

بررسی تجربی مشخصات شعله میکرو متان-اکسیژن در احتراق تخت به کمک روش طیف سنجی در محفظه‌ای همراه با بازتاب حرارتی

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

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

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

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

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

* نویسنده مخاطب

چکیده

در این تحقیق به بررسی تجربی احتراق، اکسیژن-متان درون محفظه‌های تخت همراه با بازتاب 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. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق با نزدیک شدن به نسبت‌های استوکیومتری، طول شعله افزایش و دمای محفظه و گازهای حاصل از احتراق افزایش می‌یابد و در منطقه مرکزی و ابتدایی شعله، درصد حضور رادیکال‌های OH افزایش می‌یابد که نشان از تکمیل زنجیره احتراقی و به تبع آن پایداری بیشتر شعله در این محفظه‌ها می‌باشد.

کلمات کلیدی: احتراق میکرو، محفظه‌های تخت، بازتاب حرارتی، متان، اکسیژن.

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]. 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 دقیق‌تر این محفظه‌ها ممکن شود [۲]. محفظه‌های احتراق میکرو در ساخت هر سیستمی که نیاز به تولید توان در آن‌ها وجود داشته باشد قابل استفاده هستند [۳].

طیف سنجی روشی است که امکان اندازه‌گیری طول موج و شدت نور را ممکن ساخته است. در مطالعه 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 [۴]. 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 محفظه‌ای احتراق در شرایطی که دمای شعله بسیار بالاست، یا به هر دلیلی امکان دماسنجی مستقیم وجود ندارد، طیف سنج نسبت به

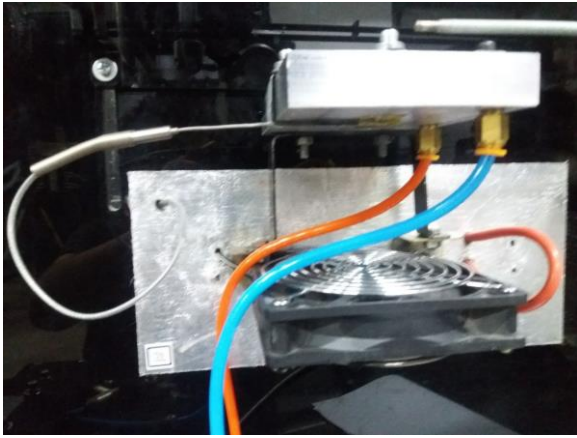
ترموکوپل کارآمدتر است. همچنین طیف سنج در برابر اغتشاشات محیط مقاومت بیشتری برای اندازه‌گیری دما دارد [۵].

کارتر و همکاران [۶] با استفاده از روش طیف سنجی شعله‌ای تا سیات احتراق فشار بالا را بررسی کردند. آن‌ها موفق شدند وسیله‌ای برای بررسی شعله‌های فشار بالا با ابزارهای طیف سنجی طراحی و تولید کنند. هلاند و اسپاگر [۷] از روش طیف سنجی مادون قرمز به تعیین محصولات عمده ناشی از احتراق در آگروزهای هواپیما پرداختند. فانسلا و همکاران [۸] 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. بکمن و همکاران [۹] به روش طیف سنجی دمای موتورهای احتراق داخلی را اندازه‌گیری کردند. در این پژوهش صحت دما سنجی به روش طیف سنجی را بررسی کردند. با ارزیابی مجدد داده‌ها تلاش کردند تا مدل نظری بهینه‌تری برای دماسنجی ارائه دهند. ایشان با ارائه‌ی یک کالیبراسیون مناسب برای اندازه‌گیری دما توانستند نشان دهند که دمای اندازه‌گیری شده به روش طیف سنجی، تطابق مناسبی با دمای اندازه‌گیری شده با روش‌های تماسی دارد.

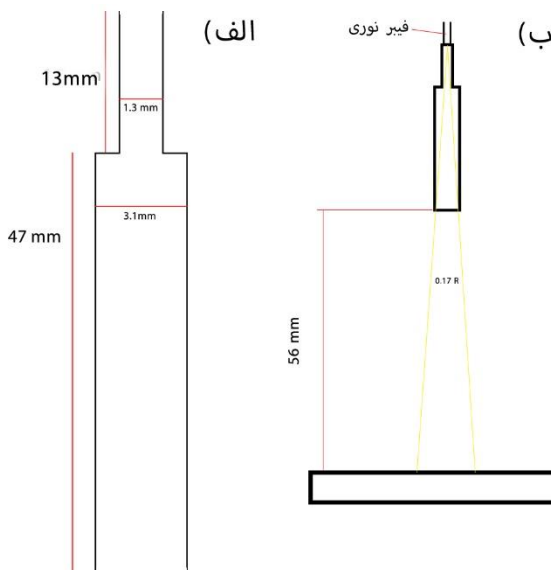
ویزر و آیزنراک [۱۰] به بررسی رفتار احتراق پیروتکنیک با روش طیف سنجی پرداختند. احتراق پیروتکنیک سریع و با انتشار زیاد رخ می‌دهد. روش طیف سنجی با تحلیل تابش ناشی از احتراق، باعث سهولت در بررسی احتراق پیروتکنیک شده است. در این پژوهش رادیکال‌های موجود در احتراق با بررسی شدت تابشی در محدوده‌ی فرابنفش شناسایی شدند. همچنین دریافتند که احتراق پیروتکنیکی یک پیوستار خاکستری در محدوده طیف فرورسرخ نزدیک (از طول موج ۷۰۰ نانومتر تا ۲۵۰۰ نانومتر) منتشر می‌کنند که می‌توان از آن برای تعیین دمای واکنش احتراق استفاده کرد. موراس فلورس و همکاران [۱۱] 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 کوآرتز (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. ماکاروسو و واگلیکو [۱۲] طیف احتراق پیش اختلاط را در موتورهای دیزلی اندازه‌گیری کردند. پاسستور و همکاران [۱۳] با استفاده از روش طیف سنجی تلاش کردند تا روشی برای بهبود احتراق پیش آمیخته در موتور احتراق داخلی ارائه دهند.

