از دستگاه‌هایی که قابلیت شارژ راحت و تولید توان پایدار و مطمئن نسبت به حجم تحمیلی به سیستم دارد؛ یکی از نکات مهم در انتخاب دستگاه‌های توانی در این نوع از وسایل است. بر همین اساس با توجه به نسبت مناسب انرژی آزادشده به وزن سوخت‌ها، استفاده از احتراق برای تولید انرژی بسیار راهگشا و موفق خواهد بود. اما چالش اصلی ایجاد امکان بهره‌برداری از دستگاه‌هایی است که در ابعاد میکرو، توانایی استفاده از ظرفیت احتراقی این سوخت‌ها را داشته باشند. بر همین اساس نگاه به احتراق میکرو و ساختار پایداری شعله در این نوع از احتراق جهت طراحی دستگاه‌های بهره‌بردار بسیار مهم گشته و تحقیقات در این حوزه روزبه‌روز توسعه و توجه بیشتری را به‌سوی خود جلب نموده است [۱].

با توجه به تحقیقات آزمایشگاهی پیشین صورت گرفته از منظر احتراق کلاسیک، غیرممکن است بتوان در ابعادی که به‌عنوان فاصله یا قطر خاموشی مطرح هستند احتراق پایدار ایجاد کرد [۲] یکی از موانع ایجاد احتراق پایدار درون راکتورهای 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 است. در نزدیکی یک سطح جامد، اتلاف گرما به قدری زیاد است که فروکشی یا خاموشی شعله رخ خواهد داد [۳]. با توجه به مطالعات انجام‌گرفته، تعاریف متفاوتی برای احتراق در راکتورها و محفظه‌های احتراقی که دارای ابعاد مشخصه‌ای نزدیک به ضخامت شعله پیش‌آمیخته آرام می‌باشند، بیان‌شده است. در تعریف وابسته به ابعاد فیزیکی قطر محفظه کمتر از ۱ میلی‌متر به‌عنوان شعله میکرو و قطر مابین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر به‌عنوان احتراق مزو شناخته می‌شود. در تعریفی دیگر که بر اساس قطر خاموشی ارائه می‌شود، در صورتی که قطر محفظه کمتر از قطر خاموشی برای آن شعله باشد به‌عنوان احتراق میکرو و در صورتی که قطر محفظه بین ۱ تا ۱۰ برابر قطر خاموشی باشد به‌عنوان احتراق مزو طبقه‌بندی می‌شود. در تعریف دیگری نوع شعله بر اساس نسبت سطح به حجم محفظه احتراق تعریف می‌شود. این تعریف بر پایه تأثیر انتقال حرارت بر نوع شعله است. در این تعریف به نسبت سطح به حجم محفظه احتراق کمتر از ۲۰۰۰ را به‌عنوان احتراق میکرو و نسبت سطح به حجم بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ را به‌عنوان احتراق مزو تقسیم‌بندی می‌کنند [۴-۶].

طیف‌سنجی روشی است که امکان اندازه‌گیری طول‌موج و شدت نور را ممکن ساخته است. در مطالعه احتراق، با استفاده از طیف‌سنج مشخصات شعله بررسی می‌شود. احتراق باعث برانگیختگی رادیکال‌های احتراقی می‌شود، رادیکال‌ها پس از بازگشت از حالت برانگیخته به حالت قبل، در طول موج‌های مشخص از خود نوری در طول موج‌های مشخص منتشر می‌کنند [۷]. در شرایط مختلف، غلظت رادیکال‌های برانگیخته متفاوت است و در نتیجه شدت نور انتشاری در طول موج‌های مشخص نیز تفاوت می‌کند. با توجه به قله‌های نمودار شدت نور در هر طول‌موج، رادیکال‌های با غلظت بالا شناسایی می‌شوند و از این طریق به گونه‌های احتراقی موجود در شعله مشخص خواهند شد. در اندازه‌گیری دما نیز طیف‌سنج نسبت به روش‌های تماسی مزایایی دارد. به‌منظور اندازه‌گیری دمای محفظه احتراق در شرایطی که دمای شعله بسیار بالاست، یا به هر دلیلی امکان دماسنجی مستقیم وجود ندارد، طیف‌سنج نسبت به ترموکوپل کارآمدتر است. همچنین طیف‌سنج در برابر اغتشاشات محیط مقاومت بیشتری برای اندازه‌گیری دما دارد [۸]. ویزر و آیزنراک [۹] به بررسی رفتار احتراق پیرو تکنیک با روش طیف‌سنجی پرداختند. احتراق پیرو تکنیک سریع و با انتشار زیاد رخ می‌دهد. روش طیف‌سنجی با تحلیل تابش ناشی از احتراق، باعث سهولت در بررسی احتراق پیرو تکنیک شده است. در این پژوهش رادیکال‌های موجود در احتراق با بررسی شدت تابشی در محدوده فرابنفش شناسایی شدند. همچنین دریافتند که احتراق پیرو تکنیک یک پیوستار خاکستری در محدوده طیف فرورسرخ نزدیک منتشر می‌کنند که می‌توان از آن برای تعیین دمای واکنش احتراق استفاده کرد. موراس فلورس و همکاران [۱۰] به توسعه یک نوع بهبود یافته اتمایزر هیدرید<sup>۱</sup> برای طیف‌سنجی جذب اتمی - اتمایزر لوله کوارتز میکرو شعله چندگانه<sup>۲</sup> پرداختند. از اولین کارهای تحقیقات تجربی در حوزه احتراق میکرو می‌توان به کار جاروسینسکی [۱۱] 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 همکارانش [۱۲] احتراق در یک محفظه احتراق میکرو ماریچی 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 [۱۳] به بررسی و مدل‌سازی حدهای خاموشی و مکانیزم‌های حدی در محفظه‌های احتراق استوانه‌ای با چرخش حرارتی پرداخت و نقش دیواره را در خاموشی‌ها بررسی کرد، وی مدل‌سازی‌هایش را به صورت دوبعدی انجام داد ولی با وجود به‌کارگیری مدل‌های ساده شیمی احتراقی، کار او جهت

<sup>۱</sup> Hydride

<sup>۲</sup> Multiple micro-flame

مشخص کردن حدهای اشتعال پذیری بسیار مهم بود. ماروتا و همکاران [۱۴] بررسی احتراق پیش-آمیخته در یک راکتور استوانه‌ای پیش گرم شده از جنس کوارتز پرداختند. تحقیقات ایشان به صورت تجربی و عددی به بررسی ویژگی‌های شعله و حدود پایداری شعله‌های مختلف در ابعاد زیر قطر خاموشی پرداخته است.

میکامی و همکاران [۱۵] 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 [۱۶-۱۸] به بررسی اثر نسبت هم‌ارزی، عدد رینولدز مخلوط ورودی و درصد رقیق‌سازی نیتروژن بر دینامیک شعله مخلوط پیش آمیخته متان-اکسیژن در راکتور استوانه‌ای از جنس کوارتز در مقیاس مزو پرداختند. بر اساس نتایج آزمایش‌های آن‌ها، تشکیل شعله پایدار یا شعله خاموش شونده و روشن شونده 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 استوکیومتری شعله در داخل راکتور تشکیل نشود. بر این اساس تشکیل شعله پایدار یا شعله خاموش شونده و روشن شونده تکرارپذیر درون راکتور، با افزایش عدد رینولدز محدود می‌شود؛ به طوری که ممکن است با افزایش سرعت جریان داخل راکتور، حتی در نسبت هم‌ارزی‌های نزدیک به حالت استوکیومتری نیز شعله درون راکتور تشکیل نشود. بر اساس آزمایش‌های آن‌ها همچنین رقیق‌سازی با نیتروژن، باعث افزایش قابل توجه زمان شروع واکنش در داخل راکتور می‌شود. لی و همکاران [۱۹] مشخصات احتراقی شعله میکرو جت متان غیر پیش آمیخته در جریان هم‌محور هوا را به شکل تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنان در پژوهش خود اثر برهم‌کنش گرمایی شعله و لوله جامد را مدنظر قرار دادند و چهار نوع رژیم شعله را بر اساس بازه‌های مختلف سرعت جریان سوخت، در آزمایش‌ها مشاهده کردند. چهار رژیم شعله مشاهده شده توسط آنان عبارت‌اند از: شعله جداشونده، چسبیده، نیم‌کروی<sup>۱</sup> و شعله چتری شکل، در بررسی‌های و نتایج محاسباتی آنان توزیع رادیکال‌های  $OH^*$  و  $CH^*$  با نتایج تجربی دارای سازگاری مناسبی بوده است. علی‌پور و سعیدی [۲۰]، به بررسی تأثیر استفاده از ساختار ترکیبی بر مشخصه‌های احتراقی مخلوط هیدروژن-هوا، با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی با در نظر گرفتن سینتیک شیمیایی جزئی و ضرایب نفوذ مولکولی پرداختند. آن‌ها تأثیر پارامترهای سرعت جریان ورودی، رسانش حرارتی دیوار و انحنای دیوار بر روی مشخصه‌های احتراق هیدروژن-هوا برای دو ساختار ساده و ترکیبی را بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ساختار ترکیبی تأثیر بسزایی بر روی مشخصه‌های احتراقی و مکان شعله می‌گذارد. در ساختار ترکیبی، نقش انتقال حرارت، به واسطه سیال ثانویه، در مقایسه با ساختار ساده افزایش می‌یابد که منجر به بهبود مشخصه‌های حرارتی محفظه احتراق و کاهش نقش رسانش حرارتی دیوار در ساختار ترکیبی می‌شود. میلکرک و همکاران [۲۱،۲۲] 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. ژائو و همکاران [۲۳] 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 به‌طور مؤثر می‌توان با حفظ دمای یکنواخت بر روی دیوار خارجی به تثبیت محل شعله کمک شایانی نماید. و نرخ همرفتی بین مخلوط‌های 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.

پژوهش در حوزه احتراق میکرو با توجه به جدید بودن این حوزه بیشتر پیرامون شناخت و رفتارشناسی این نوع از احتراق متمرکز بوده و تحقیقات پیرامون مسائل کاربردی کمتر صورت گرفته است. لذا در این تحقیق به بررسی اثر کانال و بازیابی حرارتی گازهای حاصل از احتراق جهت پیش گرم نمودن گازهای ورودی در حضور رقیق‌ساز نیتروژن پرداخته شده است.

<sup>۱</sup> Hemisphere

بازیابی انرژی در احتراق میکرو جهت ساخت تجهیزات کاربردی همچون ریفورمینگ گازها، میکرو پیشرانها بر پایه احتراق میکرو و یا سیستم‌های فتوولتائیک بسیار مهم و کاربردی بوده و میزان یکنواختی و بازیابی انرژی حرارتی در این نوع سیستم‌ها اثرگذار و مهم هست. در این تحقیق با طراحی یک محفظه کانالی سعی شده است تا انرژی گرمایی احتراق بازیابی شده و کمک آن پیش گرم کردن گازهای ورودی صورت گیرد که در ادامه به بررسی این موضوعات و اثر رقیق‌سازی پرداخته شده است.

## بستر آزمون

از الزامات اولیه مطالعات تجربی در اختیار داشتن تجهیزات و بستر آزمون استاندارد و متناسب با نوع مطالعات است. بر همین اساس بستر آزمون احتراق میکرو مورد استفاده از بستر آزمون موجود در آزمایشگاه احتراق دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران) [۱۶،۱۷] مورد یک به‌روزرسانی در مجموعه ابزار اندازه‌گیری و بخش محفظه احتراق قرار گرفته است. نمایی از بستر آزمون مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.

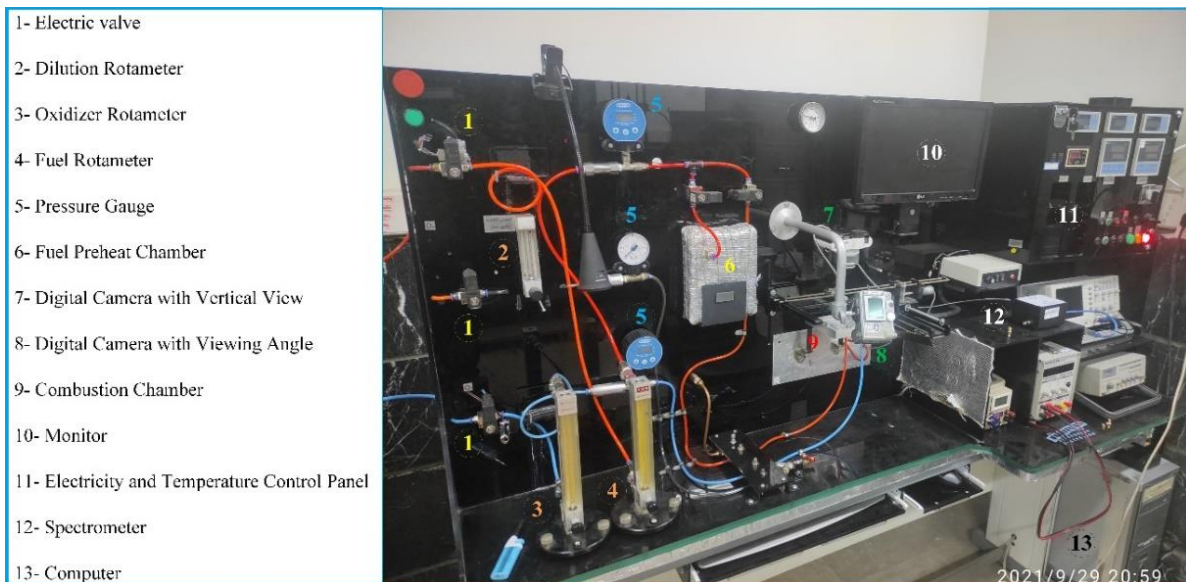


Figure 1 - View of the Combustion chamber and Test Stand of micro-Combustion  
شکل ۱- نمایی از محفظه و مجموعه مورد استفاده

در شکل ۲ نمای شماتیک از بستر آزمون نمایش داده شده است.

