مجموعه مقالات دهمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
۱ تا ۳ اسفند ۱۴۰۲، ایران، تهران، دانشگاه تهران
FCCI-2024-1026

احتراق میکرو در یک سوئیس-رول جدید جریان متقابل: بررسی تجربی رفتار شعله متان-اکسیژن به کمک طیف‌سنجی و پردازش تصویر RGB

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، sina.nariman.a@gmail.com

چکیده
این مطالعه یک میکرو احتراق سوئیس-رول جدید با یک شعله جریان متقابل غیر مخلوط شده برای بهبود پایداری شعله و گسترش پیش‌گرمایش و بازیابی حرارت در محفظه‌های احتراق میکرو پیشنهاد می‌کند. این تحقیق بر روی دینامیک شعله و پارامترهای احتراق یک شعله متان-اکسیژن در یک سیستم احتراق جدید در دمای محفظه آلومینیومی ثابت در طول زمان برای نسبت‌های هم ارزی مختلف، از ۱.۵۰ تا ۳.۳۸، با استفاده از روش‌های طیف‌سنجی و عکاسی متمرکز است. نتایج نشان می‌دهد رشد شعله تحت تأثیر نسبت هم ارزی، سرعت سوختن، اثر دیواره و انتقال حرارت است. این نوع احتراق به‌عنوان احتراق میکرو و شعله خنک طبقه‌بندی می‌شود. رفتار گونه‌های، CH^* و C_2^* به پارامترهای مختلفی مانند نسبت هم ارزی، نسبت سرعت جریان جرمی سوخت به اکسیژن و دینامیک شعله بستگی دارد. علاوه بر این، مطالعه نشان می‌دهد که روش پردازش تصویر به کمک RGB عکس شعله به‌عنوان یک روش ارزان و ساده برای تشخیص تغییرات رفتاری گونه‌های، CH^* و C_2^* شدت تابش روشنایی مناسب و کاربردی هست.

کلمات کلیدی: احتراق میکرو، محفظه‌های تخت، بازیاب حرارتی، متان، اکسیژن، پردازش تصویر.

مقدمه

با توسعه کار بر روی سیستم های میکرو الکترومکانیکی نیاز به دست یابی به منبع انرژی کوچک، پایدار و قابل حمل بسیار احساس می شود. استفاده از محفظه های میکرو و احتراق میکرو به عنوان یک راه حل مناسب به این نیاز در نظر گرفته می شود. این محفظه‌های احتراق کوچک، منابع بسیار خوبی برای تأمین انرژی تجهیزات در مقیاس میکرو و مزو هستند[1]. 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. درصورتی‌که 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[3] ,[2]. با توجه به تحقیقات آزمایشگاهی پیشین صورت گرفته از منظر احتراق کلاسیک، ایجاد احتراق در ابعادی که نزدیک به فاصله یا قطر خاموشی هستند نمی توان احتراق پایدار ایجاد کرد[4]. 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 هست. در نزدیکی یک سطح جامد، اتلاف گرما به‌قدری زیاد است که فروکشی یا خاموشی شعله رخ خواهد داد[5] ,[4]. 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[6]. محفظه‌های احتراق میکرو در انواع سیستم های میکرو الکترومکانیکی و هر سیستمی که نیاز به تولید توان در آن‌ها وجود داشته باشد قابل‌استفاده هستند[8] ,[7].