روش و تجهیزات آزمون

آزمایش‌های مربوط به این تحقیق بر روی شعله استند آزمایشگاهی احتراق میکرو مستقر در آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشگاه امیرکبیر صورت گرفت



شکل ۲: ترموکوپل زیر محفظه‌ی احتراق



شکل ۳: الف) تصویر لوله‌ی استفاده شده بر روی فیبر نوری، ب) وضعیت لوله نسبت به محفظه احتراق

بحث بر روی نتایج

در شکل ۴ نمایشی از شکل شعله برای نسبت هم‌ارزی ۱/۶۹ نشان داده شده است. این نما از شعله مربوط به ۳ دقیقه ابتدایی شروع آزمون می‌باشد. همچنین در این شکل نمایشی از محفظه احتراق از بالا نیز نمایان می‌باشد.



شکل ۴: نمایشی از شعله احتراق میکرو در نسبت هم‌ارزی ۱/۶۹

است. جهت این تحقیق از یک اسپکترومتر مدل V900 ساخت شرکت فناوران فیزیک نور استفاده شده است و کلیه سیستم‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری شامل، سیستم اندازه‌گیری دبی سوخت و اکسنده، ترموکوپل و اسپکترومتر مورد استفاده کالیبره گردیده‌اند. در شکل ۱ نمایشی از محفظه مورد آزمون و تجهیزات نشان داده شده است.



شکل ۱: نمایشی از محفظه و مجموعه مورد استفاده

برای این تحقیق فیبر نوری اسپکترومتر مورد استفاده عمود بر شعله در فاصله‌ی ثابت به کمک یک بازو نگهدارنده ثابت قرار گرفته است و در تمامی آزمایش‌ها دبی سوخت ثابت بوده و دبی اکسیژن متغییر بوده است، نسبت سوخت به اکسنده در آزمون‌های مورد استفاده در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

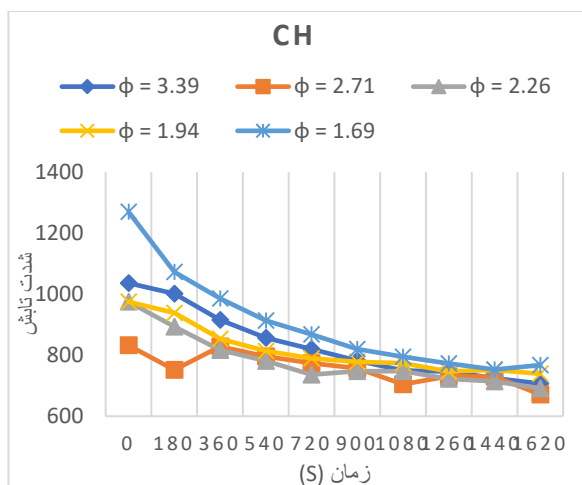
جدول ۱: دبی سوخت و هوا و نسبت هم‌ارزی مربوط به هر آزمایش

شماره آزمون	نسبت هم‌ارزی	دبی اکسیژن (SLM)	دبی سوخت (SLM)
۱	3.39	3.80	7.014
۲	2.71	4.76	7.014
۳	2.26	5.70	7.014
۴	1.94	6.66	7.014
۵	1.69	7.60	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 ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. لازم به توضیح است ضخامت بین ترموکوپل و محل احتراق ۷ میلی‌متر بوده و جنس بدنه از آلومینیوم می‌باشد. در تمامی آزمایش‌ها فاصله‌ی فیبرنوری با شعله ثابت و برابر ۱۱۶ میلی‌متر است. به جهت ثابت نگه‌داشتن 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 نوردی بر روی عدد ۱۰۰۰۰ میلی‌ثانیه بوده است. علت انتخاب زمان نوردی 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 با 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.