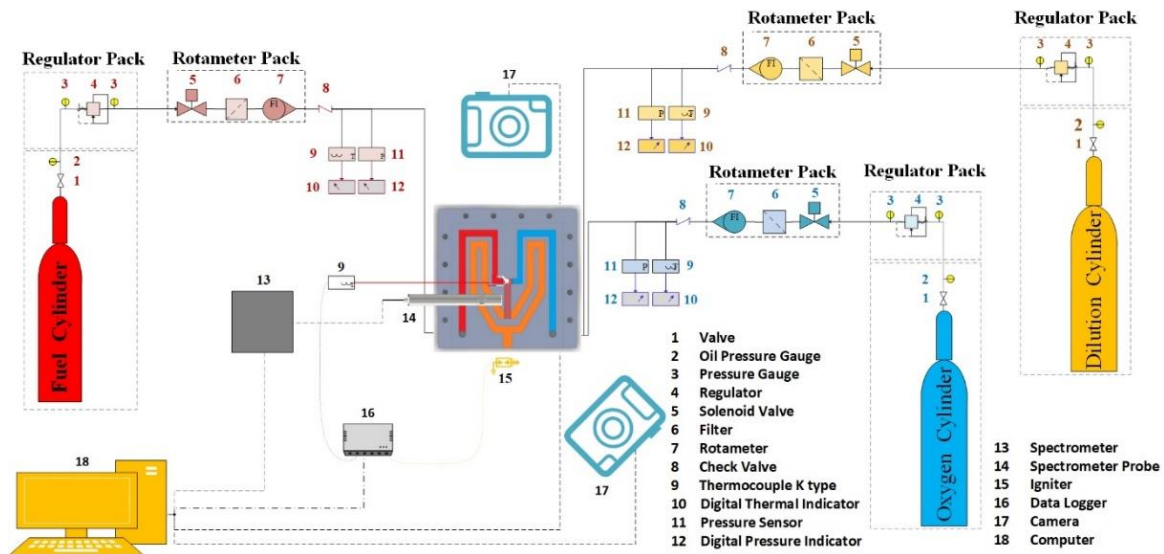


Figure 2 - Schematic view of the Test Stand  
 شکل ۲- نمایی شماتیک از بستر آزمون مورد استفاده

محفظه احتراق مطابق شکل ۳، به شکل محفظه احتراق کانالی مارپیچی از جنس آلومینیوم ساخته و استفاده شده است. همان گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است شکل محفظه به شکلی طراحی شده است تا سوخت و اکسنده هر یک از روبرو و به شکل غیر پیش مخلوط وارد محفظه شود، محفظه احتراق مورد بررسی را می توان به سه ناحیه اصلی تقسیم بندی نمود، فضای اول که شامل جریان ورودی مخلوط اکسیژن و نیتروژن در سمت ورودی دیواره بستر آزمون قرار دارد و در سمت دیگر ورودی سوخت (متان) قرار دارد. ناحیه دوم که محل اختلاط و تشکیل شعله غیر پیش آمیخته است و واکنش درون این بخش از کانال شکل می گیرد؛ و در انتها بخش سوم که در این بخش حرارت تولیدی در اثر احتراق و گازهای عبوری حاصل از احتراق در این بخش به دیوار منتقل و از طریق انتقال حرارت عرضی و طولی باعث پیش گرم کردن سیال سرد ورودی می شود؛ و این پیش گرم کردن باعث ایجاد تعادل حرارتی از طریق تعادل در مقیاس های زمانی و در نتیجه پایداری بهتر احتراق می شود. مقیاس زمانی انتقال حرارت در جریان واکنشی بر اساس مقیاس زمانی واکنشی است ( $10^{-6} \approx 0$ ) و مقیاس انتقال حرارت درون دیوار خیلی بزرگ تر از جریان واکنشی و از مرتبه ( $10^{-1} \approx 0$ ) است [۲۰]. در این محفظه قسمت بالایی از جنس کوارتز به ضخامت ۵ میلی متر استفاده شده تا امکان رصد شعله و داده برداری امکان پذیر شود. این راکتور به شکل افقی در بستر آزمون استقرار یافته است و ابعاد مکان تشکیل شامل ۲۹/۱ میلی متر طول، عرض ۵ میلی متر و ارتفاع ثابت کلیه بخش های کانال ها ۵ میلی متر هست.

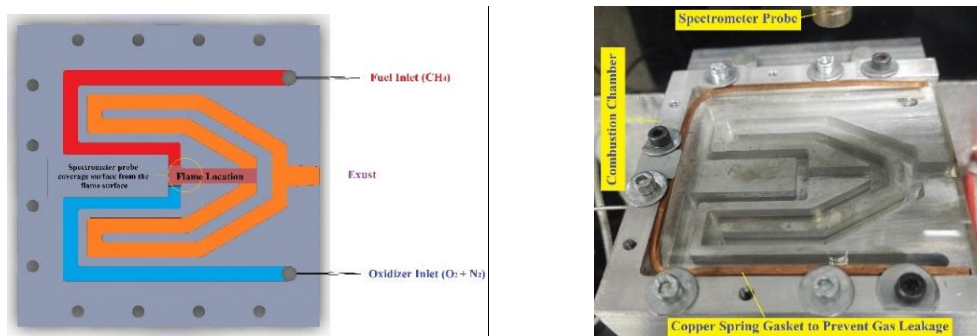


Figure 3 - A) View of the combustion chamber, B) Schematic view with fuel and oxidant inlets  
 شکل ۳- الف) نمایی از محفظه احتراق، ب) نمای طرح واره به همراه محل های ورودی سوخت و اکسنده

در شکل ۴، محل استقرار ترموکوپل و پوششگر<sup>۱</sup> طیف‌سنج نشان داده شده است. جهت این تحقیق از یک طیف‌سنج مدل V900 ساخت شرکت فناوریان فیزیک نور استفاده شده و پوششگر طیف‌سنج مورد استفاده عمود بر شعله در فاصله ثابت قرار داشته است کلیه سیستم‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری شامل، سیستم اندازه‌گیری دبی سوخت و اکسند، ترموکوپل و طیف‌سنج مورد استفاده کالیبره شده‌اند. به وسیله یک ترموکوپل دمای زیر محفظه احتراق در محل تشکیل شعله اندازه‌گیری شده است و در لحظه اولین داده‌برداری در همه آزمایش‌ها، دمای زیر محفظه احتراق ۵۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. لازم به توضیح است ضخامت بین ترموکوپل و محل احتراق ۷ میلی‌متر است. در تمامی آزمایش‌ها فاصله پوششگر طیف‌سنج با شعله ثابت و برابر ۱۱۶ میلی‌متر است. به جهت ثابت نگه‌داشتن پوششگر طیف‌سنج و همچنین کاهش زاویه واگرایی از یک لوله استفاده شده است که در بخش (الف) شکل ۴ تصویر طرح‌واره آن نمایش داده شده است. زاویه واگرایی به‌منظور کاهش اختلالات محیطی با استفاده از لوله کاهش پیدا کرده است. زاویه واگرایی پوششگر طیف‌سنج بدون لوله ۰/۲۲ رادیان است و با استفاده از لوله این زاویه به ۰/۱۷ کاهش یافته است. با توجه به فاصله ۱۱۶ میلی‌متری، پوششگر طیف‌سنج از دایره‌ای به شعاع ۸/۸۹ میلی‌متر نور از شعله دریافت می‌کند. محدوده زمان نوردهی بر روی عدد ۱۰۰۰۰ میلی ثانیه بوده است. علت انتخاب زمان نوردهی بالا، کوچک بودن شعله و شدت نور اندک آن بوده که با بالا بردن این زمان، نور ورودی طیف‌سنج افزایش یافته و شدت نور به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. در هر آزمایش شدت طیف انتشاری شعله پس از سه دقیقه با گام یک نانومتر ذخیره شده است. هم‌زمان با ثبت داده‌های طیف‌سنج، دمای زیر محفظه احتراق و طول شعله نیز ثبت شده است. در هر آزمایش ده مرتبه (به مدت ۳۰ دقیقه) اندازه‌گیری صورت گرفته است. همچنین کلیه داده‌های شدت با گام طول موج ۱ نانومتر ذخیره شده است. سایر مشخصات دستگاه‌ها و ابزار اندازه‌گیری‌ها آزمون در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱- مشخصات دستگاه‌ها و ابزار اندازه‌گیری در آزمون

Table 1- Specifications of systems and measuring instruments in the test

Specifications	Quantity	Units	Accuracy
General dimensions of the chamber	12×100×100	mm	± 0.1 (mm)
Dimensions of the flame formation zoon	5×5×29	mm	± 0.1 (mm)
Thickness of the quartz part of the chamber	5	mm	± 10 (µm)
The capacity of fuel and oxidizer flowmeters	15	SLM	± 5% (Full Scale)
Wavelength range of the spectrometer	200 – 1100	Nm	-
Spectrometer resolution	1.8	Nm	-
Diaphragm diameter (Optical fiber scanner)	0.38	mm	-
Exposure time	10000	Ms	-
Fiber Optic Diameter	600	µm	-

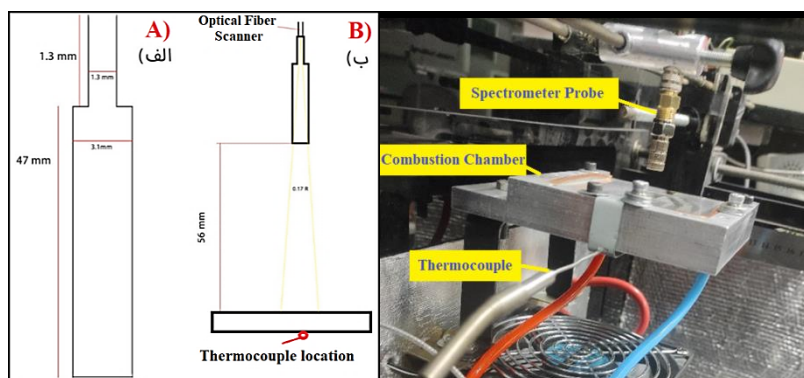


Figure 4 - A) The image of the tube used on the optical fiber, B) The position of the tube about the combustion chamber, C) The view of the thermocouple under the combustion chamber with the cooling fan

شکل ۴- الف) تصویر لوله‌ی استفاده‌شده بر روی فیبر نوری، ب) وضعیت لوله نسبت به محفظه احتراق، ج) ترموکوپل زیر محفظه‌ی احتراق به همراه فن خنک‌کن

<sup>1</sup> Probe

در تمامی آزمایش‌ها دبی سوخت و نسبت سوخت به اکسنده ثابت بوده و نسبت رقیق‌سازی متغیر بوده است این نسبت‌ها و تغییرات در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین از متان گرید ۵ به‌عنوان سوخت و جهت اکسیدکننده از اکسیژن گرید ۴ استفاده شده است جهت اندازه‌گیری دبی‌های گازهای مورد استفاده در این پژوهش از روتامتر کالیبره شده استفاده شده است، و اعداد اندازه‌گیری شده دبی در ضریب کالیبراسیون روتامترها ضرب شده و داده‌های به‌دست‌آمده در جدول ۲ نشان داده شده است. در رابطه (۱)،  $\varphi$  نسبت هم‌ارزی سوخت به اکسیژن به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\varphi = \frac{m_{CH_4}/m_{O_2}}{(m_{CH_4}/m_{O_2})_{st}} = \frac{n_{CH_4}/n_{O_2}}{(n_{CH_4}/n_{O_2})_{st}} \quad (1)$$

که در آن  $m$  جرم گاز،  $n$  مقدار مولی است و نماد  $st$  نشان‌دهنده شرایط استوکیومتری است. درصد رقیق‌سازی به شکل رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$\text{Dilution percentage} = \frac{Q_{N_2}}{(Q_{N_2} + Q_{O_2})} \times 100 \quad (2)$$

که در آن  $Q_{N_2}$  نرخ جریان نیتروژن و  $Q_{O_2}$  نرخ جریان اکسیژن برحسب SLM است. همچنین  $Re$  عدد رینولدز بر اساس رابطه (۳) محاسبه شده است، این رابطه جهت محاسبه عدد رینولدز در کانال است.

$$Re = \frac{\rho V D_H}{\mu} \quad (3)$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی مخلوط،  $V$  سرعت مخلوط،  $\mu$  لزجت دینامیکی مخلوط و  $D_H$  قطر هیدرولیکی کانال است.

جدول ۲- دبی سوخت، هوا و رقیق‌ساز و نسبت هم‌ارزی مربوط به هر آزمایش

Table 2- Fuel, air, and diluent flow rates and equivalence ratios for each test

Test Number	$D_p$	$\varphi$	$\dot{Q}_o$ (SLM)	$\dot{Q}_d$ (SLM)	$\dot{Q}_f$ (SLM)	$Re_o$	$Re_f$
1	0	1.6951	7.609	0.000	7.014	1025.03	1508.39
2	5	1.6951	7.609	0.401	7.014	1114.44	1508.39
3	10	1.6951	7.609	0.845	7.014	1214.29	1508.39
4	18	1.6951	7.609	1.670	7.014	1400.55	1508.39

$D_p$ ,  $N_2$  Dilution percentage;  $\varphi$ , Equivalence Ratio;  $\dot{Q}_o$ , Oxidizer Flow Rate;  $\dot{Q}_d$ , Dilution Flow Rate;  $\dot{Q}_f$ , Fuel Flow Rate;  $Re_o$ , Reynolds number of Oxidizer Inlets;  $Re_f$ , Reynolds number of Fuel Inlets.

همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است، رژیم جریان ورودی به بخش احتراق که در شکل ۳ با عنوان محل تشکیل شعله نشان داده شده است، در هر دو بخش ورودی اکسیدکننده (مخلوط اکسیژن و نیتروژن) و سوخت به بر اساس عدد رینولدز محاسبه شده به شکل آرام است.

## مبانی و روش کالیبراسیون طیف‌سنجی و شدت روشی

تابش شعله با توجه به عوامل ایجادکننده آن دارای دودسته بندی می‌باشند، تابش حرارتی و تابش شیمیایی، جهت استفاده از روش طیف‌سنجی، حذف بیشینه تابش حاصل از نورتایی شیمیایی لازم است. در شکل ۶ مقادیر پیک مربوط به نورتایی شیمیایی رادیکال‌های  $OH^*$ ،  $CH^*$ ،  $C_2^*$  است که برای رادیکال  $OH^*$  و  $CH^*$  در طول موج‌های ۳۱۰، ۴۳۱ و برای  $C_2^*$  دو طول موج ۵۱۶ و ۴۷۱ نانومتر ساطع می‌شود. انتشار پس‌زمینه‌ای برای  $CO_2^*$  در باند طول موج ۳۵۰-۶۰۰ نانومتر و برای  $H_2O^*$  باند طول موج ۹۳۳ نانومتر وجود دارد [۲۵، ۲۴]. به‌منظور بررسی شار تشعشعی شعله، از بازه ۸۵۰-۶۰۰ نانومتر استفاده شده است که به‌اندازه کافی از طول موج‌های نورتایی شیمیایی دور بوده و در محدوده تابش حرارتی قرار داشته باشد. فعالیت‌های شیمیایی  $OH^*$ ،  $CH^*$ ،  $C_2^*$  و  $H_2O^*$  در طی فرآیند احتراق و مسیرهای تولید این گونه‌ها در جدول ۳ ذکر شده است که

حاوی واکنش‌های کلیدی این رادیکال‌ها است. شدت نسبی اندازه‌گیری شده توسط طیف‌سنج دارای واحد دلخواه بی‌بعد<sup>۱</sup> است [۲۶،۲۵،۹].

جدول ۳- مسیرهای واکنش‌های شیمیایی تشکیل‌دهنده رادیکال‌های شیمیایی [۲۷،۲۵،۲۴]

Table 3- Chemical routs of formation of excited chemiluminescent species [24,25,27].