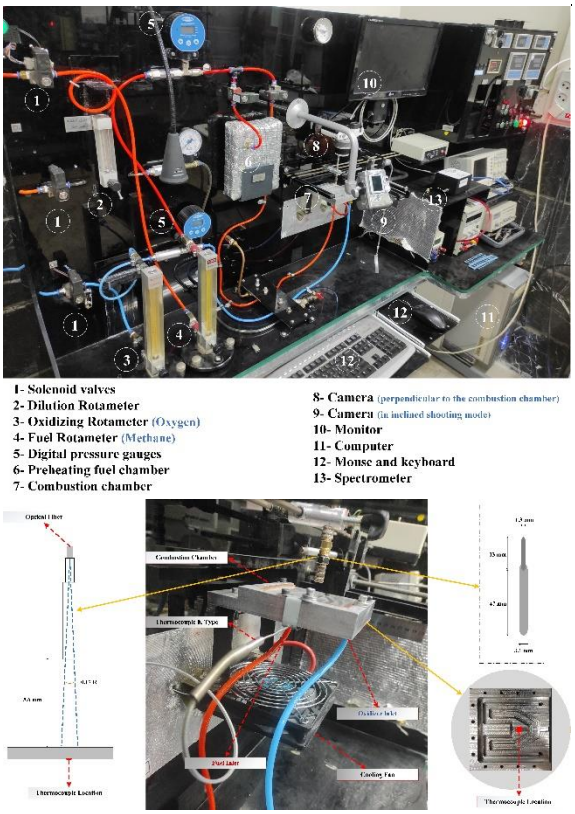
طیف‌سنجی روشی است که امکان اندازه‌گیری طول‌موج و شدت نور را ممکن ساخته است. در مطالعه‌ی احتراق، با استفاده از طیف‌سنج مشخصات شعله بررسی می‌شود. احتراق باعث برانگیختگی رادیکال‌های احتراقی می‌شود، رادیکال‌ها پس از بازگشت از حالت برانگیخته به حالت قبل، نور در طول‌موج‌های مشخص از خود منتشر می‌کنند[9]. در شرایط مختلف، غلظت رادیکال‌های برانگیخته متفاوت است و درنتیجه 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 طیف‌سنج نسبت به روش‌های تماسی مزایایی دارد. به‌منظور اندازه‌گیری دمای محفظه‌ی احتراق در شرایطی که دمای شعله‌ی 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[10].

سیتزکی و همکارانش[11] احتراق در یک محفظه احتراق خرد مارپیچی را با استفاده از یک دیواره کاتالیست موردبررسی قراردادند؛ آن‌ها در تحقیقات خود نشان دادند که اگر عدد رینولدز جریان کمتر از ۲۰ باشد می‌توان احتراق مناسبی را در این نوع محفظه احتراق میکرو شاهد بود. ژائو و همکاران[12] ویژگی‌های شعله میکرو پیش مخلوط پروپان/هوا، در یک احتراق متخلخل با جریان مخالف را موردبررسی قراردادند و دریافتند که در این نوع احتراق به‌طور مؤثر می‌توان با حفظ دمای یکنواخت بر روی دیوار خارجی به تثبیت محل شعله کمک نمایند. 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 می‌تولند کمک نماید تا شعله باوجود کاهش سرعت جریان مخلوط ورودی در موقعیت خود تثبیت شود. تشخیص شعله با استفاده از تصاویر RGB برای اولین بار توسط هانگ و همکاران[13] معرفی شد. متعاقباً نجارنیکو و همکاران[14] تفاوت بین شعله‌های پیش مخلوط در شرایط سوخت کم و غنی برای شعله‌های غیر پیش مخلوط را بررسی کردند.

روش و تجهیزات آزمون

آزمایش‌های مربوط به این تحقیق بر روی شعله استند آزمایشگاهی احتراق میکرو[16] ,[15] مستقر در آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشگاه صنعتی امیرکبیر صورت گرفت است. کلیه سیستم‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری شامل،

سیستم اندازه‌گیری دبی سوخت و اکسنده، ترموکوپل و طیف‌سنج مورداستفاده کالیبره گردیده‌اند. در شکل ۱ نمایی از محفظه مورد آزمون و تجهیزات نشان داده‌شده است.



شکل ۱: نمایی از محفظه و مجموعه مورداستفاده

برای این تحقیق فیبر نوری طیف‌سنج مورداستفاده عمود بر شعله در به کمک بازو نگه‌دارنده در فاصله‌ی ثابت قرارگرفته است. شکل ۱ یک بستر میکرو احتراق ضد جریان آلومینیومی سوئیس-رول را نشان می‌دهد که برای شعله‌های غیر مخلوط طراحی‌شده است. محفظه به سه قسمت اصلی تقسیم می‌شود: ورودی‌های سوخت و اکسیدکننده، منطقه اختلاط که در آن سوخت و اکسیدکننده یک شعله غیر مخلوط را تشکیل می‌دهند و بخش انتقال حرارت که در آن گرما به دیوار منتقل می‌شود تا جریان ورودی پیش گرم شود. پیش گرم کردن جریان‌های ورودی باعث بهبود تعادل حرارتی و پایداری احتراق می‌شود. یک پنجره کوارتز در سمت بالایی محفظه برای تجسم شعله و جمع‌آوری داده‌ها قرار دارد. راکتور به‌صورت افقی روی بستر آزمایش نصب می‌شود. منطقه اختلاط دارای طول ۲۹.۱ میلی‌متر، عرض ۵ میلی‌متر و ارتفاع ۵ میلی‌متر است. این پیکربندی به‌ویژه برای سیستم‌های پیشرانه مانند پیشرانه‌های میکرو شیمیایی طراحی‌شده است. شکل ۳ مکان‌های فن خنک‌کننده، ترموکوپل و پروب طیف‌سنج را نشان می‌دهد. ترموکوپل در فاصله ۷ میلی‌متری از منطقه احتراق قرار می‌گیرد. طیف‌سنج مورداستفاده در این مطالعه مدل V900 شرکت فناوران فیزیک نور هست. کاوشگر طیف‌سنج عمود بر شعله در فاصله ثابت ۱۱۶ میلی‌متر از آن قرارگرفته است. برای اطمینان از پایداری و به حداقل رساندن اختلالات محیطی، از لوله‌ای استفاده می‌شود که زاویه دید را از ۰.۲۲ رادیان به ۰.۱۷ رادیان کاهش می‌دهد. این طیف‌سنج نور شعله را از یک ناحیه دایره‌ای با شعاع ۸.۸۹ میلی‌متر و زمان نوردهی ۱۰ ثانیه جمع‌آوری کرد. دمای محفظه احتراق و طول شعله نیز با استفاده از داده‌های طیف‌سنج به‌طور هم‌زمان ثبت می‌شوند. دوربین دیجیتال مورداستفاده برای عکاسی Canon PowerShot G16 12.1 MP CMOS است.