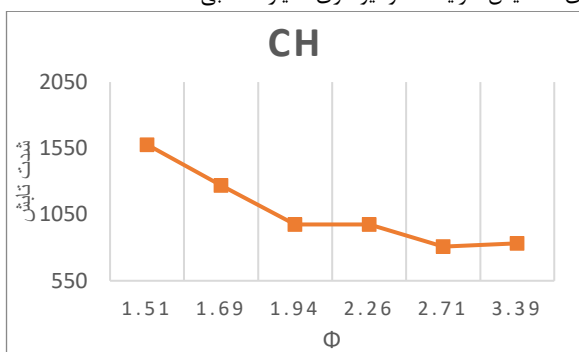
بررسی رادیکال‌های موجود در شعله

در ادامه به بررسی تاثیر نسبت هم ارزی بر تغییرات رادیکال‌ها می‌پردازیم بر همین مبنا در شکل ۵ میزان تابش رادیکال OH در آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد. شعله‌ی میکرو با نسبت هم‌ارزی ۲/۷۱ (آزمایش دوم) کمترین تابش OH را در بین دیگر آزمایش‌ها داشته است اما میزان تابش در طول آزمایش تقریباً ثابت بوده است. آزمایش با نسبت هم‌ارزی ۱/۶۹ بیشترین تابش OH را داشته است. در این آزمایش میزان تابش در طول زمان کاهش یافته است. در لحظات پایانی میزان تابش OH در هر پنج آزمایش بسیار به هم نزدیک شده است. رادیکال OH به عنوان نشانگری از میزان گرمای آزاد شده در احتراق شناخته می‌شود [۱۴]. در نتیجه گرمای آزاد شده از شعله با نسبت هم‌ارزی ۱/۶۹ بیشترین مقدار نسبت به دیگر شعله‌هاست. در شکل ۶ نمودار تغییرات تابش OH در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف نمایش داده شده است. داده‌های این نمودار مربوط به اولین داده برداری توسط طیف سنج است. از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که در لحظه‌ی اول انتقال حرارت در نسبت هم‌ارزی ۱/۶۹ بیشترین مقدار، و در نسبت هم‌ارزی ۲/۷۱ کمترین مقدار بوده است.



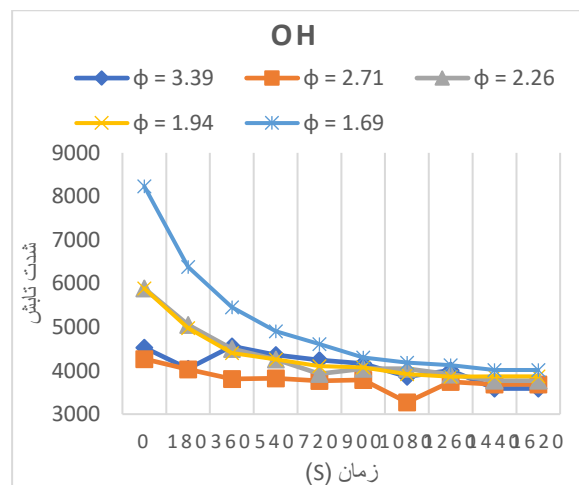
شکل ۷: مقایسه تابش رادیکال CH در آزمایش‌ها

تابش گونه‌ی رادیکالی CH نیز متاثر از نسبت هم‌ارزی محلی و فشار است [۱۴]. همانطور که در شکل ۸ دیده می‌شود با تغییرات نسبت هم‌ارزی، تابش گونه‌ی CH نیز تغییر می‌کند. با این حال یک بار تابش در نسبت هم‌ارزی ۳/۳۹ دچار نوسان شده و رفتار مورد انتظار را از خود بروز نداده است. با توجه به اینکه این نمودار در نزدیکی شرایط استوکیومتری به بیشینه‌ی خود می‌رسد، می‌توان نتیجه گرفت که تابش گونه‌ی CH می‌تواند برای تشخیص شرایط استوکیومتری معیار مناسبی است.

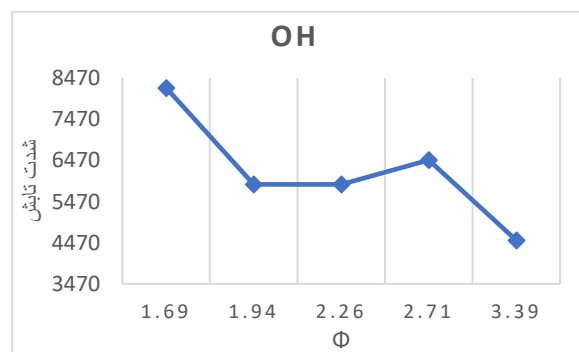


شکل ۸: نمودار تغییرات تابش CH نسبت به نسبت هم‌ارزی

شکل ۹ نمودار مقایسه‌ی تابش رادیکال C₂ در آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد. در هر سه آزمایش تابش این رادیکال همراه با کاهش بوده است. این کاهش نمایانگر کاهش دوده در احتراق است. بیشترین تابش C₂ مربوط به آزمایش‌های با نسبت هم‌ارزی ۳/۳۹ و ۱/۶۹ می‌باشد، با گذر زمان و کاهش تابش، نسبت به دیگر آزمایش‌ها همچنان تابش بیشتری وجود دارد. سه آزمایش دیگر نیز در پایان آزمایش تقریباً از نظر تابش C₂ به مقدار برابری می‌رسند.