Wavelength	Reaction	Radical
310	$\text{CH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{OH}^*$	$\text{OH}^*$
431	$\text{C}_2\text{H} + \text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{CH}^*$	$\text{CH}^*$
471	$\text{CH}_2 + \text{C} \rightarrow \text{H}_2 + \text{C}_2^*$	$\text{C}_2^*$
516	$\text{C}_2\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{C}_2^*$	$\text{C}_2^*$
350-600	$\text{CO} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{CO}_2^* + \text{M}$	$\text{CO}_2^*$
933	$\text{OH}^* + \text{CH}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O}^* + \text{CH}_3^*$	$\text{H}_2\text{O}^*$

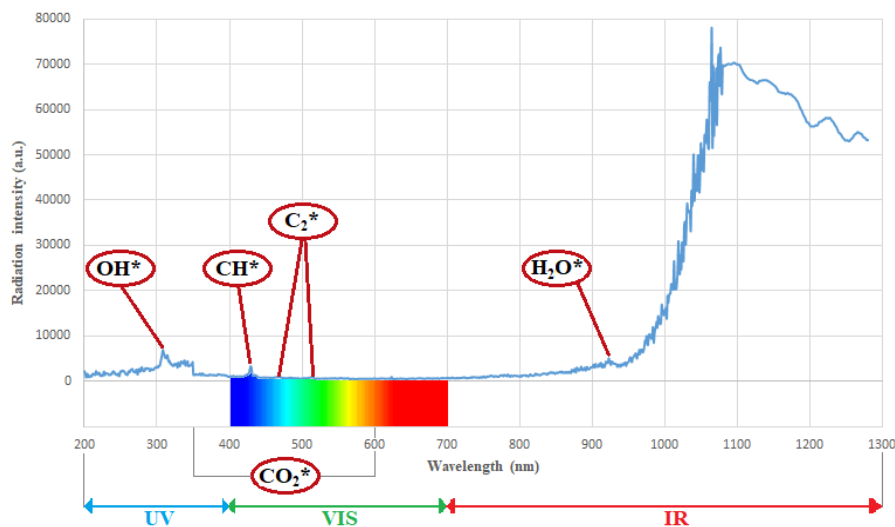


Figure 5 - Emission spectra in micro-combustion at a constant equivalence ratio of 1.69 , a constant fuel flow rate of 7.014 and a constant oxygen flow rate of 7.609 and a zero diluent flow rate.

شکل ۵- طیف انتشار در احتراق میکرو در نسبت هم ارزی ثابت ۱/۶۹، نرخ جریان سوخت ثابت ۷/۰۱۴ و نرخ جریان اکسیژن ثابت ۷/۶۰۹ و نرخ جریان رقیق‌ساز صفر

جهت استفاده از داده‌های طیف‌سنج ابتدا کالیبراسیون شدت نسبی نیاز است. در کالیبراسیون شدت نسبی، کالیبراسیون زمانی انجام می‌شود که نیاز به مقایسه‌ی شدت نسبی در یک طول موج، با شدت نسبی در طول موج دیگر وجود داشته باشد. جهت جبران اثرات مرتبط با حساسیت CCD و تأثیر فیلترها در روش طیف‌سنجی، کالیبره شدت نسبی مورد نیاز است. حس‌گر مورد استفاده در طیف‌سنج از مدل TCD1304DG ساخت شرکت توشیبا<sup>۲</sup> است [۲۸]. در تشخیص گونه‌های احتراقی نیاز به انجام این نوع کالیبراسیون وجود ندارد. چراکه قله‌ها و نقاط بیشینه بدون انجام این نوع کالیبراسیون نیز قابل بررسی و مشاهده هستند (کالیبراسیون طول موج توسط شرکت سازنده صورت گرفته است). اما برای سنجش دما به وسیله‌ی طیف‌سنج نیاز به کالیبراسیون شدت نسبی وجود دارد. کالیبراسیون شدت نسبی با یک منبع نور با طیف گسترده قابل انجام است. یک منبع نور مانند لامپ تنگستن می‌تواند برای این کار مفید باشد. طیف اندازه‌گیری شده با طیف اصلی لامپ مقایسه می‌شود و ضرایب کالیبراسیون برای هر طول موج به دست می‌آید. وجود قله در طیف منبع نور در این نوع کالیبراسیون مطلوب نیست. بهترین مرجع، منبع نوری است که یک طیف گسترده بدون قله‌های متعدد داشته باشد. برای این کار از طیف گسترده‌ی لامپ

<sup>۱</sup> arbitrary unit

<sup>۲</sup> Toshiba



تنگستن به عنوان طیف مرجع استفاده شده است. طیف لامپ تنگستن از طول موج ۳۵۰ نانومتر تا ۲۱۰۰ نانومتر انتشار دارد. شرکت سازنده طیفسنج داده‌های مربوط به طیف لامپ را جهت کالیبراسیون شدت ارائه کرده است. برای کالیبره کردن طیفسنج به طیف مرجع از ۳۵۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر نیاز است. برای اجرای کالیبراسیون باید مکان پوشگر طیفسنج نسبت به لامپ ثابت و بدون تغییر باشد. لازم است فاصله‌ی پوشگر طیفسنج و زمان نوردهی به گونه‌ای تنظیم شود که طیفسنج به حالت اشباع نرسد. زمان نوردهی در این آزمایش برابر با ۱۰۰۰۰ میلی‌ثانیه تنظیم شده است. برای ثابت نگه‌داشتن پوشگر طیفسنج از یک گیره آزمایشگاهی استفاده شده است (شکل ۸). پوشگر طیفسنج در فاصله‌ی مشخص و با زاویه‌ی عمود به سمت لامپ ثابت شده و اندازه‌گیری لازم برای کالیبراسیون صورت گرفته است. همان‌طور که در بخش اول شکل ۶ نمایش داده شده است، حساسیت CCD طیفسنج نسبت به طول موج تغییر می‌کند و در طول موج‌های بالاتر کاهش می‌یابد. داده‌های طیف کالیبره نشده طیفسنج از لامپ تنگستن در بخش دوم شکل ۶ نشان داده شده است و به وضوح مشخص است که با افزایش طول موج، طیف کالیبره نشده دریافتی از لامپ تنگستن نسبت به حالت مرجع انحراف زیادی دارد.

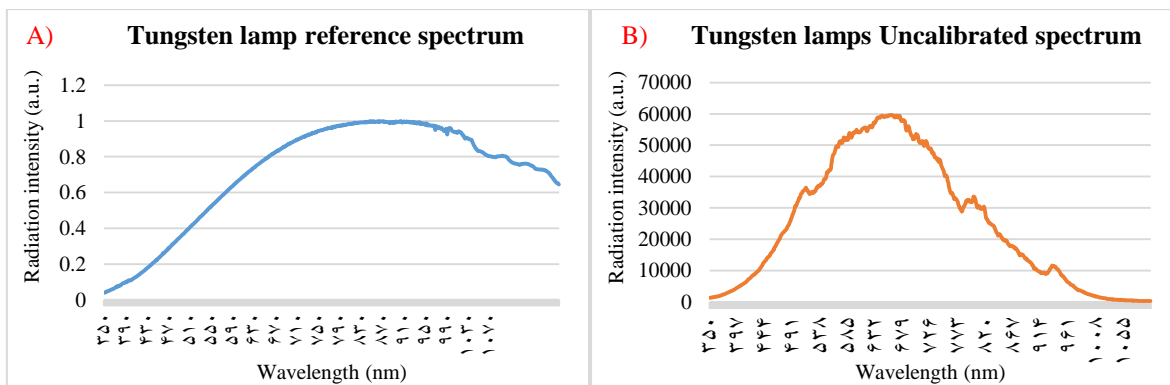


Figure 6 – A) Reference diagram of tungsten lamp from 350 to 1100 nm wavelength, B) Uncalibrated spectrometer diagrams of tungsten lamps.

شکل ۶- الف) نمودار طیف مرجع لامپ تنگستن از طول موج ۳۵۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر، ب) نمودار طیف کالیبره نشده طیفسنج از لامپ تنگستن.

برای انجام کالیبراسیون ابتدا لازم است شدت در تمام طول موج‌ها نسبت به یک طول موج خاص سنجیده شود. در طیف مرجع بالاترین شدت مربوط به طول موج ۹۰۴ نانومتر است که بر روی بخش اول شکل ۷ مقدار یک را به خود اختصاص داده است. برای انجام کالیبراسیون، ابتدا مقدار شدت دریافت شده از طیفسنج بر مقدار شدت در طول موج ۹۰۴ نانومتر تقسیم می‌شود. مجموعه‌ای از ضرایب به دست می‌آید که قابل مقایسه و تطبیق با نمودار مرجع هستند. ضرایب کالیبراسیون به گونه‌ای تعیین می‌شود که نمودار طیف دریافتی از طیفسنج منطبق بر نمودار طیف مرجع شود. در بخش اول شکل ۷ ضرایب کالیبراسیون محاسبه شده را نمایش می‌دهند. به علت پایین آمدن دقت حسگر طیفسنج در طیف‌های بالای ۹۰۰ نانومتر ضرایب کالیبراسیون بسیار بزرگ می‌شوند. این ضرایب پیش از طول موج ۹۰۰ نانومتر کوچک‌تر از ۱ هستند و با رشد انفجاری در ۱۰۰۰ نانومتر به حدود ۵ می‌رسند. در انتها برای هر طول موج یک ضریب کالیبراسیون مشخص می‌شود. در بخش دوم شکل ۷ مقایسه‌ی خروجی کالیبره شده و کالیبره نشده‌ی طیفسنج را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل نیز می‌توان متوجه شد که حساسیت حسگر با افزایش طول موج کاهش چشم‌گیری داشته است.

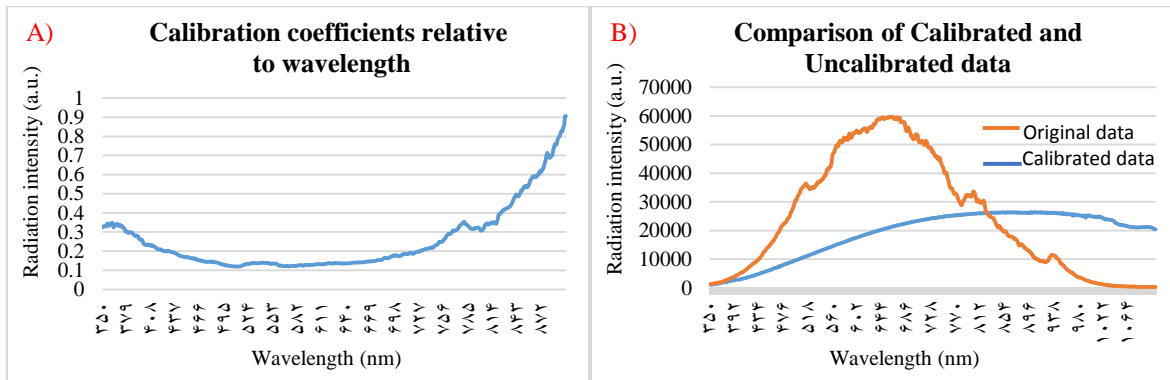


Figure 7 - A) Diagram of calibration coefficients relative to wavelength in the range of 350 to 900 nm, B) Comparison of calibrated data of tungsten lamps and uncalibrated data received from the spectrometer

شکل ۷- الف) نمودار ضرایب کالیبراسیون نسبت به طول موج در بازه ۳۵۰ تا ۹۰۰ نانومتر ب) مقایسه‌ی داده‌های کالیبره شده لامپ تنگستن ۱۰۰ وات و داده‌های کالیبره نشده دریافتی از طیف‌سنج

محاسبه دما به کمک طیف‌سنجی نیازمند پایرومتری دورنگ هست. مبنای اصلی پایرومتری دورنگ، قانون پلانک است.

این قانون رابطه‌ی میان تابش، دما و طول موج را تعریف می‌کند.

$$I(\lambda, T) = \frac{1}{\pi} \varepsilon(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (۴)$$

در رابطه‌ی (۴)  $I(\lambda, T)$  شدت تابش در طول موج  $\lambda$  و دمای  $T$  است.  $C_1$  و  $C_2$  ضرایب ثابتی هستند.  $C_1 = 2\pi h c^2$  و  $C_2 = hc/k$  که در آن  $h$  ثابت پلانک، ثابت بولتزمن و  $C$  سرعت نور است.  $\varepsilon(\lambda)$  ضریب صدور متوسط گاز در طول موج  $\lambda$  است. اگر دو طول موج  $\lambda$  و  $\lambda + \Delta\lambda$  در یک دمای ثابت در نظر گرفته شود، برای حذف اثرات فاصله‌ی پویسگر از منبع و ضریب صدور می‌توان شدت در دو طول موج متفاوت را بر هم تقسیم کرد و به رابطه‌ی بدون بعد (۵) رسید [۲۷].

$$\frac{I(\lambda, T)}{I(\lambda + \Delta\lambda, T)} = \left(\frac{\varepsilon_\lambda}{\varepsilon_{\lambda + \Delta\lambda}}\right) \frac{(\lambda + \Delta\lambda)^5}{\lambda^5} \times \exp\left(-\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda + \Delta\lambda}\right)\right) \quad (۵)$$

در رابطه‌ی (۵) اگر  $\Delta\lambda$  به قدر کافی کوچک باشد می‌توان ضریب صدور در دو طول موج را ثابت در نظر گرفت. باید توجه داشت که نمی‌توان  $\Delta\lambda$  را به هر اندازه‌ی دلخواه کوچک کرد. کوچک شدن این مقدار باعث بروز خطا در اندازه‌گیری خواهد شد. ۴۰ تا ۶۰ نانومتر می‌تواند مناسب‌ترین محدوده برای در نظر گرفتن مقدار  $\Delta\lambda$  باشد [۳۰]. ملاحظه‌ی دیگر در انتخاب  $\lambda$  که باید در نظر گرفت آن است که طول موج انتخابی نباید در محدوده‌ای باشد که قله در شدت وجود دارد. در واقع باید دور از محدوده نورتایی شیمیایی قرار داشته باشد. با حذف ضریب صدور در رابطه‌ی (۵) می‌توان آن را به شکل رابطه‌ی (۶) بازنویسی کرد [۲۹].

$$T = -C_2 A(\lambda, \lambda + \Delta\lambda) \frac{1}{\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda + \Delta\lambda}\right) / \ln \left[ \frac{I(\lambda, T)}{I(\lambda + \Delta\lambda, T)} \frac{\lambda^5}{(\lambda + \Delta\lambda)^5} \right]} \quad (۶)$$

در این معادله  $A(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$  ضریب تصحیح دما در طول موج تعیین شده است. این ضریب تصحیح با استفاده از پایرومتری به دست می‌آید. برای انجام پایرومتری دورنگی از یک شعله مشعل بنزن با سوخت متان استفاده شده است. دمای شعله‌ی متان به وسیله‌ی ترموکوپل در محلی که پویسگر طیف‌سنج اندازه‌گیری می‌کند قرار داشته و دما را اندازه‌گیری می‌کند. پویسگر طیف‌سنج نیز هم‌زمان در فاصله‌ی ثابت ۵۶ میلی‌متری از شعله قرار می‌گیرد. زمان نوردهی در این آزمایش ۱۰۰۰۰ میلی‌ثانیه بوده است. شکل ۸ محل قرارگیری ترموکوپل و پویسگر را برای اندازه‌گیری دمای شعله نمایش می‌دهد. برای افزایش