در تمام آزمایش‌ها از متان درجه پنج و اکسیژن درجه چهار به‌عنوان سوخت و اکسیدکننده استفاده می‌شود. قابل‌ذکر است که در این تحقیق ازآنجایی‌که شعله از قبل مخلوط نشده است، نسبت هم ارزی (φ) به نسبت سوخت به ورودی‌های اکسیژن به حالت استوکیومتری آن‌ها اشاره دارد. در تمام آزمایش‌ها، سرعت جریان سوخت ثابت است. نسبت سوخت به اکسیدکننده در جدول ۱ گزارش‌شده است.

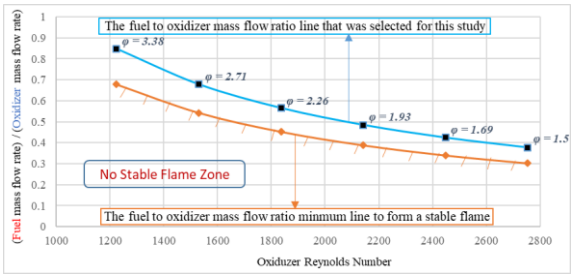
جدول ۱: نرخ جریان سوخت-اکسیژن، سرعت و نسبت هم ارزی برای همه آزمایش‌ها.

Test Number	(SLM)$\dot{Q}_f$	(SLM)$\dot{Q}_o$	Re_f	Re_o	φ
1	7.01	3.80	1927	1224	3.38
2	7.01	4.76	1927	1530	2.71
3	7.01	5.71	1927	1836	2.26
4	7.01	6.66	1927	2142	1.93
5	7.01	7.61	1927	2448	1.69
6	7.01	8.56	1927	2754	1.50

$\dot{Q}_o$، نرخ جریان سوخت؛ $\dot{Q}_o$، نرخ جریان اکسیژن؛ Re_f، عدد سوخت رینولدز؛ Re_o، عدد رینولدز اکسیژن؛ φ، نسبت هم ارزی.

بررسی ویژگی‌های شعله

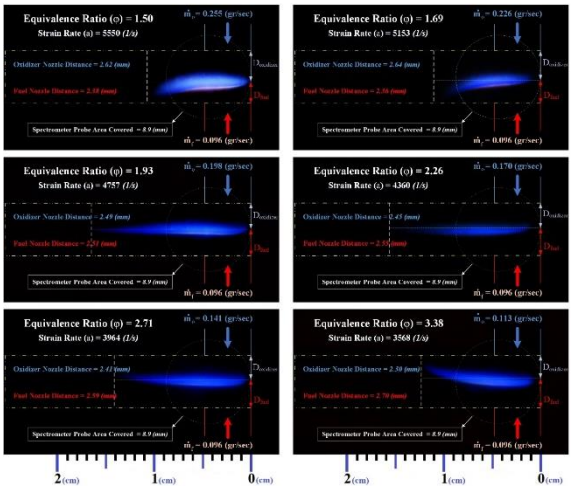
شکل ۲ همبستگی بین نسبت هم ارزی سوخت به اکسیژن و عدد رینولدز و همچنین خط پایداری شعله را نشان می‌دهد. کار کردن در زیر این خط منجر به شعله‌های کوچک ناپایدار به دلیل نوسانات یا نسبت‌های هم ارزی نامناسب می‌شود؛ بنابراین، برای تشکیل شعله پایدار و منطبق با دقت سیستم، خط دوم برای این مطالعه انتخاب‌شده است. علاوه بر این، عدد رینولدز در جریان آرام و نسبت هم ارزی سوخت به اکسیژن، پارامترهای مهم در احتراق میکرو هستند. شایان‌ذکر است که نرخ اتلاف حرارت در احتراق میکرو به عدد رینولدز وابسته است، زیرا گرادیان دما باعث تلفات حرارتی می‌شود. بااین‌حال، نرخ انتشار گرما متناسب با نسبت هم ارزی و عدد رینولدز است و با جرم سوخت مصرفی رابطه مستقیم دارد[17].



