

مطالعه تجربی تشکیل هسته خوداشتعالی تصادفی در جت

سعیدرضا زادسیرجان^۱، صادق تابع جماعت^{۲*}، مسعود عیدی عطارزاده^۳

۱- دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، s_zadsirjan@aut.ac.ir

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

۳- دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، eidiattar@aut.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۴، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲)

چکیده: شکل‌گیری هسته خوداشتعالی ناشی از جت گاز دما بالا با استفاده از روش تجربی انجام شده است. ترکیبات جت، محصولات احتراق غنی از سوخت هستند که ناشی از احتراق گاز طبیعی و هوا با نسبت هم‌ارزی غنی از سوخت در یک محفظه احتراق است. اختلاط جت دما بالا با ترکیبات قابل اشتعال با هوای محیط در شرایط محلی مناسبی می‌تواند منجر به خوداشتعالی شود. جت گاز داغ از یک طریق یک لوله با قطر ۱۳ و ۲۰ میلی‌متر به هوا تخلیه می‌شود. عدد رینولدز جت، نسبت هم‌ارزی محفظه احتراق و دمای جت متغیرهای اصلی در این مطالعه‌اند. با استفاده از فیلم‌برداری سرعت‌بالا پدیده تشکیل هسته خوداشتعالی آشکارسازی شده است. مشاهدات نشان می‌دهند که رفتار تشکیل شعله یا هسته خوداشتعالی و همچنین خاموشی و عدم وقوع اشتعال را می‌توان به پنج دسته طبقه‌بندی کرد: ۱- بدون احتراق ۲- شعله نفوذی چسبیده به نازل ۳- شعله نفوذی برخاسته ۴- شعله نفوذی ناپایدار ۵- تشکیل هسته خوداشتعالی تصادفی. موضوع اصلی این آزمایش بررسی دسته پنجم است. عمر هسته خوداشتعالی، محل وقوع، و فرکانس شکل‌گیری با کمک تصویربرداری سرعت‌بالا و پردازش تصویر توسط کد توسعه‌یافته در آزمایشگاه احتراق دانشگاه امیرکبیر پس پردازش شده است.

کلیدواژه‌گان: هسته خوداشتعالی، جت آشفته، تست تجربی، اشتعال، خاموشی

مقدمه

روش اشتعال موتور احتراق داخلی با استفاده از جت گاز آشفته (TJI^1) یکی از روش‌های در دست توسعه برای افزایش بازده فرایند اشتعال است. جت مورد استفاده در این روش، محصولات احتراق رقیق تولیدشده در یک محفظه‌اند. استفاده از جت محصولات احتراق برای اشتعال موتور احتراق داخلی منجر به افزایش بازده موتور و کاهش میزان NOx تولیدی خواهد شد [۱-۳].

سطح بیشتر یک جت داغ در قیاس با یک جرعه می‌تواند موجب افزایش تعداد هسته‌های اشتعال شود. در نتیجه این روش می‌تواند منجر به افزایش سرعت سوزش و انتشار شعله در مقایسه با سیستم جرعه زن شود [۴-۷]. همچنین تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از این روش می‌تواند حد اشتعال رقیق را کاهش دهد [۸، ۹]. روش TJI برای سیستم‌های احتراقی گوناگونی مانند موتورهای انفجار پالسی (PDE^2) و موتور احتراق داخلی ($HCCI^3$) مرجع [۱۰]، محفظه احتراق مافوق صوت مرجع [۱۱]، محفظه پیش‌آمیخته و پیش‌تبخیره شده (LPP^4) مرجع [۱۲] و احتراق رقیق گاز طبیعی کاربرد دارد.

1. Turbulent jet ignition
2. Pulse detonation engine
3. Homogeneous charge compression ignition
4. Lean premixed pre-vaporized

احتراق در محفظه کوچک متصل به محفظه اصلی شکل گرفته و محصولات احتراق به صورت جت آشفته از یک یا چند درگاه به محفظه اصلی تخلیه می‌شوند. فرایند احتراق توسط مکانیزم‌های اختلاط و مقیاس زمانی واکنش شیمیایی کنترل می‌شود که هر دو این متغیرها وابسته به ترکیب شیمیایی، دما و سرعت جت خروجی از محفظه‌اند [۱۳].