دقت داده‌های طیف‌سنج، دمای شعله ده بار با گام زمانی یک دقیقه‌ای اندازه‌گیری و ذخیره شده است. این آزمایش ۵ بار برای ۵ دمای متفاوت شعله تکرار شده است. جهت یافتن ضریب تصحیح لازم است تا نسبت شدت تابش را در دو طول موج محاسبه شود. برای محاسبه ضریب تصحیح طول موج اول را ۷۰۰ تا ۷۶۰ نانومتر در نظر گرفته شده است و طول موج دوم  $\Delta\lambda=40$  نانومتر بیشتر در نظر گرفته شده است. در نتیجه تمام داده‌های پایرومتری دورنگ با مقایسه‌ی شدت‌ها در این دو طول موج با ضریب تصحیح مربوط به آن انجام شده است. به کمک این روش یک ضریب تصحیح برای پایرومتری استخراج شده است که به جای  $A(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$  در رابطه‌ی (۶) قرار می‌گیرد. ضریب تصحیح A مربوط به رابطه‌ی (۶) از تقسیم دمای اندازه‌گیری شده با ترموکوپل بر دمای محاسبه شده با روش پایرومتری به دست آمده است. در نهایت از ضرایب تصحیح مربوط به هر طول موج میانگین گرفته شده است. برای سنجش اعتبار میانگین و پایین آوردن خطای محاسباتی، انحراف از معیار برای هر کدام از ضرایب محاسبه شده است. طول موج‌هایی که انحراف از معیار در ضرایب تصحیح آن‌ها در حدود ۰/۱ یا کمتر بوده است برای سنجش نهایی انتخاب شده‌اند. ضریب تصحیح انتخاب شده، میانگین ضرایب تصحیح محاسبه شده در پنج آزمایش است. در نهایت طول موج  $\lambda=744$  نانومتر بر اساس روش بالا انتخاب شده است. در انتها پس از اعمال ضریب تصحیح برای صحت سنجی ضریب، پنج بار دیگر آزمایش به روش بالا برای دمایی متفاوت تکرار شده با این تفاوت که این بار به روش پایرومتری نیز به کمک طیف‌سنج دما محاسبه شده و با مقدار دمای اندازه‌گیری شده با ترموکوپل مقایسه شده است؛ که بر همین اساس حداکثر درصد خطای دمایی بعد از اعمال ضرایب اصلاحی معادل حدود ۲/۴۶ درجه سانتی‌گراد است. در جدول ۴ دمای میانگین محاسبه شده و خطاها نشان داده شده است.

جدول ۴- دمای روش پایرومتری و دمای ترموکوپل قرائت شده برای آزمون‌های صحت سنجی در طول موج ۷۴۴ نانومتر

Table 4- The temperature of the pyrometric method and the temperature of the thermocouple read for validation tests at the wavelength of 744 nm

Test Number	$T_{PM}$ (°C)	$T_{TS}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)
Test 1	1140.25	1141.9	1.65
Test 2	1139.93	1132.7	-7.23
Test 3	1116.11	1120.7	4.59
Test 4	1093.30	1107.8	-1.22
Test 5	1091.52	1090.3	-1.22
Average	1116.22	1118.68	2.46

$T_{PM}$ , Temperature calculated by Pyrometric Method;  $T_{TS}$ , Thermocouple Temperature;  $\Delta T$ , The Temperature difference of the two Methods

## شدت روشنایی

در بحث سیستم‌های فتوولتائیک شدت تابش روشنایی یک مسئله مهم هست بر همین اساس باید به طول موج نور مرئی و همچنین شدت آن اهمیت داده و بر اساس روش استاندارد و بر واحد لوکس بیان نمود. برای این بحث، درک طیف سطوح نور به نام لوکس مفید است. این در شکل زیر نشان داده شده است. نور کامل خورشید اغلب بین ۱۰۰۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰ لوکس اندازه‌گیری می‌شود، یک دفتر ممکن است ۳۰۰-۵۰۰ لوکس داشته باشد و نور شمع تقریباً ۱ لوکس باشد. برخی حسگرهای نور می‌توانند تا کل این محدوده یا قسمتهایی از آن را پوشش دهند. جهت کالیبره نمودن مجموعه از یک لوکس متر مدل YK 100Lx ساخت شرکت لترون تایوان استفاده شده است، بر اساس تنظیمات اصلی این لوکس متر بر اساس نور لامپ تنگستن هست. طول موج داده‌برداری حسگر این لوکس متر حدود طول موج استاندارد برای حسگر آن ۵۶۰ نانومتر هست. جهت کالیبره نمودن و تخصیص مقدار عددی لوکس جهت طول موج ۵۶۰ نانومتری به کمک طیف‌سنج ابتدا بستری مشابه شکل زیر ایجاد شد، در این بستر بازه‌های ثابت ۲۰ الی ۱۲۰ سانتیمتری از لامپ تنگستن ۱۰۰ وات با بازه ۲۰ سانتیمتری ایجاد شد که محل‌های قرارگیری پوشگر لوکس متر خواهد بود، همچنین در فاصله ۱۲۰ سانتیمتری به شکل هم‌زمان داده‌های پوشگر طیف‌سنج و لوکس متر داده‌برداری شده است تا به کمک آن بتوان شدت تابش را در طول موج ذکر شده نسبت

به لوکس متر کالیبره نمود و نسبت آن را به دست آورد در شکل ۸ نمای شماتیک از منبع نوری نسبت به پوشگر طیف سنج و لوکس متر همراه با فواصل آزمون نشان داده شده است.

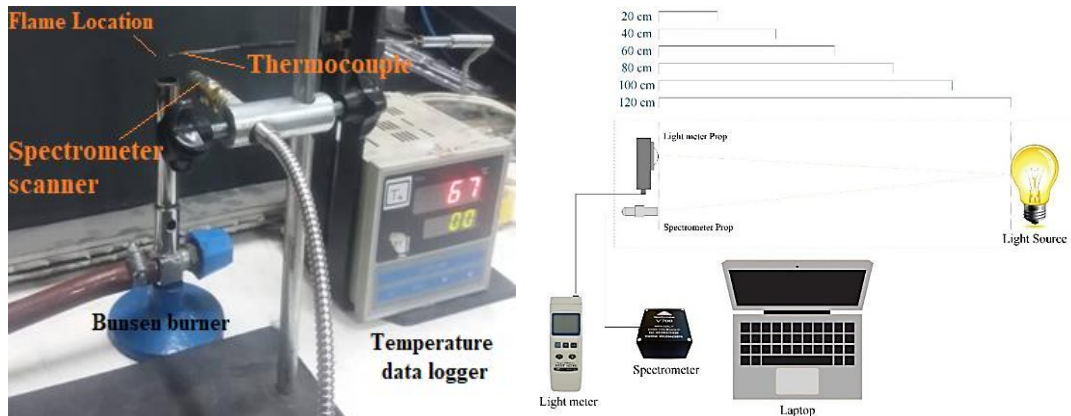


Figure 8 – A) View of a test setup of methane flame temperature measurements by two methods directly and a two-color method pyrometry for calibration. B) Schematic diagram of the location of the lux meter and the spectrometer and the test distances relative to the light source

شکل ۸- الف) نمای از مجموعه اندازه گیری دمای شعله‌ی متان به دو روش مستقیم و پایرومتری دورنگ جهت کالیبراسیون. ب) دیاگرام شماتیک قرارگیری لوکس متر و طیف سنج و فواصل مورد آزمون نسبت به منبع نوری

باید توجه داشت یکی از علل ثبت آزمایش در فواصل مختلف به دست آوردن نمودار و نحوه رفتار تابع منتسب به نسبت فاصله به لوکس برای مجموعه هست تا به کمک آن بتوان در فواصل تعیین شده برای آزمایش‌ها اصلی مقدار لوکس را مشخص نمود. بر همین اساس در شکل ۹ نمودار زمان نوردهی به شدت تابش برای لامپ مرجع در فاصله ۱۲۰ سانتی متری نشان داده شده است، در این حالت معادله خط به دست آمده برابر رابطه‌ی (۷) زیر است:

$$L_{et} = 44.09L_0 + 2.5287 \quad (7)$$

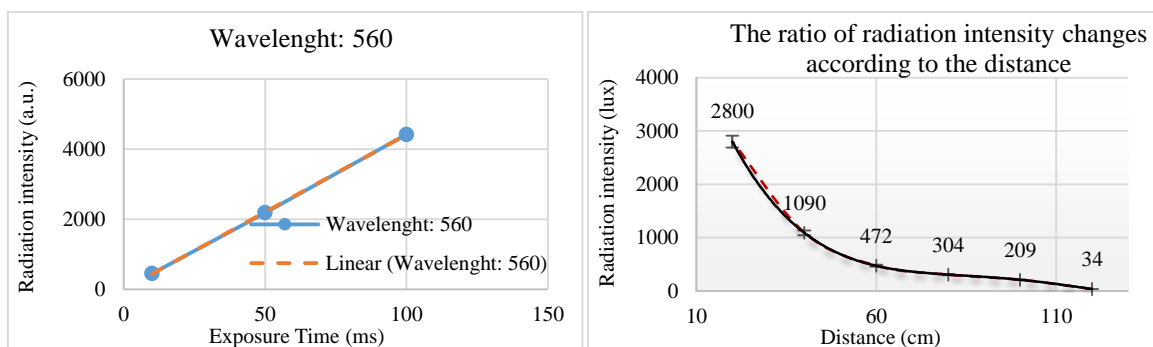


Figure 9- A) The graph of the exposure time to the intensity of radiation for the reference lamp at a distance of 120 cm from the lamp 100 Watt. B) Diagram of the ratio of radiation intensity changes according to the distance compared to the lamp 100 Watt.

شکل ۹- الف) نمودار زمان نوردهی به شدت تابش برای لامپ مرجع در فاصله ۱۲۰ سانتی متری از لامپ ۱۰۰ وات. ب) نمودار نسبت تغییرات شدت تابش بر حسب فاصله نسبت به لامپ ۱۰۰ وات

بر اساس نمودار به دست آمده از رابطه ۷ می‌توان مقدار لوکس را بر اساس زمان نوردهی به دست آورد و با تقسیم رابطه به میزان لوکس ثبت شده توسط لوکس متر جدول ۵ را به دست آورد.

جدول ۵- جدول مقدار لوکس را بر اساس زمان نوردی

Table 5- Lux value table based on exposure time

Test Number	Exposure Time (ms)	Radiation Intensity (a.u.)	Light Intensity (lux)
1	10	455.101	0.68
2	50	2186.016	3.4
3	100	4420.863	6.8
4	500	22047.528	34
5	10000	440902.529	680

همچنین شدت، شدت تابش دریافتی مرتبط بافاصله از جسم تابش دهنده هست، بر همین اساس با انجام آزمون زیر داده‌های زیر بر اساس فواصل مختلف نسبت به لامپ مرجع به دست آمده است و رابطه‌ی (۸) بر پایه آن استخراج شده است که بر اساس آن می‌توان بر اساس فاصله میزان شدت تابش و لوکس را تعیین نمود.

$$L_d = 0.0000636719L_{et}^4 - 0.0259195602L_{et}^3 + 3.8343576389L_{et}^2 - 250.5785052907L_{et} + 6,474.8333333302 \quad (8)$$

بر اساس رابطه‌ی (۸) به دست آمده میزان شدت روشنایی در فاصله پوششگر استاندارد ۵/۶ سانتی متری این آزمون‌ها برابر هست با ۵۱۸۷/۳۵ لوکس بر اساس میزان داده برداری ۲ بار در هر ثانیه است.

## نتایج آزمون‌ها

در شکل ۱۲ نمایی از شعله‌های میکرو به ترتیب در حالت رقیق‌سازی ۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۸٪ در زمان ۹۰۰ ثانیه از شروع آزمون نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل نمایان است و در ادامه بیشتر به بررسی آن پرداخته خواهد شد، با افزایش نسبت رقیق‌سازی به‌طور کلی افزایش طول شعله مشاهده می‌شود. از علت‌های افزایش طول شعله می‌توان به اثر خنک‌کنندگی رقیق‌ساز که باعث افزایش نیاز به زمان اقامت رادیکال‌ها جهت تکمیل واکنش است اشاره کرد و همچنین باید توجه داشت که با افزایش نسبت رقیق‌سازی در آزمون‌های صورت گرفته به علت ثابت بودن دبی سوخت و اکسیژن سرعت اولیه مخلوط نیز افزایش می‌یابد که این دو از علت‌های اصلی افزایش طول شعله می‌باشند.

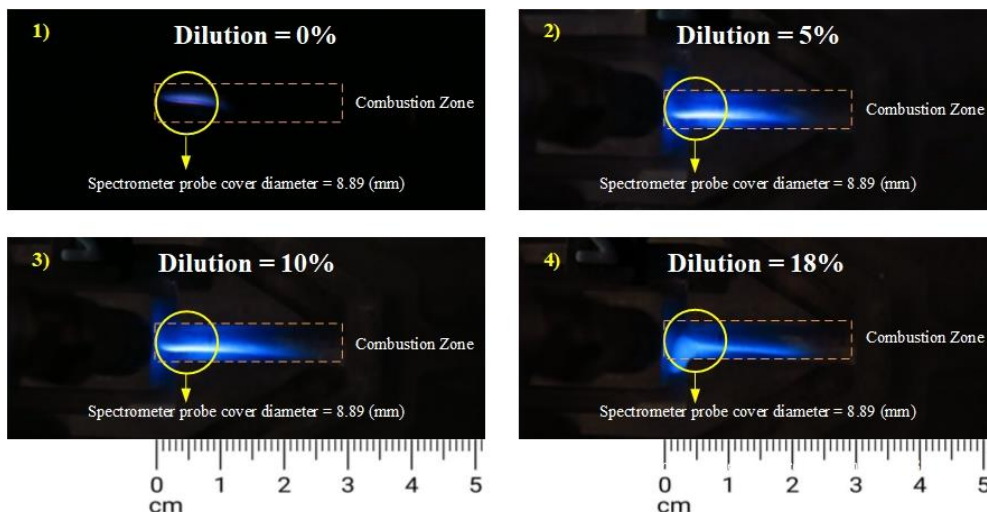


Figure 10 - View flame in 900 seconds for four modes without dilution (1), with the dilution of 5% (2), with the dilution of 10% (3), with the dilution of 18% and the amount of coverage of the spectrometer scanner from the flame surface.