شکل ۲: همبستگی بین نسبت دبی جرمی سوخت به اکسیژن و عدد رینولدز و همچنین خط پایداری شعله

شکل ۳ شکل شعله را برای نسبت‌های هم ارزی مختلف از ۱.۵۰ تا ۳.۳۸ نشان می‌دهد. ازآنجایی‌که جریان در محفظه احتراق خلاف جریان است، شعله ویژگی‌های یک شعله خلاف جریان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده‌شده است، برای نسبت جریان جرم سوخت به اکسیژن کمتر از ۰.۵ (نسبت هم ارزی معادل ۱.۵۰ الی ۱.۶۹)، شعله به سمت ورودی سوخت گسترش می‌یابد. نسبت‌های هم ارزی ۱.۹۳ الی ۲.۲۶ که در آن نسبت نرخ جریان جرمی نزدیک به ۰.۵ است، هیچ ازدیاد طولی را نشان نمی‌دهند. بااین‌حال، برای نسبت‌های جرم سوخت به اکسیژن بالاتر

(نسبت‌های هم ارزی ۲.۷۱ الی ۳.۳۸)، شعله به دلیل سرعت جریان جرمی بالاتر به سمت جریان اکسیژن کشیده می‌شود که منجر به یک تکانه جریان بالاتر و تسلط بر جریان با جریان کمتر می‌شود. خطای داده‌های استخراج‌شده بر اساس تصویر در حدود ۵ درصد تخمین زده می‌شود.



شکل ۳: شکل شعله را برای نسبت‌های هم ارزی مختلف از ۱.۵۰ تا ۳.۳۸ نشان می‌دهد.

بررسی ویژگی‌های شعله به کمک روش پردازش تصویر RGB و مقایسه با داده‌های طیف‌سنج

داده‌ها پس از رسیدن به دمای محفظه ثابت ۳ ± ۵۰ درجه سانتی‌گراد جمع‌آوری می‌شوند. این مطالعه برشدت روشنایی و همچنین تغییرات در انتشار رادیکال متمرکز بود بر اساس روش پردازش تصویر RGB و مقایسه آن با داده‌ای به‌دست‌آمده از طیف‌سنج قرار دارد. جهت استفاده از این روش به شکل اختصاصی در زبان برنامه نویسی پایتون[1] کدی توسعه یافت و بر اساس کد توسعه یافته تحلیل ها و داده‌های مرتبط استخراج گردید.

تأثیر نسبت هم ارزی سوخت به اکسیژن بر تولید رادیکال‌های CH^*، C_2^* و شدت تابش نور مرئی

در احتراق متان با اکسیژن، نسبت هم ارزی سوخت به اکسیژن تأثیر قابل‌توجهی بر تولید رادیکال‌های CH^* و C_2^* و شدت تابش نور مرئی دارد[18], [19].

ϕ=1.69, 1.5، در نسبت هم‌ارزی غنی از سوخت منجر به تشکیل یک منطقه غنی از سوخت در نزدیکی دیواره ورودی سوخت می‌شود. ولی به دلیل نسبت جرمی کم سوخت به اکسیژن شعله به سمت ورودی سوخت منحرف گردیده است و با دیواره‌های محفظه از سمت ورودی سوخت تماس دارد. رادیکال‌های CH^* و C_2^* به‌سرعت تولید می‌شوند. لازم به ذکر است که رادیکال‌های OH^*، CH^* و C_2^* می‌توانند به‌سرعت با یکدیگر واکنش داده و محصولات احتراق مانند متانول (CH_3OH)، اتانول (C_2H_5OH) و فوران (C_4H_8O) تولید کنند. این محصولات احتراق می‌توانند به‌سرعت با اکسیژن واکنش داده و مولکول آب تولید کنند.