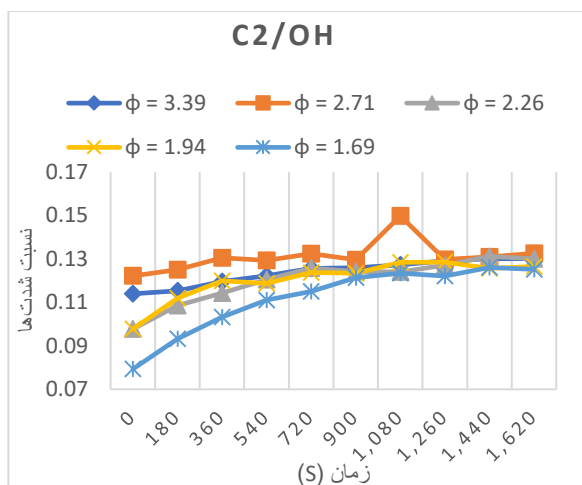


شکل ۵: مقایسه‌ی تابش رادیکال OH در آزمایش‌ها

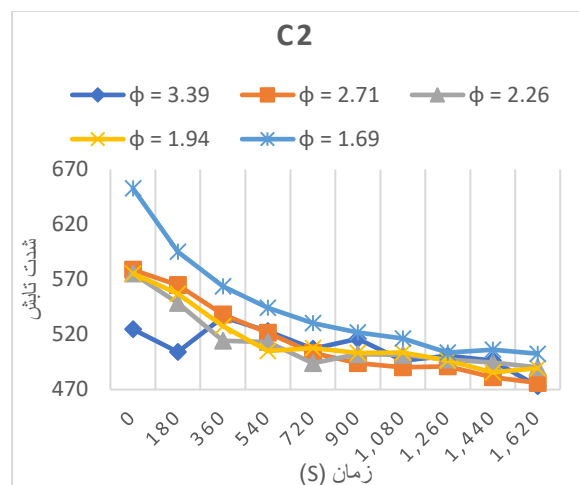


شکل ۶: مقایسه‌ی تابش OH در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف

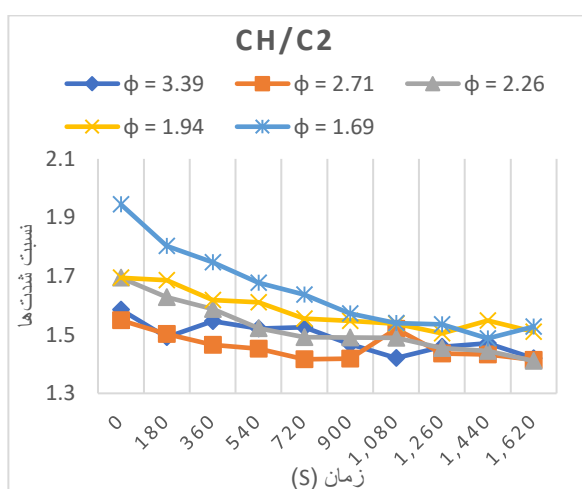
شکل ۷ میزان تابش رادیکال CH را نمایش می‌دهد. میزان تابش این رادیکال در هر سه آزمایش با کاهش بسیار اندک همراه است. رفتار سه شعله با نسبت هم‌ارزی ۱/۹۴، ۲/۲۶ و ۳/۳۹ در تابش CH تقریباً شبیه به هم بوده است. شعله با نسبت هم‌ارزی ۱/۶۹ بیشترین تابش رادیکال CH را دارد.