شکل ۱۰- 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 ۱۸ درصد (۴) و میزان سطح پوشش پوششگر طیف‌سنج از سطح شعله

## مقایسه‌ی طول شعله

طول شعله یکی از پارامترهای مهم است طول شعله هم‌زمان با ذخیره‌ی داده‌های طیف‌سنجی هر ۱۸۰ ثانیه ثبت شده است. شکل ۹ طول شعله را در نسبت رقیق‌سازی‌های مختلف نمایش می‌دهد. با بررسی نمودار شکل ۱۱ می‌توان بیان داشت که با شروع رقیق‌سازی طول شعله به‌طور کلی افزایش می‌یابد دلیل این رفتار شعله را باید در دو عامل اصلی جستجو کرد، اولین دلیل آن به علت اضافه شدن رقیق‌ساز، دبی مخلوط به طبع آن سرعت مخلوط در محفظه احتراق زیاد می‌شود، دلیل دوم به علت اثر رقیق‌ساز بوده که باعث می‌شود سرعت واکنش کاهش یافته و به همین دلیل و با توجه به زمان موردنیاز برای تکمیل واکنش احتراقی، طول شعله افزایش یابد. ولی نسبت‌های مختلف رقیق‌سازی دارای طول شعله نزدیک به هم است، در ادامه با گرم شدن محفظه و در طول زمان بر اساس یک‌روند کلی، در همه حالت‌ها طول شعله و تثبیت شدن طول شعله بر اساس یکنواخت شدن دمای محفظه کاهش جزئی یافته است. البته این موضع یک دلیل دیگر داشته و آن‌هم تشکیل قطرات آب در مقاطع خروجی محفظه هست که به شکل آرام و در طول زمان تشکیل شده و خود را نشان می‌دهد. بخشی از این مهم به دلیل تحت تأثیر قرار گرفتن جریان و شعله به علت تغییر سطح مقطع کانال خروجی در اثر تشکیل قطرات آب درون محفظه خواهد بود و باید در تفسیر و صحبت در مورد طول شعله این اتفاق را مدنظر قرارداد.

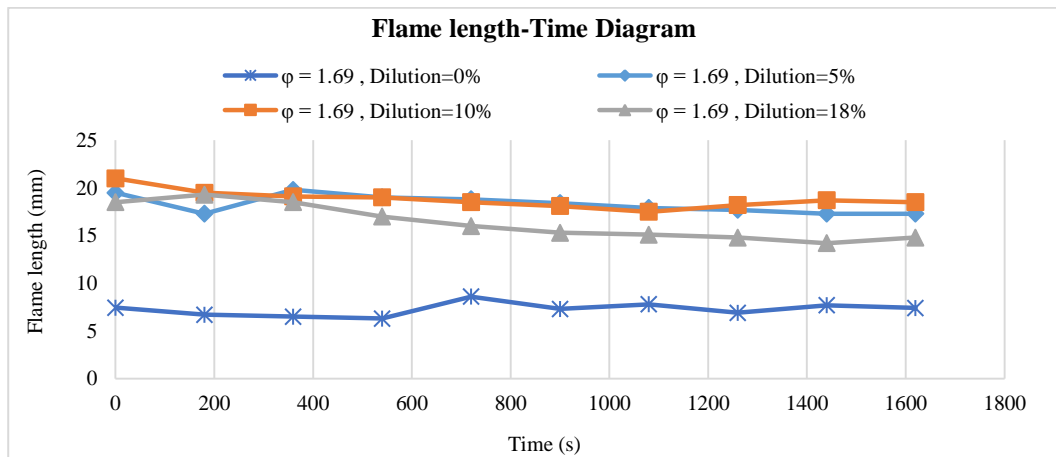


Figure 11 - Flame length diagram at different times for various dilutions rates.

شکل ۱۱- نمودار طول شعله در زمان‌های مختلف برای نسبت رقیق‌سازی‌های مختلف

## بررسی رادیکال‌ها

در بررسی رادیکال‌ها که در ادامه بدان پرداخته خواهد شد، باید توجه داشت که با توجه به طول شعله و میزان فضایی که پوششگر طیف‌سنج با توجه به موقعیت آن قادر به پوشش هست. نمی‌توان در مورد روند کلی احتراق صحبت نمود، مخصوصاً در حالت رقیق‌سازی که به علت افزایش طول شعله ناحیه کمتری از شعله در معرض داده‌برداری قرار می‌گیرد. با توجه به موضوع این مطالعه که بررسی اثر رقیق‌ساز  $N_2$  در احتراق میکرو متان-اکسیژن است. ابتدا باید نگاهی به واکنش‌ها و اثر ورود نیتروژن به‌عنوان رقیق‌ساز به احتراق داشت. در احتراق سوخت‌های فاقد ترکیبات نیتروژنی،  $NO_x$  از طریق مکانیسم‌های حرارتی و سریع تشکیل می‌شود. تشکیل  $NO_x$  حرارتی از طریق مکانیسم توسعه‌یافته زلدویچ<sup>۱</sup> صورت می‌گیرد:



<sup>1</sup> Zeldovich



واکنش (۹) کنترل کننده میزان تشکیل  $NO_x$  است، از آنجایی که واکنش (۹) به دلیل انرژی فعال سازی بالا به شدت وابسته به دما است، تشکیل  $NO_x$  حرارتی تنها در دماهای بالا قابل توجه است. تشکیل  $NO_x$  سریع در شعله های هیدروکربنی اساساً توسط یک توالی واکنشی که توسط میلر و بومن [۳۱] به شرح زیر توصیف شده است، تشکیل می شود:



با دقت به دو واکنش (۱۱) و (۱۶) دریافته می شود که این دو واکنش یکسان است ولی به دلیل عدم امکان تشخیص انتشار خودبه خود  $NO$  شعله های سوخت های فاقد ترکیبات نیتروژنی، نیاز به یافتن شاخص هایی برای تشکیل آن در چنین شعله هایی وجود دارد. در مورد مکانیسم زلدویچ، رادیکال  $OH^*$  تنها نشانگر  $NO_x$  ممکن بر اساس انتشار خود به خودی است. همچنین بر اساس مکانیسم سریع [۳۲] از طریق واکنش (۱۲) که شامل رادیکال  $CH^*$  است آغاز می شود. بدیهی است که انتشار خود به خودی آن به عنوان یک نشانگر  $NO_x$  سریع در نظر گرفته شود. دیگر شاخص احتمالی مکانیسم سریع، واکنش رادیکال  $OH^*$  (۱۱) است که با مکانیسم حرارتی مشترک است؛ بنابراین انتشار خودبه خود رادیکال  $OH^*$  و هر دو رادیکال  $OH^*$  و  $CH^*$  به ترتیب از طریق مکانیسم های حرارتی و سریع به تشکیل  $NO_x$  مرتبط هستند [۳۳].

شکل ۱۲ میزان تابش رادیکال  $OH^*$  در آزمایش ها را نمایش می دهد. همان گونه که در بالا ذکر شد رادیکال  $OH^*$  به عنوان نشانگری از میزان گرمای آزاد شده در احتراق شناخته می شود [۳۴]. شعله می کرو تشکیل شده با نسبت هم آرزوی ۱،۶۹ است، همان گونه که از بخش اول شکل ۱۲ مشخص است، در حالت بدون رقیق سازی با نیتروژن در طول زمان و با همگن شدن دما در محفظه آزمایش و افزایش حالت پیش گرم شدن، شدت رادیکال  $OH^*$  در بخش ابتدایی و مرکزی شعله که مورد بررسی بوده است، کاهش یافته است. ولی در حالت رقیق سازی و حضور  $N_2$ ، شدت رادیکال  $OH^*$  افزایش یافته است که این مهم را بتوان به علت تغییر طول شعله و تغییر روند مکانیزم های درختی واکنش که در بالا توضیح داده شد، نسبت داد. در ادامه با بررسی سایر رادیکال ها تصویر و توضیح واضح تری می توان بیان نمود؛ باید توجه داشت این پژوهش به شکل تجربی بوده و تحلیل و تشریح جامع عوامل و علت وقوع بسیاری از پدیده ها با پژوهش های تکمیلی عددی و آزمایشگاهی بیشتر ممکن خواهد بود.

در بخش دوم نمودار شکل ۱۲ تفاوت های و تأثیر رقیق سازی را بر روی شدت تابش رادیکال  $OH^*$  در زمان شروع داده برداری در آزمایش را نشان می دهد. علت انتخاب زمان ابتدایی به علت عدم تشکیل آب در کانال های عبوری گازها و تأثیر و همچنین یکی بودن دمای محفظه در دمای شروع داده برداری (۵۰ درجه سانتی گراد) هست؛ و بدین شکل می توان روند تغییرات را در حالت هماهنگ تر و بدون تأثیر دمای دیواره و یا مسدودی کانال های خروجی گازهای حاصل از احتراق به علت سرد شدن گازها و تشکیل قطرات آب نشان داده و بررسی نمود. همان گونه که در شکل ۱۲ نمایان است با افزایش نسبت رقیق سازی روند کلی در جهت کاهش سطح تابش و به طبع آن تولید رادیکال  $OH^*$  در مقطع اندازه گیری است.

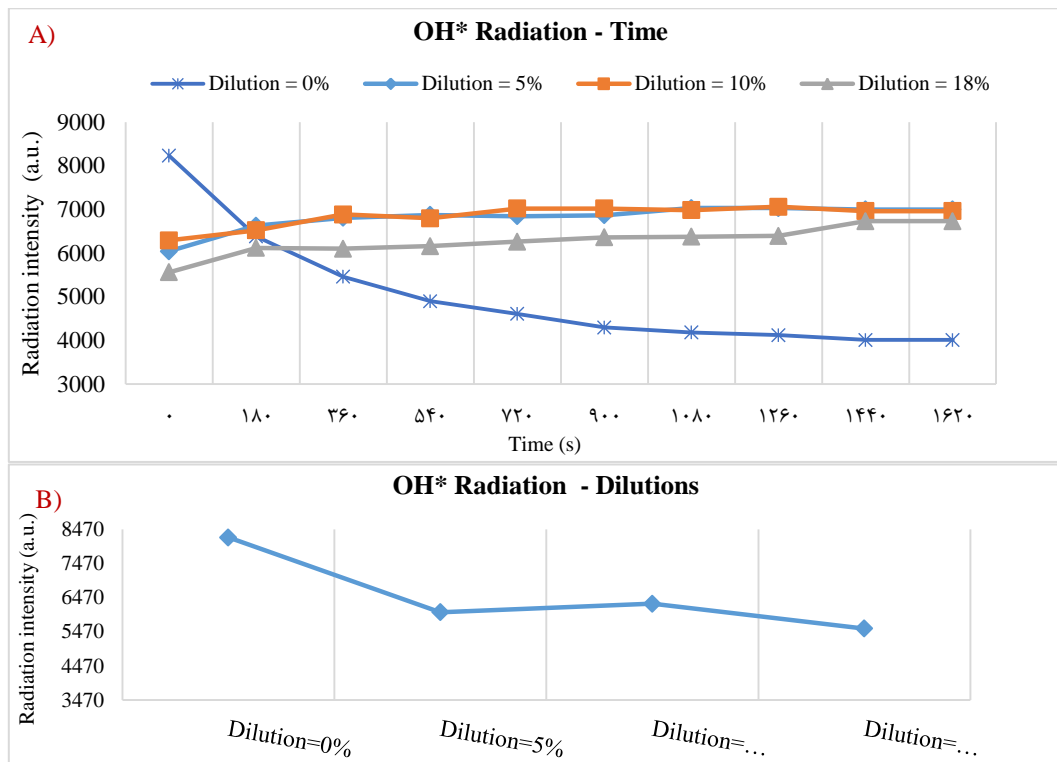


Figure 12 - A) Comparison of OH\* radical radiation in the ratio of different dilutions, B) Comparison of OH\* radiation intensity in the different dilutions percentage at the beginning of the tests.

شکل ۱۲- A) مقایسه‌ی تابش رادیکال OH\* در نسبت رقیق‌سازی‌های مختلف، B) مقایسه‌ی شدت تابش OH\* در درصد رقیق‌سازی‌های مختلف در ابتدای آزمون‌ها

رادیکال‌های OH\* و CH\* به‌عنوان نشانگر رهاسازی گرما برای احتراق متان در حالت غیر پیش آمیخته می‌باشند [۳۵]. همچنین تابش گونه‌ی رادیکالی CH\* نیز متأثر از نسبت هم ارزی محلی و فشار است [۳۰]. نمودار اول شکل ۱۳ میزان تابش رادیکال CH\* را نمایش می‌دهد. میزان تابش این رادیکال در هر سه آزمایش همراه با رقیق‌ساز با افزایش اندک همراه است. ولی همچون رفتار رادیکال OH\* در گذر زمان کاهش غلظت رادیکال CH\* مشاهده می‌شود. افزایش دما محفظه در طول زمان در حالت رقیق‌سازی مطابق با کارکرد و تعریف رادیکال CH\* هست که بیانگر و نماینده میزان انرژی آزاد شده است، ولی در حالت بدون رقیق‌ساز این حالت افت میزان غلظت این رادیکال را نشان می‌دهد که باید با در نظر گرفتن سایر پارامترها به بررسی و تحلیل دقیق‌تر این موضوع پرداخت که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. همان‌طور که در نمودار دوم شکل ۱۳ دیده می‌شود با تغییرات نسبت رقیق‌سازی، تابش گونه‌ی CH\* (زمان ابتدایی داده‌برداری و دمای اولیه ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد) نیز تغییر می‌کند؛ و این تغییر با افزایش نسبت رقیق‌سازی همراه با کاهش این‌گونه در سطح مقطع اندازه‌گیری شده؛ که خود بیانگر نقش رقیق‌ساز در کاهش این رادیکال و گرمای آزاد شده در ناحیه ابتدایی اندازه‌گیری شده است.