$$CH_4 + O_2 \rightarrow CH_3^{\bullet} + H^{\bullet} + HO^{\bullet} \quad (۱)$$

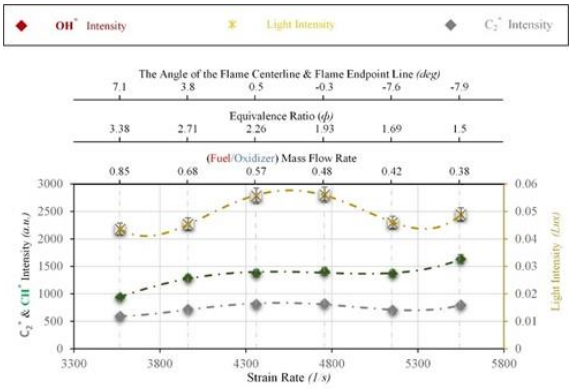
$$CH_3^{\bullet} + HO^{\bullet} \rightarrow CH_2^{\bullet} + H_2O \quad (۲)$$

$$CH_2^{\bullet} + H^{\bullet} \rightarrow H_2O \quad (۳)$$

ϕ=2.26, 1.593، مقدار سوخت و اکسیژن موجود متعادل است. این امر منجر به تشکیل یک شعله پایدار و یکنواخت می‌شود. در این نسبت هم ارزی، میزان تولید مولکول آب بیشتر از نسبت هم‌ارزی ۱.۶۹ و ۱.۵ است. این به این دلیل است که رادیکال‌های CH^* و C_2^* کمتر با یکدیگر واکنش می‌دهند و بیشتر با اکسیژن واکنش می‌دهند تا مولکول آب تولید کنند.

ϕ=3.38, 2.71، تولید رادیکال‌های CH^* و C_2^* در این نسبت هم ارزی کم است. این به این دلیل است که رادیکال‌های CH^* و C_2^* کمتر می‌توانند با اکسیژن واکنش دهند. همان‌گونه که در شکل ۴ مشخص است قسمت نزدیک به دیواره به رنگ زرد در حال سوختن هست که خود نشان از ناقص سوزی و اختلاط نامناسب سوخت و اکسیژن است در این منطقه نیز هست.

درمجموع، مشاهدات انجام‌شده نشان می‌دهد که نسبت هم ارزی سوخت به اکسیژن و اثر دوری و نزدیکی به دیواره که وابسته به نسبت دبی جرمی سوخت به اکسیژن است تأثیر قابل‌توجهی بر تولید رادیکال‌های CH^* و C_2^* دمای شعله و شدت تابش نور مرئی دارد.



شکل ۴: تغییرات شدت تابش نور مرئی به همراه رادیکال‌های CH^* و C_2^*.

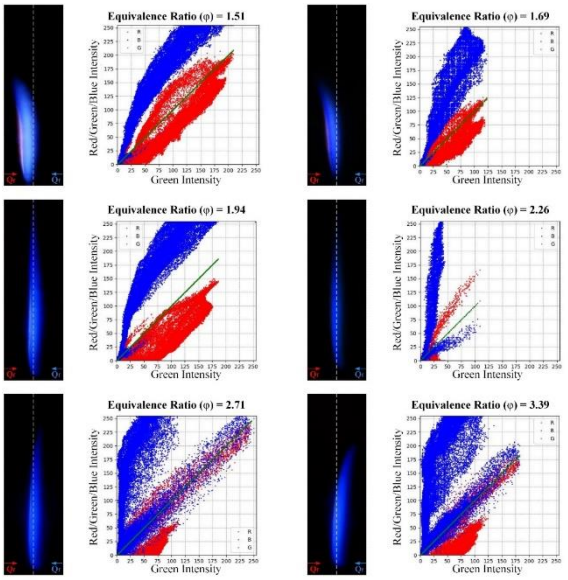
تجزیه‌وتحلیل شعله با استفاده از روش پردازش تصویر RGB

تکنیک RGB برای بررسی رفتار شعله و ایجاد رابطه آن با نسبت هم ارزی و نرخ کرنش استفاده می‌شود. دوربین CCD تصاویر RGB را می‌گیرد که از سه ماتریس دوبعدی تشکیل‌شده است که نشان‌دهنده کانال‌های قرمز، سبز و آبی است. این تصاویر به‌عنوان تصاویر کلاس ۳ با عمق ۸ بیت طبقه‌بندی می‌شوند. مطالعه حاضر یک رویکرد جدید است که این روش را برای بررسی شعله‌های میکرو غیر مخلوط شده و همچنین شدت روشنایی و پارامترهای دینامیکی شعله احتراق میکرو به کار می‌گیرد.