مطالعات عددی و تجربی مکانیزم احتراق جت آشفته را می‌توان به دو نوع عمده اشتعال پیش‌آمیخته و غیر پیش‌آمیخته تقسیم‌بندی کرد. پیکربندی اشتعال پیش‌آمیخته شامل یک جت داغ محصولات احتراق است که به صورت گذرا و پالسی به یک مخلوط پیش‌آمیخته در محفظه اصلی تخلیه می‌شود. در این پیکربندی احتمال اشتعال، انتشار شعله و حد رقیق اشتعال‌پذیری مخلوط مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد.

در پیکربندی اشتعال غیرپیش‌آمیخته، محفظه اصلی از اکسیدکننده یا سوخت پر می‌شود و جت نیز سوخت یا اکسنده یک گاز دما بالا است. در این پیکربندی مطالعه شکل‌گیری هسته خوداشتعالی، خاموشی و خواص اشتعالی سوخت و اکسنده مانند ترکیب شیمیایی و دما مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

باهدف بررسی مباحث ایمنی و ضد شعله بودن، فیلیپس، در سال ۱۹۷۲، به مطالعه کمینه قطر یک جت گازی گاز بی‌اثر برای اشتعال یک مخلوط سوخت - هوا پرداخت [۱۴]. یاماگوچی و همکاران، در سال ۱۹۸۵، اشتعال یک محفظه احتراق توسط جت را مورد مطالعه قراردادند و مشاهدات را به چهار الگو تقسیم‌بندی کردند: الف- اشتعال زنجیره شیمیایی، ب- اشتعال مخلوط، ج- اشتعال هسته شعله، د- شعله پیشانی [۱۵]. ویژگی جت آشفته تولید شده در محفظه در چندین مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. گنتس و همکاران، در سال ۲۰۱۵، آزمایشی برای مطالعه اثر قطر اریفیس^۵ بر عملکرد احتراق و مدت سوختن انجام دادند [۱۶، ۱۷].

غلامشیری و همکاران، در سال ۲۰۱۶، نقش نسبت هم‌ارزی مخلوط و قطر جت داغ را به‌طور تجربی بر روی یک دستگاه فشرده‌سازی سریع بررسی کردند [۱۸]. روستلیسبرگر و فاورات، در سال ۲۰۰۳، اثر جهت‌گیری و هندسه اریفیس تخلیه جت آشفته را بر روی عملکرد موتور مطالعه کردند [۱۹]. آلیسون و همکاران، در سال ۲۰۱۸، به‌طور تجربی و عددی، نوع سوخت، ترکیب مخلوط، اندازه اریفیس و محل اشتعال در محفظه اصلی را بررسی کردند [۲۰]. در این تحقیق از تصویربرداری رادیکال CH و OH برای تخمین فرایند خاموشی جریان جت به‌دلیل اتلاف حرارتی و کرنش آن در اریفیس استفاده شد.

گنتس و همکاران، در سال ۲۰۱۷، اثرات هندسه نازل را با استفاده از پروپان مایع و ایزو-اکتان به‌عنوان تزریق سوخت کمکی بررسی کردند [۲۱]. آن‌ها دریافتند که زمان خوداشتعالی در محفظه اصلی برای مخلوط غنی‌تر از سوخت کاهش یافته است. وو و همکاران، در سال ۲۰۱۸، یک آزمایش را برای مطالعه احتراق حجم ثابت مخلوط هوا - هیدروژن در اثر جت آشفته انجام دادند [۲۲]. این تحقیق نشان داد که احتراق جت داغ به‌طور قابل توجهی سرعت شعله در مخلوط رقیق را افزایش می‌دهد. سداندان و همکاران، در سال ۲۰۱۸، اشتعال یک مخلوط نزدیک به استوکیومتری هوا-هیدروژن با استفاده از یک جت گازی داغ از طریق یک نازل کوچک را بررسی کردند [۲۳]. از روش‌های تصویربرداری سرعت‌بالا^۶ LIF برای اندازه‌گیری رادیکال OH و روش سایه‌نگاری لیزری برای اندازه‌گیری فرایند زمانی و مکانی اشتعال استفاده شد. این مطالعه نشان داد که احتمال اشتعال با سرعت جت نسبت عکس و با قطر جت نسبت مستقیم دارد. افزون بر این، برهم‌کنش آشفته‌گی - شیمی جریان پدیده غالبی در فاصله شکل‌گیری هسته خوداشتعالی توسط جت گاز داغ است. احتمال وقوع شکل‌گیری هسته خوداشتعالی در مرکز و پیشانی جت بیشتر از لایه برشی جت است.