شکل ۱۱: نمودار نسبت C₂/OH در واکنش‌ها

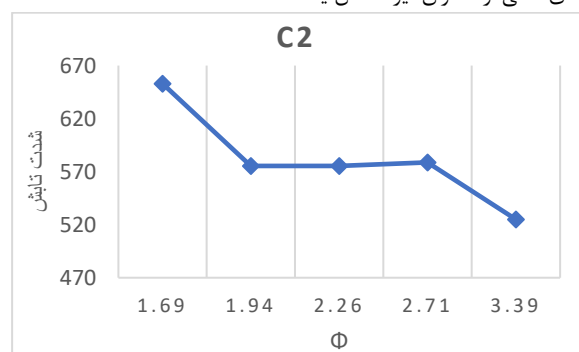


شکل ۹: مقایسه تابش رادیکال C₂ در آزمایش‌ها



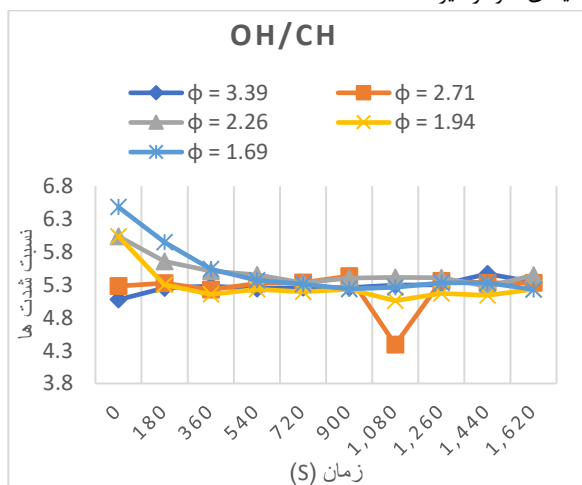
شکل ۱۲: نمودار نسبت CH/C₂ در واکنش‌ها

در شکل ۱۰ نمودار این گونه‌ی احتراقی نسبت به نسبت هم‌ارزی رسم شده است. تغییرات تابش گونه‌ی C₂ در نسبت با گونه‌های دیگر اهمیت ویژه‌ای دارد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. تابش C₂ در هیدروکربن‌هایی با تعداد کربن پایین، بسیار ناچیز است. از آنجا که در این آزمایش از سوخت متان استفاده شده است، تابش رادیکال C₂ نیز بسیار اندک بوده است. همچنین این رادیکال نمایش‌دهنده‌ی میزان دوده‌ی ناشی از فرآیند احتراق است. در تمام واکنش‌ها با گذر زمان، تابش C₂ کاهش می‌یابد و در نتیجه دوده‌ی ناشی از احتراق نیز کاهش یافته است.



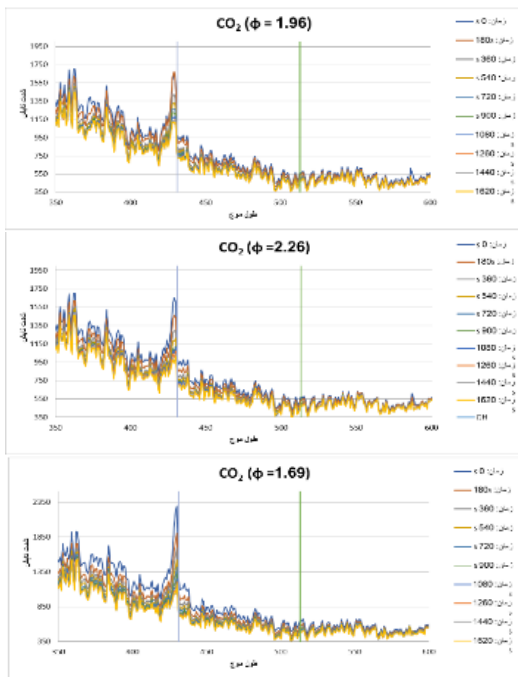
شکل ۱۰: نمودار تغییرات تابش C₂ نسبت به نسبت هم‌ارزی

نمودار OH/CH که در شکل ۱۳ نمایش داده شده است، یکی دیگر از نمودارهایی است که با نسبت هم‌ارزی شعله مرتبط است [۱۵]. در نمودار مشاهده می‌شود که نسبت OH/CH می‌تواند بیانگر نسبت هم‌ارزی و نزدیک شدن شعله به شرایط استوکیومتری باشد. با نزدیک شدن نسبت هم‌ارزی به شرایط استوکیومتری، نسبت OH/CH نیز افزایش پیدا می‌کند و به مقدار بیشینه‌ی نمودار میرسد.



شکل ۱۳: نمودار OH/CH در آزمایش‌ها

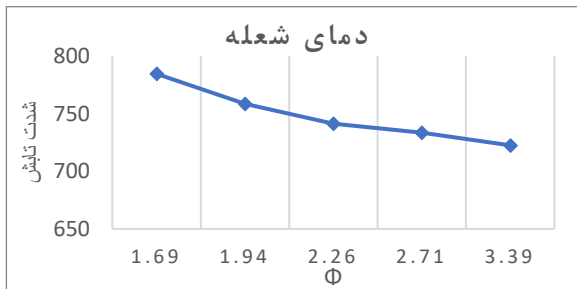
نسبت C₂/OH (نمودار شکل ۱۱) و نسبت CH/C₂ (نمودار شکل ۱۲) برای یافتن نقطه‌ی استوکیومتری مناسب هستند [۱۵]. با کاهش نسبت هم‌ارزی و نزدیک شدن به شرایط استوکیومتری، نمودار C₂/OH به کمینه‌ی خود می‌رسد. همچنین نمودار CH/C₂ مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت هم‌ارزی و نزدیک شدن به شرایط استوکیومتری، نسبت CH/C₂ به بیشینه‌ی خود می‌رسد. در نتیجه برای پیدا کردن شرایط نزدیک به استوکیومتری می‌توان از این دو نمودار استفاده کرد.



شکل ۱۵: طیف تابش رادیکیال CO₂ در آزمایش‌ها

بررسی دمای شعله در آزمایش‌های انجام شده

شکل ۱۶ دمای شعله نسبت به نسبت هم‌ارزی 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 دقیقی 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 با نزدیک شدن به شرایط استکیومتری دمای شعله افزایش یافته و با افزایش نسبت هم‌ارزی دمای شعله به پایین‌ترین مقدار اندازه‌گیری شده رسیده است.