شکل ۵ منحنی دوبعدی را برای هر پیکسل RGB به G در هر پیکسل برای شعله‌های ریز احتراق موردمطالعه نشان می‌دهد. مقدار دوده تولیدشده با تعداد اتم‌های کربن در سوخت‌های هیدروکربنی نسبت مستقیم دارد. متان که سبک‌ترین سوخت هیدروکربنی است، کمترین مقدار دوده را تولید می‌کند[20]. بنابراین، همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، C_2^* دستخوش تغییرات حداقلی می‌شود و آن را به یک کانال رنگی مناسب برای محور x تبدیل می‌کند. شدت کانال سبز با C_2^* در یک الگوی مشابه ازنظر طول خط و شدت فشرده‌سازی تغییر می‌کند. به‌طورکلی، نرخ تغییر C_2^* دارای حداقل تغییرات بر اساس نوع سوخت و نسبت هم ارزی است. علاوه بر این، با کاهش نسبت هم ارزی پراکندگی، شدت کانال آبی کاهش می‌یابد.

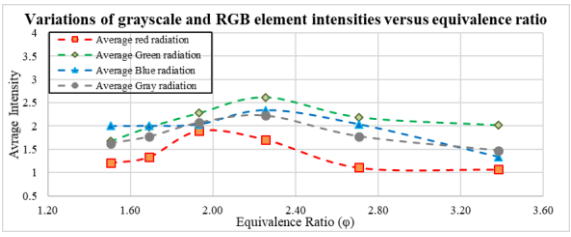
[1] Python

برعکس، شدت کلی این کانال با افزایش سرعت جریان جرمی اکسیدکننده افزایش می‌یابد. چگالی پراکندگی هر پیکسل کاهش می‌یابد و درنتیجه ظاهری متراکم‌تر ایجاد می‌شود. نموداری که نسبت هم ارزی ۲.۲۶ را نشان می‌دهد، کمترین چگالی پراکندگی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده وجود حداقل ذرات دوده در احتراق و پس‌زمینه عکس است. اساساً، پراکندگی کانال آبی-سبز با شدت تابش رادیکال C_2^*، محل شعله و شکل آن ارتباط دارد. شایان‌ذکر است که در این نسبت هم ارزی، خط سبز نشان‌دهنده سوخت نسوخته کمترین طول را دارد؛ بنابراین، شعله کاملاً افقی با کمترین انحراف شکل ظاهر می‌شود و کمترین تأثیر را از دیوار اطراف می‌گیرد.



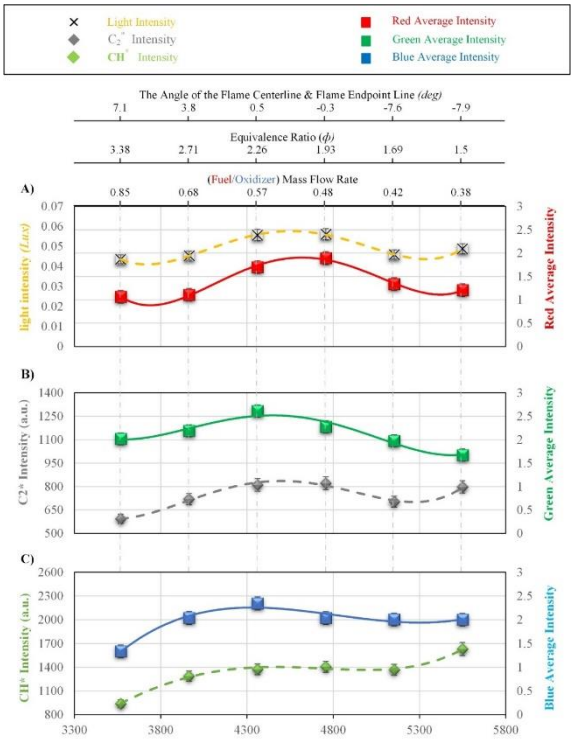
شکل ۵: منحنی دوبعدی برای RGB در مقابل مؤلفه G در هر پیکسل نرمال شده و تصویر شعله برای نسبت‌های هم ارزی مختلف.