1. chemical chain ignition
2. composite ignition
3. Flame kernel torch ignition
4. Flame from torch ignition
5. Orifice
6. Rapid compression machine
7. laser-induced fluorescence

بیسواس و همکاران، در سال ۲۰۱۶، اثر فشار، دما، نسبت هم ارزی و قطر اریفیس را بر مکانیزم اشتعال مطالعه کردند و این مکانیزم را به دو دسته اشتعال جت و اشتعال شعله تقسیم‌بندی کردند [۲۴]. همچنین، آن‌ها در سال ۲۰۱۸ دریافتند که جایگزینی جت‌های چندگانه به جای یک جت، می‌تواند احتمال اشتعال مخلوط پیش‌آمیخته فوق رقیق هوا-هیدروژن را افزایش دهد [۲۵].

کارپیو و همکاران، در سال ۲۰۱۳، قطر کمینه جت گاز داغ برای اشتعال مخلوط رقیق و نزدیک استوکیومتری هوا-هیدروژن را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که حداقل قطر جت به سرعت و نسبت هم‌ارزی مخلوط جت بستگی دارد [۲۶]. قربانی و همکاران، در سال ۲۰۱۴، مطالعه عددی اشتعال توسط یک جت گاز داغ را انجام دادند. همچنین گزارش دادند که تعامل بین مقیاس زمانی شیمیایی، اختلاط میکرو (اختلاط مولکولی)، و اختلاط ماکرو نقش مهمی در آغاز احتراق توسط یک جت داغ ایفا می‌کند [۲۷].

مارکیدس و ماستراکوس، در سال ۲۰۱۱، یک پیکربندی تجربی برای مطالعه جنبه‌های اشتعال سوخت جت در میدان اکسند با دمای بالا را مورد بررسی قرار دادند [۲۸]. جت استیلن توسط یک نازل با مقطع دایره به جریان آشفته هوا با دمای بالا در یک لوله تخلیه می‌شود. آن‌ها گزارش دادند که شدت آشفته‌گی بالاتر منجر به کاهش فاصله محل شکل‌گیری هسته اشتعال تا خروجی نازل می‌شود، اما سرعت جت بالاتر منجر به افزایش این فاصله می‌شود.

مارکیدس و ماستراکوس، در سال ۲۰۰۵، پدیده اشتعال غیرپیش‌آمیخته برای تخلیه جت متان-هیدروژن به جریان آشفته هوا با دمای بالا را مورد مطالعه قرار دادند [۱۲]. در این پژوهش اثرات دما، سرعت و ترکیب مخلوط برای جت میدان مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مشاهدات چهار رژیم مختلف بدون احتراق، هسته‌های تصادفی اشتعال، بازگشت شعله و شعله برخاسته در این مطالعه گزارش شدند.

خواص جت داغ و سینتیک شیمیایی با آنکه نقش عمده‌ای در فرایند اشتعال ایفا می‌کنند، به صورت کامل مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. افزون بر این، از آنجاکه تشکیل هسته اشتعال پدیده‌ای محلی است، اندازه‌گیری تجربی و ردیابی رادیکال‌های فعال را در محل اشتعال بسیار سخت می‌کند [۲۹].