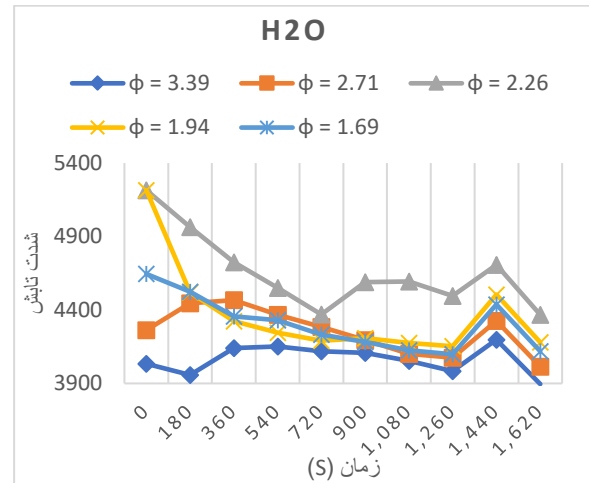


شکل ۱۶: نمودار دمای شعله نسبت به نسبت هم‌ارزی

مقایسه‌ی طول شعله در آزمایش‌ها

طول شعله یکی از پارامترهایی بوده است که هم‌زمان با ذخیره‌ی داده‌های طیف سنج ثبت شده است. شکل ۱۷ طول شعله را نسبت به نسبت‌های هم‌ارزی نمایش می‌دهد. شعله با نسبت هم‌ارزی ۲/۷۱ و ۳/۳۹ بیشترین طول شعله را داشته و پس از مدتی طول شعله نسبتاً ثابت شده است. شعله با نسبت هم‌ارزی ۱/۹۴ بیشترین کاهش طول را داشته و شعله با نسبت هم‌ارزی ۱/۶۹ کمترین طول را داشته و تغییرات کمی در طول را تجربه کرده است. با نزدیک شدن به نسبت هم‌ارزی استکیومتری طول شعله به طرز چشم‌گیری کاهش پیدا کرده است. کاهش طول شعله به معنی کامل‌تر انجام شدن احتراق است و به همین دلیل با کاهش نسبت هم‌ارزی و نزدیک شدن به شرایط استکیومتری طول شعله نیز کاهش می‌یابد.

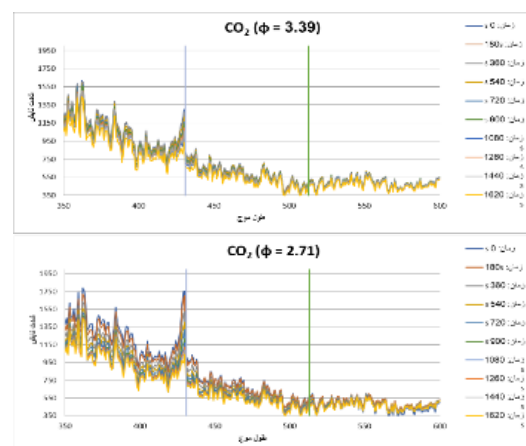
شکل ۱۴ نمودار تابش گونه‌ی H₂O را نمایش می‌دهد. این گونه فرآورده‌ی اصلی آزمایش نیز محسوب می‌شود و میزان تابش آن نمایان‌گر کامل‌تر بودن احتراق است [۱۵]. آزمایش با نسبت هم‌ارزی ۲/۲۶ بیشترین تغییر را در تابش این‌گونه نمایش می‌دهد. در لحظات پایانی آزمایش‌های با نسبت هم‌ارزی ۲/۲۶ و ۳/۳۹ تابش برابر این‌گونه را به همراه دارند.



شکل ۱۴: مقایسه تابش رادیکیال H₂O در آزمایش‌ها

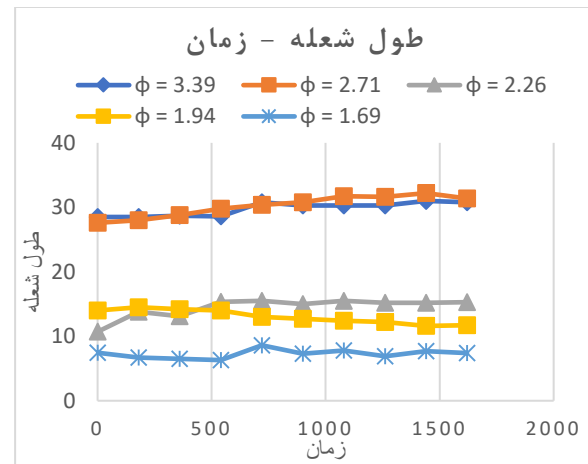
شکل ۱۵ نمودار طیف تابش CO₂ در آزمایش‌های مختلف را نمایش می‌دهد. رادیکیال CO₂ به صورت یک طیف از طول موج ۳۵۰ تا ۶۰۰ نانومتر انتشار انجام می‌دهد. تابش رادیکیال‌های C₂ و CH نیز با طیف CO₂ هم‌پوشانی دارد. با توجه به نمودارها بیشتریت تغییر و کاهش در تابش CO₂ مربوط به شعله با نسبت هم‌ارزی ۱/۹۴ است. پس از آن بیشترین تغییر مربوط به شعله با نسبت هم‌ارزی ۲/۲۶ است. در نهایت کمترین تغییرات نیز مربوط به شعله با نسبت هم‌ارزی ۳/۳۹ است. تابش این‌گونه 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 هم‌ارزی ۱/۶۹ آزاد شده است و کمترین حرارت آزاد شده مربوط به احتراق با نسبت هم‌ارزی ۳/۳۹ می‌باشد.