شکل ۶ میانگین شدت تمام پیکسل‌ها در هر تصویر را بر اساس کانال‌های قرمز، سبز و آبی مربوطه آن‌ها در نسبت‌های هم ارزی مختلف نشان می‌دهد. برای اطمینان از صحت داده‌ها، شش تصویر از هر شعله برای هر نسبت هم ارزی گرفته می‌شود و میانگین آن‌ها محاسبه می‌شود. محور عمودی در نمودار نشان‌دهنده مقادیر میانگین پیکسل همه تصاویر برای هر نسبت هم ارزی است، همان‌طور که در شکل نشان داده‌شده است. یک مشاهدات قابل‌توجه از شکل ۷ رابطه معکوس بین میانگین تعداد پیکسل‌های پوشیده شده توسط کانال آبی و نسبت سرعت جریان جرمی سوخت به اکسیدکننده است. به‌طور خاص، زمانی که نرخ جریان جرمی سوخت و اکسیدکننده تقریباً برابر با نصف باشد، میانگین شدت کانال آبی در تصویر به بالاترین مقدار خود می‌رسد. بااین‌حال، این حالت مربوط به پایین‌ترین سطح پوشش در نمودار ارائه‌شده در شکل ۷ است. کانال‌های رنگ دیگر نیز روند مشابهی را نشان می‌دهند.



شکل ۶: تغییرات مقیاس خاکستری و شدت عناصر RGB در نسبت‌های مختلف هم ارزی.

یافته‌های این مطالعه نشان‌دهنده همبستگی قوی و مستقیم بین CH^*و C_2^* به ترتیب با میانگین شدت کانال‌های B و G است. این نتایج با نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات قبلی[22] ,[21] ,[14] مطابقت دارد. شایان‌ذکر است که کانال R به دلیل نزدیکی به طول‌موج مبتنی بر لوکس‌متر (۵۶۰ نانومتر) ارتباط قابل‌توجهی با شدت روشنایی نشان می‌دهد. این نشان می‌دهد که تجزیه‌وتحلیل کانال R می‌تواند بینشی در مورد رفتار روشنایی شعله ارائه دهد (شکل ۷-A). علاوه بر این، شدت شعله تحت تأثیر عوامل دیگری مانند دما و رفتار H_2O^* است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، تغییرات در کانال سبز منعکس‌کننده تغییرات در C_2^* با طول‌موج در محدوده سبز (۴۷۱ و ۵۱۶ نانومتر) است (شکل ۷-B). به‌طور مشابه، تغییرات در کانال آبی مربوط به تغییرات در رادیکال CH^* با طول‌موج ۴۳۱ نانومتر است که در محدوده کانال آبی قرار دارد (شکل ۷-C).



شکل ۷: تغییرات رادیکال‌ها و شدت RGB جهت رادیکال‌های CH^*، C_2^*و شدت روشنایی در نسبت هم ارزی‌های مختلف.

نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه، این مطالعه دینامیک شعله و پارامترهای احتراق میکرو یک محفظه شعله متان-اکسیژن از پیش مخلوط نشده را در یک سیستم میکرو احتراق در یک محفظه سوئیس-رول جدید در دمای ثابت را بررسی کرد. این شعله به دلیل دمای پایین، تشعشعات آبی ضعیف و انتقال حرارت زیاد به دیوارها در زمره شعله‌های خنک طبقه‌بندی می‌شود. رفتار رادیکال‌هایی مانند CH^* و C_2^* در دمای ثابت محفظه مشاهده می‌شود. شدت تابش این رادیکال‌ها بیشتر به نسبت هم ارزی بستگی دارد.

نتایج این مطالعه یک همبستگی قوی و مستقیم بین CH^* و C_2^* و میانگین شدت کانال‌های آبی و سبز را به ترتیب نشان می‌دهد که با مطالعات قبلی مطابقت دارد. روش پردازش تصویر به کمک RGB عکس شعله به‌عنوان یک روش ارزان و ساده برای تشخیص تغییرات رفتاری گونه‌های C_2^* و CH^*، شدت تابش روشنایی مناسب و کاربردی هست.

مراجع

[1] I. A. Waitz, G. Gauba, and Y.-S. Tzeng, "Combustors for Micro-Gas Turbine Engines," *J. Fluids Eng.*, vol. 120, no. 1, pp. 109–117, Mar. 1998, doi: 10.1115/1.2819633.

[2] H. Davy, "VII. Some researches on flame," *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 107, pp. 45–76, Jan. 1997, doi: 10.1098/rstl.1817.0008.

[3] P. Aghalayam, P.-A. Bui, and D. G. Vlachos, "The role of radical wall quenching in flame stability and wall heat flux: hydrogen-air mixtures," *Combust. Theory Model.*, vol. 2, no. 4, pp. 515–530, Dec. 1998, doi: 10.1088/1364-7830/2/4/010.