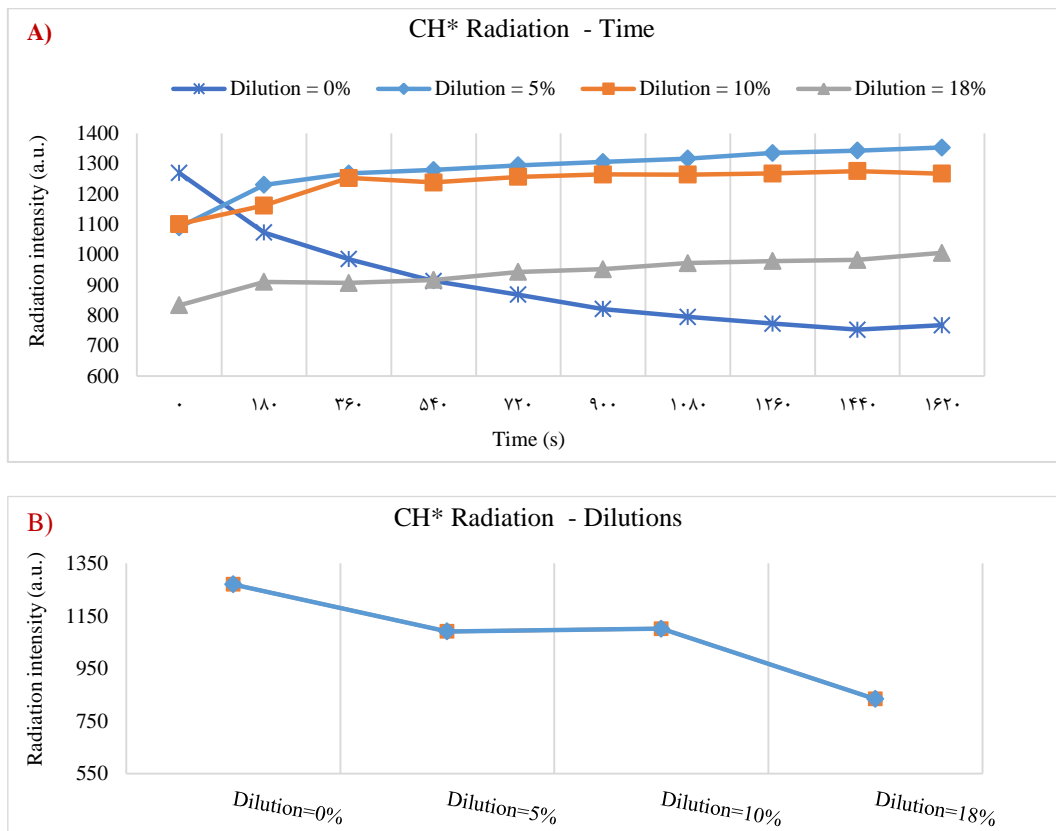


Figure 13 - A) Comparison of CH\* radical radiation in the ratio of different dilutions, B) Comparison of CH\* radiation intensity in the different dilutions percentage at the beginning of the tests

شکل ۱۳- A) مقایسه‌ی تابش رادیکال CH\* در نسبت رقیق‌سازی‌های مختلف، B) مقایسه‌ی شدت تابش CH\* در درصد رقیق‌سازی‌های مختلف در ابتدای آزمون‌ها

در نمودار اول شکل ۱۴، نمودار مقایسه‌ی تابش رادیکال C<sub>2</sub>\* در آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد. نمودار تغییرات شدت تابش C<sub>2</sub>\* مطابق با تغییرات رادیکال‌های OH\* و CH\* هست. در این نمودار شدت تغییرات در حالت وجود رقیق‌ساز و بدون وجود رقیق‌ساز نمایان است؛ که در حالت بدون رقیق‌ساز کاهش این رادیکال در طول زمان مشاهده شده است ولی در حالت رقیق‌ساز به گذشت زمان افزایش نسبت این رادیکال مشاهده شده است، که خود تأثیر رقیق‌ساز در تغییر در روند احتراق و محصولات احتراقی را نشان می‌دهد. این مهم به این معنی هست که اثر افزودن رقیق‌ساز باعث افزایش هیدروکربن‌های نسوخته و دوده هست. همچنین با توجه به طول موج رادیکال C<sub>2</sub>\* در محدوده طول موج نور مرئی هست، افزایش این رادیکال به معنی روشن‌تر شدن شعله هست که این مهم نیز در آزمایش‌ها همانند شکل ۱۰ نمایان بوده است؛ که در نمودار دوم شکل ۱۴ (زمان ابتدایی داده‌برداری و دمای اولیه ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد) نحوه تغییرات و شدت آن در نسبت رقیق‌سازی‌های مختلف نیز نشان داده شده است؛ که همان‌گونه که در شکل مشخص است، بیشترین حالت تابش رادیکال C<sub>2</sub>\* در نسبت رقیق‌سازی ۱۰ درصد بوده و این مهم با شدت تابش و روشنایی آن در که در شکل ۱۰ نیز نمایش داده شده است مطابق هست.

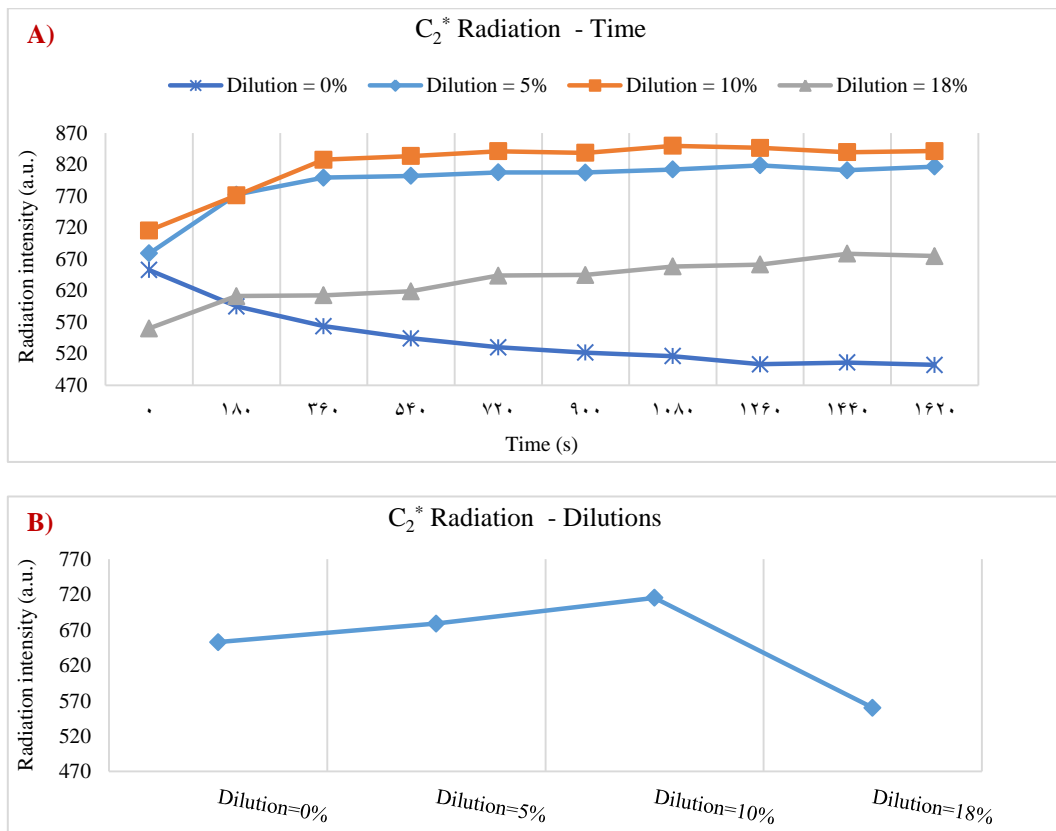
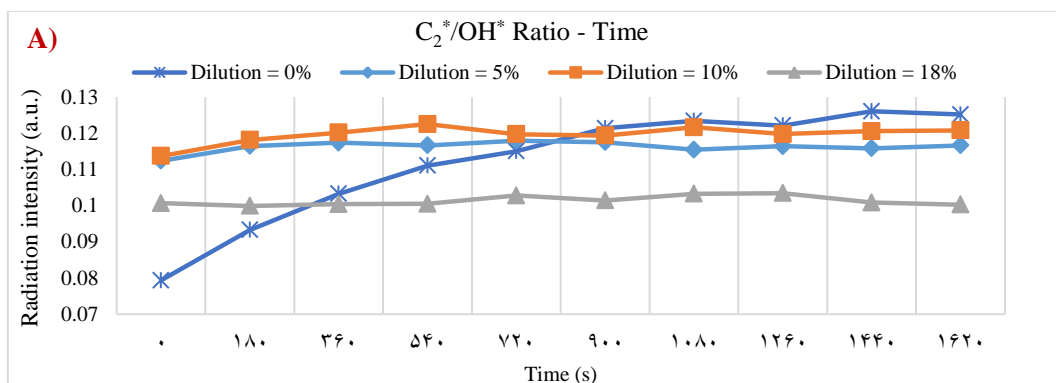


Figure 14 - A) Comparison of C<sub>2</sub>\* radical radiation in the ratio of different dilutions, (B) Comparison of C<sub>2</sub>\* radiation intensity in the different dilutions percentage at the beginning of the tests.

شکل ۱۴ - A) مقایسه‌ی تابش رادیکال C<sub>2</sub>\* در نسبت رقیق‌سازی‌های مختلف، (B) مقایسه‌ی شدت تابش C<sub>2</sub>\* در درصد رقیق‌سازی‌های مختلف در ابتدای آزمون‌ها.

نمودار نسبت C<sub>2</sub>\* / OH\* حساس‌ترین نمودار نسبت به نسبت هم‌ارزی هست و برای بررسی نسبت هم‌ارزی موضعی شعله نیز استفاده می‌شود [۳۶]. همچنین نمودارهای نسبت CH\* / C<sub>2</sub>\* و C<sub>2</sub>\* / OH\* برای یافتن نقطه‌ی استوکیومتری مناسب هستند [۳۰]. ولی در این آزمایش با شرایط نسبت هم‌ارزی ثابت تحقیق صورت گرفته است بنابر همین حالت تغییرات نسبت C<sub>2</sub>\* / OH\* و نسبت CH\* / C<sub>2</sub>\* که در نمودارهای شکل ۱۵ نشان داده شده است، یک‌روند ثابت را طی می‌کند، البته این مهم برای حالت رقیق‌شده با نیتروژن بیشتر صادق است و تغییرات و افزایش نسبت C<sub>2</sub>\* / OH\* را در حالت رقیق‌ساز صفر درصد مشاهده شده است.



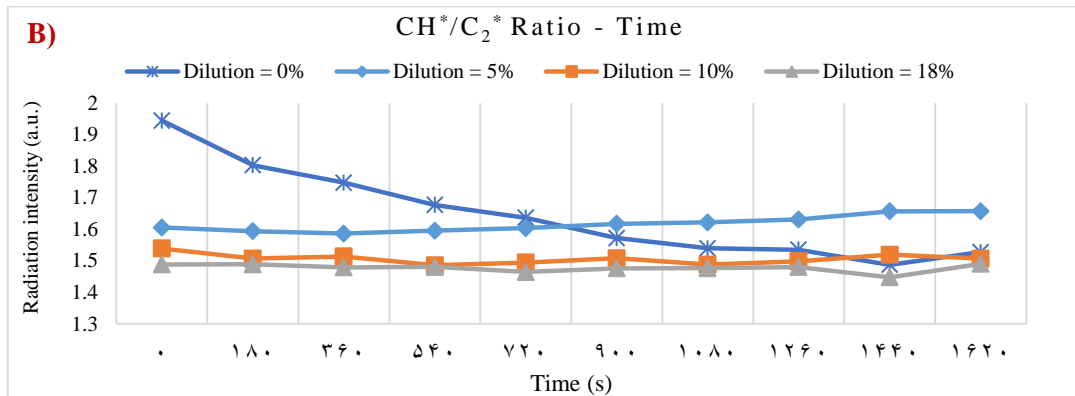


Figure 14- A)  $C_2^*/OH^*$  ratio diagram in reactions, (B)  $CH^*/C_2^*$  ratio diagram in reactions

شکل ۱۵- (A) نمودار نسبت  $C_2^*/OH^*$  در واکنش‌ها، (B) نمودار نسبت  $CH^*/C_2^*$  در واکنش‌ها.

بر اساس کارهای پانوتسوس و همکاران [۳۵] نشان داده شد که آزاد شدن گرما با رادیکال  $CH^*$  نشان داده می‌شود و نسبت  $OH^*/CH^*$  یکی از ویژگی‌های نوع شعله است و با نسبت هم‌ارزی شعله مرتبط است. و این نسبت می‌تواند نشانگر خوبی برای تعیین نسبت هم‌ارزی موضعی شعله در ناحیه واکنشی شعله باشد [۳۶]. در نتیجه در این تحقیق با توجه به ثابت بودن نسبت هم‌ارزی ثابت در تغییرات در طول زمان در این نسبت مشاهده شده است، با نگاهی دقیق‌تر به نمودار شکل ۱۶ با افزایش نسبت رقیق‌سازی نیتروژن افزایش نسبت شدت وجود رادیکال‌های  $OH^*/CH^*$  در سطح مقطع اندازه‌گیری شده دیده شده است. ولی در حالت بدون رقیق‌سازی با افزایش زمان و با توجه به این مهم که تقریباً پوششگر طیف‌سنج کل طول شعله را پوشش داده است، می‌توان روند کاهش این نسبت را مشاهده کرد و علت این اتفاق را تأثیر پیش‌گرمایش و افزایش دمای گازهای ورودی دانست.

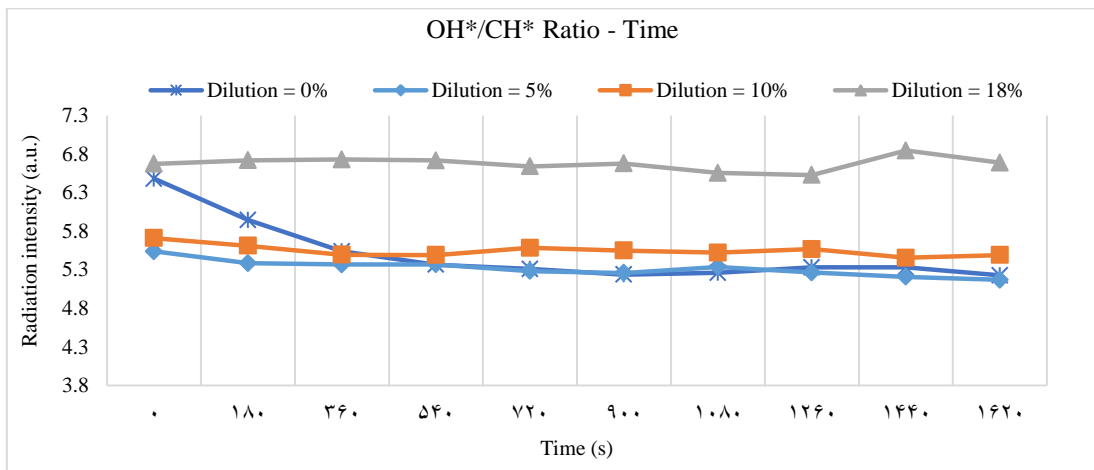


Figure 16 –  $OH^*/CH^*$  diagram for different dilution ratios.

شکل ۱۶- نمودار  $OH^*/CH^*$  برای نسبت رقیق‌سازی‌های مختلف

شکل ۱۷ نمودار تابش گونه‌ی  $H_2O^*$  را نمایش می‌دهد. این گونه یکی از گونه‌های تکمیل‌کننده و پایانی احتراق محسوب می‌شود و میزان تابش آن نمایانگر کامل‌تر بودن احتراق است [۳۵]. به تبع آن همان‌طور که در نمودار شکل ۱۷ نیز نمایان است با افزایش نسبت رقیق‌سازی نیتروژن کاهش شدت تابش  $H_2O^*$  در مقطع اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود 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 با توجه 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 رادیکال‌های آب در ادامه شعله و خارج از سطح اندازه‌گیری شده شکل خواهند گرفت. البته در تمامی نمودارها و در زمان ۱۴۴۰ ثانیه یک ناهمگونی در داده‌ها برای کلیه حالت‌ها مشاهده می‌شود که شاید بتوان با این اتفاق را به تغییر در نمودار  $OH^*/CH^*$  (نمودار شکل ۱۶) و محدود پوششی شعاع پوششگر طیف‌سنج در این زمان مرتبط دانست.