- زمان: ۰ s
- زمان: ۱۸۰ s
- زمان: ۳۶۰ s
- زمان: ۵۴۰ s
- زمان: ۷۲۰ s
- زمان: ۹۰۰ s
- زمان: ۱۰۸۰ s
- زمان: ۱۲۶۰ s
- زمان: ۱۴۴۰ s
- زمان: ۱۶۲۰ s
- C₂
- CH



مشاهده شد که می‌توان گرمای آزاد شده در اثر احتراق را با توجه به تابش گونه‌های احتراقی OH و CO₂ در نسبت‌های هم‌ارزی گوناگون بررسی و مقایسه کرد. مقایسه‌ی تابش این دو گونه با نمودار مربوط به دمای زیرمحفظه‌ی احتراق نشان می‌دهد که با افزایش تابش این دو گونه، گرمای آزاد شده در اثر احتراق نیز افزایش می‌یابد. همچنین با نزدیک شدن به شرایط احتراق استکیومتری و نسبت تابش OH/CH و CH₂/C₂ به یک مقدار بیشینه نزدیک می‌شوند. در عوض نسبت C₂/OH با نزدیک شدن به شرایط استکیومتری کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه می‌توان با مقایسه‌ی طیف دریافتی گونه‌های C₂, OH و CH نزدیک شدن به شرایط استکیومتری را پیش‌بینی کرد.

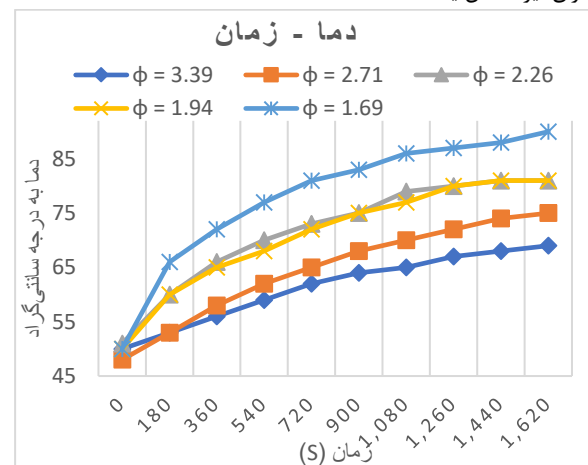
با افزایش حرارت دمای محفظه، پیش‌گرم در محفظه اتفاق می‌افتد. از پیش‌گرم شدن اکسند و سوخت انتظار می‌رود احتراق کامل‌تر رخ دهد و طول شعله کوتاه‌تر شود. اما احتراق میکرو یک احتراق خاص است. همانطور که در مرور ادبیات اشاره شد در احتراق میکرو سطح و انتقال حرارت توامان بر شعله اثر می‌گذارند. لذا به صورت قطع نمی‌توان بیان کرد که با پیش‌گرم کردن سوخت و اکسیژن، طول شعله کاهش پیدا می‌کند. به همین دلیل مشاهده می‌شود که در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف، رفتارهای مختلفی از شعله ثبت شده است. با نزدیک شدن به وضعیت استکیومتری کاهش دمای شعله و در عوض رشد سریع‌تر دمای محفظه‌ی احتراق مشاهده می‌شود. اما رفتار طول شعله با نسبت هم‌ارزی ارتباط معنی‌داری نداشته است. با کاهش نسبت هم‌ارزی و نزدیک شدن به شرایط استکیومتری طول شعله کاهش می‌یابد. همچنین دمای شعله و تغییرات دمای پیش‌گرم (دمای زیر محفظه احتراق) با نزدیک شدن به شرایط استکیومتری افزایش می‌یابد. تابش گونه‌های CO₂ و OH نمایان‌گر بالاتر بودن گرمای آزاد شده در شرایط نزدیک به استکیومتری است. در نتیجه با بررسی طیف تابشی و طول شعله، می‌توان نسبت‌های هم‌ارزی بهینه در محفظه‌ی احتراق میکرو را بسته به کاربردی که برای محفظه‌ی احتراق در نظر گرفته می‌شود، انتخاب کرد. در صورتی که از شعله احتراق برای کسب انرژی فتوولتائیک استفاده شود، به شعله‌ی بلندتری نیاز است. بنابراین نقاطی که ترکیب سوخت غنی است و از شرایط استکیومتری فاصله‌ی بیشتری دارد، برای تولید انرژی فتوولتائیک مناسب‌تر است. اما در صورتی که کسب انرژی به صورت حرارت ملاک باشد، نیاز به انتقال حرارت بهتر و نزدیک شدن به شرایط استکیومتری وجود دارد. نقطه‌ی بهینه برای دریافت بیشترین انرژی گرمایی با نزدیک شدن به شرایط استکیومتری به دست می‌آید. در آزمایش‌ها نسبت هم‌ارزی ۱/۶۹ بیشترین انرژی حرارتی و بالاترین دمای شعله را فراهم کرده است. برای دریافت بیشترین انرژی فتوولتائیک نیز نسبت هم‌ارزی ۳/۳۹ و ۲/۷۱ مناسب‌ترین شرایط را فراهم کرده است. چرا که طول شعله در این نسبت هم‌ارزی بیشترین طول اندازه‌گیری شده بوده است. هدف پیدا کردن نقاط بهینه در دینامیک حرکت شعله است. در این آزمایش تلاش شده است ارتباط میان اثر پارامترهای مختلف (مانند تابش گونه‌های احتراقی، اثر سطح و انتقال حرارت) بر رفتار شعله‌ی میکرو بررسی شود. با بررسی رفتار و دینامیک حرکت در هر نسبت هم‌ارزی می‌توان نقاط بهینه‌ای را متناسب با کاربردهای مورد نظر یافت.