[4] M. Nauman, J. Pan, Y. Wang, F. Li, A. Oluwaleke Ojo, and A. Raza, "A review of recent advancements in micro combustion techniques to enhance flame stability and fuel residence time," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 1165–1193, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.050.

[5] H. Gao *et al.*, "Experimental study of a mesoscale combustor-powered thermoelectric generator," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 507–517, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.016.

[6] J. F. Griffiths and J. A. Barnard, *Flame and Combustion*, 3th ed. Routledge, 2019. doi: https://doi.org/10.1201/9780203755976.

[7] Al. Zargarbashi, S. Tabejamaat, S. Sarrafan Sadeghi, 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 Mech. Eng.*, vol. 20, no. 12, pp. 2697–2705, 2020, [Online]. Available: http://mme.modares.ac.ir/article-15-43004-en.html

[8] Al. 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 Mech. Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 213–223, 2022, doi: http://10.52547/mme.22.4.213.

[9] J. Ballester and T. García-Armingol, "Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, no. 4, pp. 375–411, 2010, doi: 10.1016/j.pecs.2009.11.005.

[10] V. Józsa, "Application of lean premixed prevaporized burner for renewable fuels," 2016. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133006384

[11] L. Sitzki, K. Borer, S. Wussow, E. Maruta, and P. Ronney, "Combustion in microscale heat-recirculating burners," in *39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, in Aerospace Sciences Meetings. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001. doi: doi:10.2514/6.2001-1087.

[12] Q. Wang, Y. Zhang, and C. Y. Zhao, "Experimental investigation of coflow effect on the ignition process of a methane jet diffusion flame," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 91, no. June 2017, pp. 184–196, 2018, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.10.016.

[13] H. W. Huang and Y. Zhang, "Flame colour characterization in the visible and infrared spectrum using a digital camera and image processing," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 8, Aug. 2008, doi: 10.1088/0957-0233/19/8/085406.

[14] M. Najarnikoo, M. Z. Targhi, and H. Pasdarshahri, "Experimental study on the flame stability and color characterization of cylindrical premixed perforated burner of condensing boiler by image processing method," *Energy*, vol. 189, p. 116130, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116130.

[15] S. Sarrafan Sadeghi, S. Tabejamaat, and M. Baigmohammadi, "Laboratory test bed of micro-combustion in micro and meso scale reactor," 80027, 2013 [Online]. Available: https://ipm.ssaa.ir/Search-Result?page=1&DecNo=13915014000310519&RN=80027

[16] S. Sarrafan Sadeghi, "An Experimental Study of the Micro-Combustion Chamber," Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), 2013. [Online]. Available: http://digitallib.aut.ac.ir/dl/search/default.aspx?Term=26006&Field=0&DTC=383

[17] J. H. Cho, C. S. Lin, C. D. Richards, R. F. Richards, J. Ahn, and P. D. Ronney, "Demonstration of an external combustion micro-heat engine," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 32 II, no. 2, pp. 3099–3105, 2009, doi: 10.1016/j.proci.2008.07.017.

[18] C. S. Panoutsos, Y. Hardalupas, and A. M. K. P. Taylor, "Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using OH* and CH* chemiluminescence in premixed and non-premixed methane-air flames," *Combust. Flame*, vol. 156, no. 2, pp. 273–291, 2009, doi: 10.1016/j.combustflame.2008.11.008.

[19] N. A. K. Doan and N. Swaminathan, "Analysis of Markers for Combustion Mode and Heat Release in MILD Combustion Using DNS Data," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 191, no. 5–6, pp. 1059–1078, Jun. 2019, doi: 10.1080/00102202.2019.1610746.

[20] H. A. Dandajeh, N. Ladommatos, P. Hellier, and A. Eveleigh, "Influence of carbon number of C1–C7 hydrocarbons on PAH formation," *Fuel*, vol. 228, pp. 140–151, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.133.

[21] A. Javareshkian, S. Tabejamaat, S. Sarrafan-Sadeghi, and M. Baigmohammadi, "An experimental study on the effects of swirling oxidizer flow and diameter of fuel nozzle on behaviour and light emittance of propane-oxygen non-premixed flame," *Therm. Sci.*, vol. 21, no. 3, pp. 1453–1462, 2017, doi: 10.2298/TSCI140706210J.

[22] J. Todd, *Digital image processing (second edition)*, vol. 8, no. 1. 1988. doi: 10.1016/0143-8166(88)90012-7.