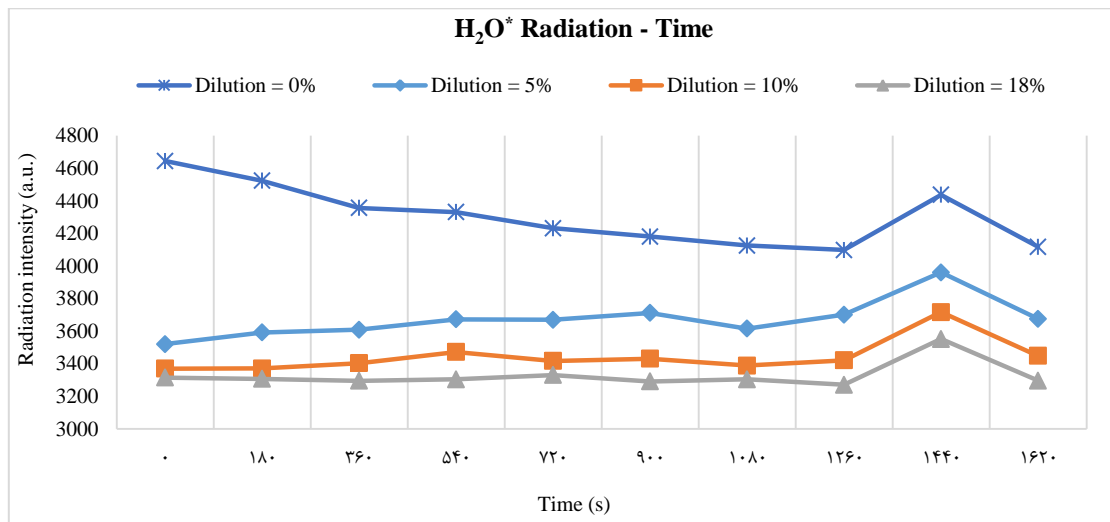


Figure 17 - H<sub>2</sub>O\* diagram for different dilution ratios

شکل ۱۷- نمودار H<sub>2</sub>O\* برای نسبت رقیق‌سازی‌های مختلف

شکل ۱۸ نمودار طیف تابش CO<sub>2</sub>\* در آزمایش‌های مختلف نمایش می‌دهد. رادیکال CO<sub>2</sub>\* به صورت یک طیف از طول موج ۳۵۰ تا ۶۰۰ نانومتر نورتابی شیمیایی دارد. تابش رادیکال‌های C<sub>2</sub>\* و CH\* نیز با طیف CO<sub>2</sub>\* هم‌پوشانی دارد. با توجه به نمودارها بیشترین تغییر و کاهش در تابش CO<sub>2</sub>\* مربوط به شعله با نسبت رقیق‌سازی ۵ درصد است و با افزایش نسبت رقیق‌سازی کاهش شدت تابش CO<sub>2</sub>\* مشاهده شده است. تابش این‌گونه یک معیار مهم در سنجش حرارت آزاد شده محسوب می‌شود [۳۰]. 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 است. حالت بدون رقیق‌سازی شرایط نزدیک به شرایط رقیق‌سازی ۱۰ درصد را دارا است. البته باید به این مهم توجه کرد که این تغییرات و تفسیر نتایج در مورد CO<sub>2</sub>\* در مقطع اندازه‌گیری شده هست.

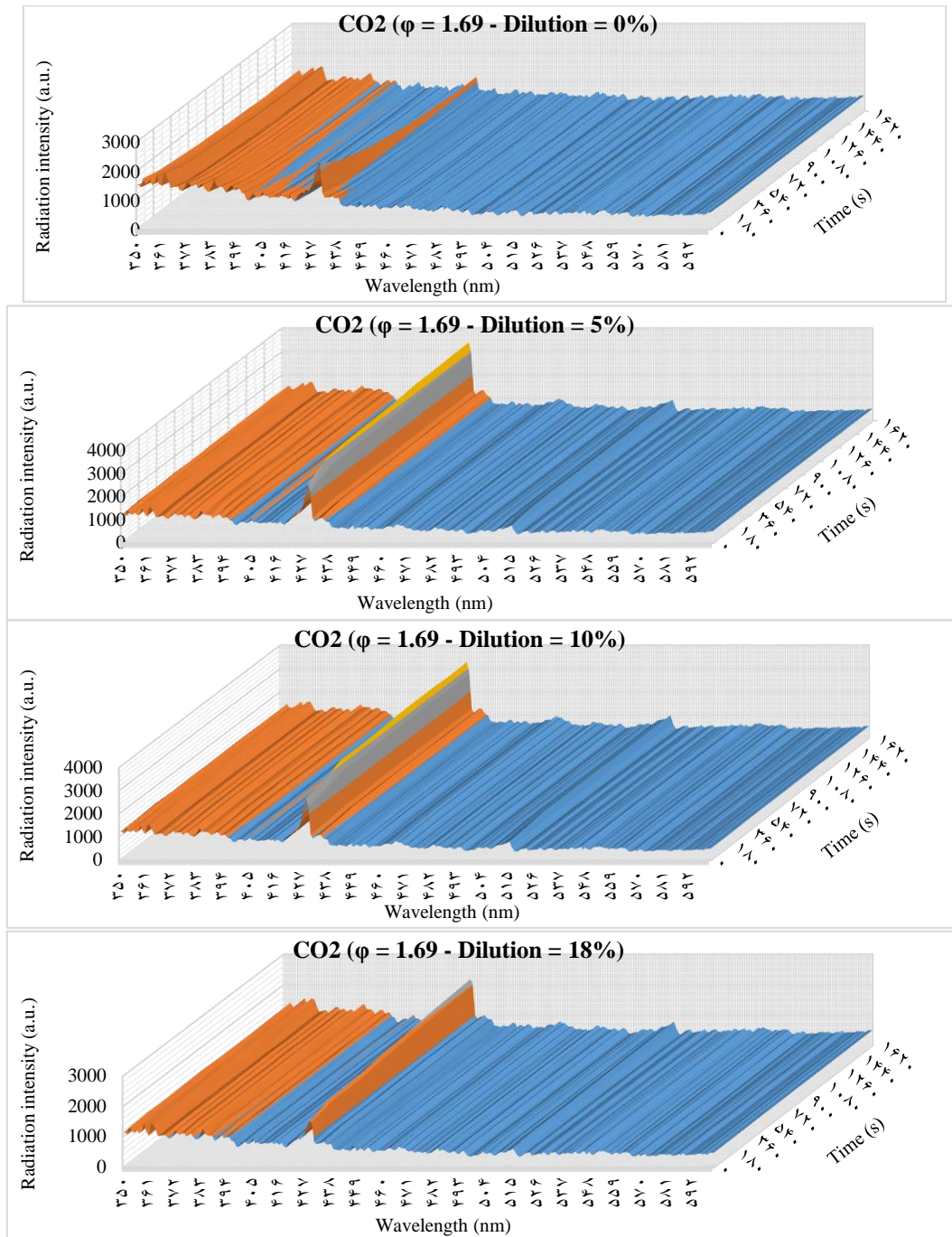


Figure 18 - CO<sub>2</sub> radical radiation spectrum for different dilution ratios  
شکل ۱۸- طیف تابش رادیکال CO<sub>2</sub> برای نسبت رقیق‌سازی‌های مختلف

### بررسی دمای شعله

شکل ۱۹ دمای شعله نسبت به درصد 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. چراکه 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 این‌گونه بیان داشت با افزایش نسبت رقیق‌سازی، در مقطع ابتدایی شعله افزایش دما مشاهده می‌شود. ولی این افزایش میزان چندان زیادی نبوده و به‌طور کلی می‌توان تأثیر رقیق‌سازی را بر روی مقطع ابتدایی شعله و ناحیه پوششی از شعله حداقل دانست. این حداقل تأثیر به شکل افزایش دماست، البته افزایش رقیق‌سازی به‌طور کلی باعث کاهش دمای شعله می‌شود ولی در مقطع اندازه‌گیری شده این اصل کلی دیده نشده و تأثیر معکوس دارد، باید توجه داشت که این بیان باید در حالت کلی و بررسی تمام مقطع شعله بیان شود.

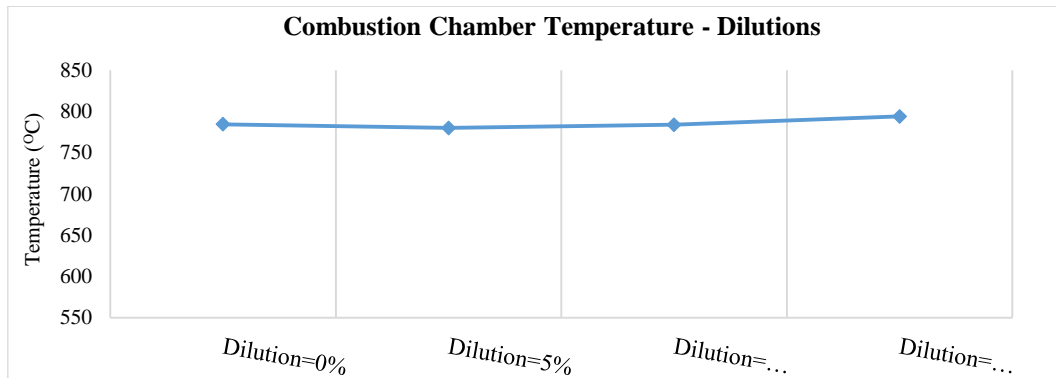


Figure 19 - Combustion chamber temperature diagram relative to dilution percentage

شکل ۱۹ - نمودار دمای محفظه احتراق نسبت به درصد رقیق‌سازی

### دمای شعله در گذر زمان

همان‌طور که اشاره شد به‌وسیله‌ی یک ترموکوپل، دمای زیر محفظه‌ی احتراق اندازه‌گیری و ثبت شده است. دمای اولیه جهت شروع اندازه‌گیری‌ها در تمام آزمایش‌ها  $50 \pm 4$  درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. شکل ۲۰ نمودار تغییرات دمای محفظه‌ی احتراق برحسب زمان را در آزمایش‌های مختلف نمایش می‌دهد. همان‌طور که در قبل بیان شد تابش رادیکال‌های  $CO_2^*$  و  $OH^*$  بیانگر خوبی از حرارت آزاد شده در اثر احتراق هستند که در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۶ نشان داده شده‌اند. در طول زمان محفظه احتراق در اثر احتراق میکرو و انتقال حرارت گازهای خروجی و به کمک رسانش در حال گرم شدن و همگرا شدن دمای آن در کل محفظه است در ادامه با توجه به شکل و ساختار محفظه‌ی احتراق موردنظر، این افزایش دما به‌منزله‌ی پیش گرم کردن سوخت و اکسیژن است.

بر اساس اصل کلی در رقیق‌سازی مخلوط متان - اکسیژن افزایش رقیق‌سازی باعث کاهش دمای شعله می‌شود، بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش برای رقیق‌سازی ۵ و ۱۰ درصد کمی عدم سازگاری مشاهده می‌شود که می‌تواند به‌علت این مهم باشد که دمای گزارش شده همان‌گونه که در بالا ذکر شده تنها در بخش ابتدایی شعله اندازه‌گیری شده و امکان پوشش کل طول شعله میسر نبوده است. البته با گذر زمان روند هم‌گرایی دمایی و شرایط ایجابی برای اصل فوق بیشتر شده و برای درصدهای مختلف رقیق‌سازی هم‌گرایی بیشتری را برای اصل فوق مشاهده شده. نکته قابل توجه در این حالت بالاتر بودن دمای نهایی محفظه در حالت رقیق‌ساز ۱۰ و ۵ درصد است، البته این حالت به‌علت عدم همگرا شدن نهایی و دمای محفظه در حالت غیر رقیق‌ساز است 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 انتظارات نیز همخوانی دارد. در شکل ۲۰ دمای زیر شعله در محفظه احتراق نسبت به زمان نشان داده شده است.

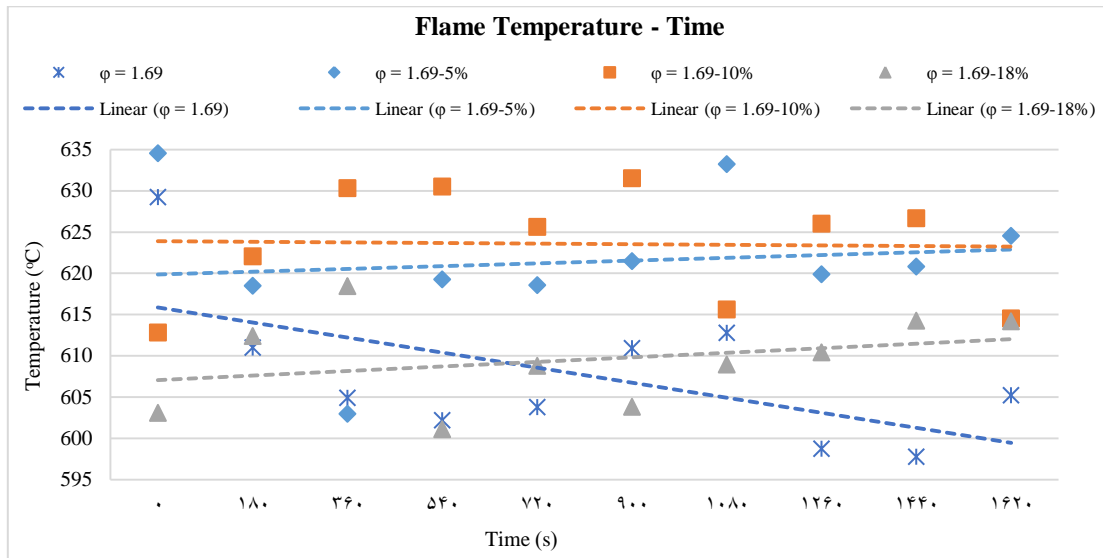


Figure 20 - Comparison of flame temperature changes over the test time for different dilution ratios

شکل ۲۰- مقایسه‌ی تغییرات دمای شعله در طول زمان آزمون‌ها برای نسبت رقیق‌سازی‌های مختلف

## شدت روشنایی

در شکل ۲۱ شدت روشنایی برحسب لوکس را بر اساس زمان نشان می‌دهد، بر اساس شکل ۲۱ تغییرات شدت تابش در حالت رقیق‌سازی وابستگی افزایشی کمی داشته ولی در حالت بدون رقیق‌سازی این وابستگی حالت کاهشی دارد. در نسبت رقیق‌سازی بین ۵ و ۱۰ درصد بیشترین میزان شدت روشنایی مشاهده می‌شود همچنین در این دو درصد نوع رفتار و اختلاف شدت تابش ایجاد شده نزدیک و دارای تغییرات کمی می‌باشند.