شکل ۱۷: نمودار طول شعله نسبت به زمان برای آزمایش‌های مختلف

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 در تمام آزمایش‌ها ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. شکل ۱۸ نمودار تغییرات دمای محفظه‌ی احتراق بر حسب زمان در آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل و ساختار محفظه‌ی احتراق مورد نظر، این افزایش دما به منزله‌ی پیش‌گرم کردن سوخت و اکسیژن نیز بوده است. بالاترین دمای پیش‌گرم مربوط به شعله با نسبت هم‌ارزی ۱/۶۹ است. پس از آن دما در آزمایش‌های با نسبت هم‌ارزی ۲/۲۶ و ۱/۹۴ بیشترین مقدار را دارد و تقریباً برابر است. همچنین رشد دمای زیر محفظه‌ی احتراق در آزمایش با نسبت‌های هم‌ارزی ۳/۳۹ و ۲/۷۱ کمترین مقدار را دارد و تقریباً برابر است. آزمایش با نسبت هم‌ارزی ۲/۷۱ رشد بیشتری نسبت به آزمایش با نسبت هم‌ارزی ۳/۳۹ دارد. همانطور که در بالا گفته شد تابش رادیکال‌های CO₂ و OH بیانگر خوبی از حرارت آزاد شده در اثر احتراق هستند. در شکل ۱۴ و ۷ به ترتیب تغییرات این دو رادیکال در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف و زمان‌های مختلف نمایش داده شده است. در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود شعله با نسبت هم‌ارزی ۱/۶۹ که بیشترین تابش CO₂ و OH را در بین آزمایش‌ها داشته است، بیشترین انتقال حرارت به محفظه‌ی احتراق و افزایش دما را نیز داشته است. همچنین در با گذر زمان در تمامی واکنش‌ها تابش CO₂ و OH کاهش پیدا کرده است. شکل ۱۸ نیز نشان می‌دهد که با گذر زمان، تغییرات دمای محفظه‌ی احتراق نیز کاهش یافته است.



شکل ۱۸: نمودار تغییرات دمای زیر محفظه‌ی احتراق در آزمایش‌های مختلف

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 هم ارزی
	زیرنویس‌ها
f	سیال
	بالانویس‌ها
*	شرایط مرجع

مراجع

- [11] De Moraes Flores, É.M., Medeiros Nunes, A., Luiz Dressler, V., Dédina, 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.
- [12] Mancaruso, E., Vaglieco, B.M., 2011, Spectroscopic measurements of premixed combustion in diesel engine, *Fuel*, 90(2), 511-520.
- [13] Pastor, J.V., García-Oliver, J.M., García, A., Micó, C., Durrett, R., 2013, A spectroscopy study of gasoline partially premixed compression ignition spark assisted combustion, *Applied Energy*, 104, 568-575.
- [۱۴] اسکندری، ف.، ۱۳۹۸، بررسی آزمایشگاهی پارامترهای حرارتی در مشعل شعله سطحی با استفاده از طیف سنجی تابشی، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۱۵] فرحمنند، ف.، ۱۳۹۸، بررسی آزمایشگاهی میدان دمای شعله با استفاده از طیف سنجی تابشی طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس.
- [1] Sarrafan Sadeghi, S., Tabejamaat, S., Baigomohammadi, 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.
- [۲] 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.
- [۳] صرافان صادقی، س.، تابع جماعت، ص.، بیگ محمدی، م.، ۱۳۹۲، بررسی اثر نسبت رقیق سازی اختلاط بر پایداری شعله در محفظه احتراق مزو مقیاس، بیست و یکمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران.
- [4] 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.
- [5] Józsa, V., 2016, Application of lean premixed prevaporized burner for renewable fuels, *Environmental Science*.
- [6] Carter, C.D., King, G.B., Laurendeau, N.M., 1989, A combustion facility for high-pressure flame studies by spectroscopic methods, *Review of Scientific Instruments*, 60(8), 2606-2609.
- [7] Heland, J., Schafer, K., 1998, Determination of major combustion products in aircraft exhausts by ftir emission spectroscopy, *Atmospheric Environment*, 32, 367-372.
- [8] 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.
- [9] Brackmann, C., Bood, J., Afzelius, M., Bengtsson, P.E., 2004, Thermometry in internal combustion engines via dual-broadband rotational coherent anti-Stokes Raman spectroscopy, *Measurement Science and Technology*, 15(3), 13-25.
- [10] Weiser, V., Eisenreich, N., 2005, Fast Emission Spectroscopy for a Better Understanding of Pyrotechnic Combustion Behavior, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 30(1), 67-78.