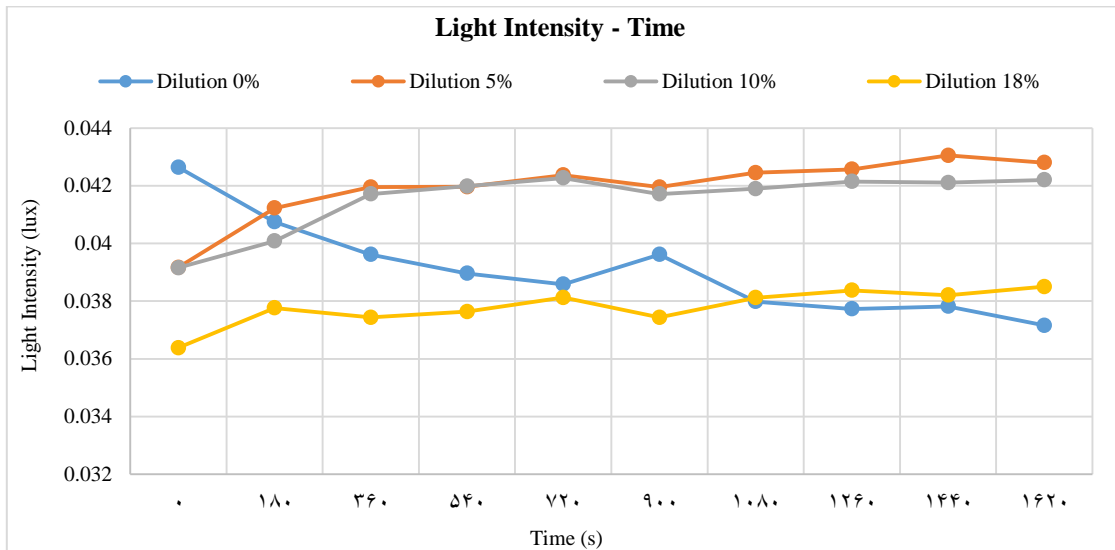


Figure 21- Changes in Light intensity over time for different dilution ratios

شکل ۲۱- تغییرات شدت روشنایی برحسب زمان برای نسبت رقیق‌سازی‌های مختلف

## نتیجه گیری

بر اساس این پژوهش می‌توان بخش ابتدایی شعله و گرمای آزاد شده احتراق میکرو متان - اکسیژن همراه با رقیق‌سازی نیتروژن 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. با گذشت زمان دماهای شعله در حالت‌های مختلف رقیق‌سازی به سمت همگرایی بیشتر و همسو شدن با اصل رقیق‌سازی که در بالا اشاره شد حرکت می‌کنند. با افزایش نسبت رقیق‌سازی کاهش شدت تابش  $H_2O^*$  مشاهده شده است که از نتایج رقیق‌سازی بوده و همین عامل یکی از عوامل مهم در افزایش طول شعله خواهد بود. البته باید توجه کرد که پویشگر طیف‌سنج فقط بخش ابتدایی شعله در دایره‌ای به شعاع  $8/89$  میلی‌متر را پوشش داده و نتایج و تحلیل‌ها بر همین پایه مورد بررسی قرار می‌گیرد و در حالت رقیق‌سازی که طول شعله چند برابر ناحیه پوشش دهی پویشگر طیف‌سنج هست باید در تحلیل و مقایسه با حالت غیر رقیق‌ساز که تقریباً کل شعله را در برمی‌گیرد جدا و با دقت به تحلیل و نتیجه‌گیری پرداخت و نتیجه‌گیری و تحلیل نهایی نیازمند پژوهش‌های عددی و تجربی تکمیلی است. بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان نتایج زیر را بیان نمود:

- با تغییر 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 که ناحیه ابتدایی شعله را پوشش می‌دهد، همراه است. با اندازه‌گیری و بررسی نسبت تغییرات  $C_2^*/OH^*$  و نسبت  $CH^*/C_2^*$  یک‌روند ثابت و یکنواخت از تابش این گونه در طول زمان مشاهده می‌شود که تأثیر کم پیش گرم بر تولید این رادیکال‌ها در سطح مقطع ابتدایی شعله برای حالت رقیق‌شده با نیتروژن را نشان می‌دهد. تغییرات و افزایش نسبت  $C_2^*/OH^*$  در حالت غیر رقیق‌سازی مشهود بوده که به دلیل میزان سطح به نسبت کامل از شعله است که پویشگر طیف‌سنج پوشش داده است.
- برای نسبت  $CH^*/C_2^*$  در حالت غیر رقیق‌ساز روند کاهشی مشهود است و این به علت کاهش  $C_2^*$  در مقطع اندازه‌گیری شده است و این مهم با دمای کلی محفظه که کاهشی بوده همراه است که خود نشانگر عدم تکامل شعله و تولید محصولاتی همچون دوده بیشتر است. با افزایش نسبت رقیق‌سازی نیتروژن افزایش نسبت شدت وجود رادیکال‌های  $OH^*/CH^*$  مشاهده می‌شود.
- با افزایش رقیق‌سازی دمای کلی محفظه کاهش می‌یابد و این روند هم‌گرایی را برای درصدهای مختلف رقیق‌سازی بر اساس این اصل کلی مشهود است، نکته قابل توجه در این حالت بالاتر بودن دمای نهایی محفظه در حالت رقیق‌ساز ۱۰ و ۵ درصد است، البته این حالت به علت عدم همگرا شدن نهایی و دمای محفظه در حالت غیر رقیق‌ساز است 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 و شدت تابش روشنایی برای محفظه در حالت رقیق‌سازی بین ۵ تا ۱۰ درصد خواهد بود، در این حدود درصد رقیق‌سازی‌ها عملکرد یکنواخت‌تر، طول مناسب‌تر شعله و عدم وابستگی زیاد به پیش گرم محفظه مشهود است و برای استفاده به‌عنوان یک منبع گرمایی و یا یک سیستم فتوولتائیکی در حالت کارکرد مداوم مناسب‌تر از حالت غیر رقیق‌ساز و یا رقیق‌سازی با درصد بالا است.

## تشکر و قدردانی

از کلیه عزیزان در آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی امیرکبیر کمال تشکر را به خاطر کمک‌ها و پشتیبانی‌های خودشان از این گروه دارا هستیم.



## منابع

1. G. G. a. Y. T. I.A. Waitz, "Combustors for Micro-Gas Turbine Engines," *Journal of Fluids Engineering*, no. 120, pp. 109-117, 1998.
2. H. Davy, "Some researches on flame," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, pp. 45-76, 1817.
3. J. A. B. J. N. Barnard, *Flame and combustion*, 1st ed., Tehran: University Publication Center, 1989.
4. A. Zargarbashi, S. Sarrafan Sadeghi and S. Tabejamaat, "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*, vol. 22, no. 04, pp. 213-223, 2022. (in Persian)
5. J. Hua, M. Wu and K. Kumar, "Numerical simulation of the combustion of hydrogen – air mixture in micro – scaled chambers part II: CFD analysis for a micro-combustor," *Chemical Engineering Science*, vol. 60, pp. 3507-3515, 2005.
6. K. M. N. I. Kim, "A numerical study on propagation of premixed flames in small tubes," *Combustion and Flame*, no. 146, pp. 283-301, 2006.
7. J. Ballester and T. García-Armingol, "Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, no. 4, pp. 375-411, 2010.
8. V. Józsa, "Application of lean premixed prevaporized burner for renewable fuels," *Environmental Science*, 2016.
9. V. Weiser and N. Eisenreich, "Fast Emission Spectroscopy for a Better Understanding of Pyrotechnic Combustion Behavior," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 30, no. 1, pp. 67-78, 2005.
10. É. De Moraes Flores, A. Medeiros Nunes, V. Luiz Dressler and J. Dědina, "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*, vol. 64, no. 2, pp. 173-178, 2009.
11. J. Jarosiński, "Flame quenching by a cold wall," *Combustion and Flame*, vol. 50, pp. 167-175, 1983.
12. L. Sitzki, K. Borer, E. Schuster and P. Ronney, "Combustion in micro scale heat- recirculating burners," in *The Third Asia- pacific conference on combustion*, Seoul, 2001.
13. P.D. Ronney, "Analysis of non-adiabatic heat-recirculation combustors," *Combustion and Flame*, vol. 135, pp. 421-439, 2003.
14. K. Maruta, T. Kataoka, N. I. Kim, S. Minaev and R. Fursenkob, "Characteristics of combustion in a narrow channel with a temperature gradient," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 30, no. 2, pp. 2429-2436, 2005.
15. M. Mikami, Y. Maeda, K. Matsui, T. Seo and L. Yuliaty, "Combustion of gaseous and liquid fuels in meso-scale tubes with wire mesh," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 34, no. 2, pp. 3387-3394, 2013.
16. S. Sarrafan Sadeghi, *An Experimental Study of the Micro-Combustion Chamber*, Master of Science Thesis, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, 2013. (in Persian)
17. S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat and M. Baigmohammadi, *Laboratory test bed of micro-combustion in micro and meso scale reactor*, Iran Patent 80027, 15 07 2013. (in Persian)
18. M. Baigmohammadi, S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat and J. Zarvandi, "Numerical study of the effects of wire insertion on CH<sub>4</sub>(methane)/AIR pre-mixed flame in a micro combustor," *Energy*, vol. 54, no. 1, pp. 271-284, 2013.
19. X. Li, J. Zhang, H. Yang, L. Jiang, X. Wang and D. Zhao, "Combustion characteristics of non-premixed methane micro-jet flame in coflow air and thermal interaction between flame and micro tube," *Applied Thermal Engineering*, vol. 112, pp. 296-303, 2017.
20. A. Alipoor and M. Saidi, "Improvement of combustion characteristics for hydrogen-air mixture using modular structure in a novel micro combustor," *Fuel and Combustion*, vol. 12, no. 4, pp. 1-13, 2019.
21. R. J. Milcarek, H. Nakamura, T. Tezuka, K. Maruta and J. Ahn, "Microcombustion for micro-tubular flame-assisted fuel cell power and heat cogeneration," *Journal of Power Sources*, vol. 413, pp. 191-197, 2019.
22. R. J. Milcarek, H. Nakamura, T. Tezuka, K. Maruta and J. Ahn, "Investigation of microcombustion reforming of ethane/air and micro-Tubular Solid Oxide Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, vol. 450, p. 227606, 2020.
23. Z. Zhao, W. Wang, Z. Zuo and N. Kuang, "Investigation on the flame characteristics of premixed propane/air in a micro opposed flow porous combustor," *Energy*, vol. 238, pp. 1-30, 2021.
24. A. Zargarbashi, S. S. Sadeghi, S. Tabejamaat and S. Sheykhbaglou, "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*, vol. 20, no. 12, pp. 2697-2708, 2020. (in Persian)
25. J. Ballester and T. García-Armingol, "Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, p. 375-411, 2010.
26. H. Soltanian, M. ZabetianTarghi and H. Pasdarshahri, "Chemiluminescence usage in finding optimum operating range

- of multi-hole burners," *Energy*, vol. 180, pp. 398-404, 2019.
27. T. Guiberti, D. Durox and T. Schuller, "Flame chemiluminescence from CO<sub>2</sub>- and N<sub>2</sub>-diluted laminar CH<sub>4</sub> /air premixed flames," *Combustion and Flame*, vol. 181, pp. 110-122, 2017.
  28. J.-M. Samaniego, F. N. Egolfopulos and C. T. Bowman, "CO<sub>2</sub>\* Chemiluminescence in Premixed Flames," *Combustion Science and Technology*, vol. 109, no. 1-6, pp. 183-203, 1995.
  29. TOSHIBA CORPORATION, "TOSHIBA CCD Linear Image Sensor CCD(Charge Coupled Device) - TCD1304DG," 09 01 2021. [Online]. Available: <https://tcd1304.wordpress.com/>. [Accessed 01 06 2004].
  30. S. Yipeng, L. Chun and Z. Huaichun, "A simple judgment method of gray property of flames based on spectral analysis and the two-color method for measurements of temperatures and emissivity," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 33, no. 1, pp. 735-741, 2011.
  31. F. Eskandari, M. Zabetian T., H. Pasdar S. and M. Gholinezhad, "Laboratory investigation of radiation flux parameter in surface flame torch using radiative spectroscopy," *8th Fuel and Combustion Conference of Iran*, Tabriz, 2020. (in Persian)
  32. J. A. Miller and C. T. Bowman, "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion" *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 15, pp. 287-338, 1989.
  33. S. R. Turns, *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*, 3rd ed., New York: McGraw-Hill, 2012.
  34. M. Ruaño, M. Costa and M. Carvalho, "A NO<sub>x</sub> diagnostic system based on a spectral ultraviolet/visible imaging device," *Fuel*, vol. 78, p. 1283-1292, 1999.
  35. N. Doan and N. Swaminathan, "Analysis of Markers for Combustion Mode and Heat Release in MILD Combustion Using DNS Data," *Combustion Science and Technology*, vol. 191, no. 5-6, pp. 1059-1078, 2019.
  36. C. Panoutsos, Y. Hardalupas and A. Taylor, "Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using OH\* and CH\* chemiluminescence in premixed and non-premixed methane-air flames," *Combustion and Flame*, vol. 156, p. 273-291, 2009.
  37. J. Kojima, Y. Ikuda and T. Nakajma, "Spatially resolved measurement of OH\*, CH\*, AND C<sub>2</sub>\* chemiluminescence in the reaction zone of laminar Methane/Air premixed flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 28, p. 1757-1764, 2000.

## English Abstract

# Introducing a novel spiral-channel combustion chamber and experimentally investigating the effect of nitrogen dilution on non-premixed micro methane-oxygen flame by spectroscopy method

Soroush Sarrafan Sadeghi<sup>1</sup>, Sadegh Tabejamaat<sup>2\*</sup>, Amirreza Ghahremani<sup>3</sup>, Sina Narimani Asl<sup>4</sup>

1- PhD Candidate, School of Aerospace engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, soroush.s.s@aut.ac.ir

2- Professor, School of Aerospace engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, sadegh@aut.ac.ir

3- Assistant Professor, School of Aerospace engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, a\_ghahremani@aut.ac.ir

4- Bachelor's degree, School of Aerospace engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, sina.narimani@aut.ac.ir

\*Corresponding author

(Received: 2022/10/25, Received in revised form: 2023/01/07, Accepted: 2023/01/08)

In this study, the experimental investigation of oxygen-methane combustion has been done by investigating the effect of nitrogen dilution in a novel spiral-channel combustion chamber along with the recovery of thermal energy of the products. The methane-oxygen non-premixed flame by a fixed equivalence ratio of 1.69, with nitrogen dilution percentages of 0%, 5%, 10%, and 18%, has been investigated with the spectroscopy method. The chamber is made of aluminum and created as a spiral-form channel to aid heat recovery. In this chamber, the combustion gases then pass a path parallel to the inlet flow, causing the inlet gases to be preheated. Also, oxygen is diluted and mixed with nitrogen before entering the chamber. Based on the results, by increasing of the diluent ratio the reduction of the  $H_2O^*$  radical radiation spectrum has been observed, where indicates complete combustion. In general, with the increase of the dilution ratio, the flame length increases, and in 5% and 10% dilution states, the best temperature distribution uniformity, and the completion of the combustion reaction chain are observed.

**Keywords:** Methane-Oxygen Flame, Nitrogen dilution, Meso-scale helical-channel combustion chambers, Non-Premixed Combustion, Flame Spectroscopy Method.