در پژوهش حاضر آزمایش‌های تجربی با هدف افزایش اطلاعات در مورد شکل‌گیری هسته خوداشتعالی در جریان جت داغ قابل اشتعال در هوا صورت گرفته است. جت گاز داغ، حاصل احتراق گاز طبیعی و هوا با نسبت هم‌ارزی غنی از سوخت در یک محفظه احتراق است. در این مطالعه با کنترل دبی هوا و گاز طبیعی و همچنین اندازه‌گیری دمای جت خروجی و ثبت تصاویر با سرعت بالا و پردازش تصویر به مطالعه عمر، فرکانس و محل شکل‌گیری هسته اشتعال پرداخته می‌شود.

تجهیزات آزمایش

مجموعه تجهیزات آزمایش شامل کمپرسور برقی هوا، خط تغذیه گاز طبیعی، ابزار اندازه‌گیری جریان حجمی، محفظه، ترموکوپل از نوع K و دوربین Nikon V1 است. جزئیات محفظه را نشان می‌دهد. کمپرسور هوای برقی و خط تغذیه گاز طبیعی مخلوط را برای محفظه (شماره ۱) تأمین می‌کند. ترکیب گاز طبیعی بر اساس مطالعه صورت گرفته در پژوهشگاه صنعت نفت در جدول ۱ آمده است. کمپرسور هوا، هوای فشرده شده را تا ۱۰ بار در مخزن ۳۰۰ لیتر ذخیره می‌کند و تا ۲۵۰ لیتر استاندارد در دقیقه (SLM) هوا و خط تغذیه گاز طبیعی تا ۴۰ SLM گاز طبیعی را تأمین می‌کند. از چهار روتامتر برای اندازه‌گیری جریان حجمی

خطوط تغذیه هوا و گاز طبیعی استفاده می‌شود. به دلیل اختلاف فشار در ورودی رواتمترها و فشار اتاق، ضریب تصحیح در اندازه‌گیری سرعت جریان اعمال می‌شود.

روتامترها، هوای اصلی را در دامنه ۰-۴۰۰ با دقت ۵ SLM و گاز طبیعی را در دامنه ۰-۵۰ با دقت ۱ SLM اندازه‌گیری می‌کنند. رواتمترهای خط تغذیه مشعل در دامنه ۰-۱۰ با دقت ۰/۲ SLM هوا و سوخت را اندازه‌گیری می‌کنند. جریان هوا و سوخت (شماره‌های ۳،۲) توسط یک منی‌فولد به مشعل چرخان (شماره ۱۷) در محفظه منتقل می‌شود.

محفظه از لوله استیل با طول ۴۷ سانتیمتر و قطر ۲۰/۳۲ سانتیمتر (معادل ۸ اینچ) ساخته شده است. دیوار داخلی توسط دولایه از الیاف سرامیک متراکم به‌عنوان عایق حرارتی (شماره ۸) پوشانده شده است، به طوری که قطر داخلی محفظه ۱۵ سانتیمتر است. مشعل (شماره ۶) هوا و گاز طبیعی ورودی به محفظه خود را با استفاده از جرعه زن برقی مشتعل کرده و جت محصولات احتراق در محفظه اصلی تخلیه می‌شود و منجر به اشتعالی جریان اصلی می‌شود (شماره ۱۷). اشتعال محفظه اصلی توسط پنجره (شماره ۷) قابل مشاهده است. همچنین، اندازه‌گیری دمای جت خروجی از محفظه با استفاده از ترموکوپل نوع K (شماره ۱۱) تایید می‌شود. در صورت اشتعال موفق، محفظه ترموکوپل افزایش سریع دما را نشان می‌دهد. محصولات احتراق محفظه از طریق نازل به طول ۱۵ سانتیمتر به هوای آزاد تخلیه می‌شود. به دلیل اینرسی حرارتی بزرگ محفظه احتراق، حدود یک ساعت طول می‌کشد تا دمای خروجی جت به پایداری برسد. نقاط آزمون برای اثبات تکرارپذیری نتایج سه بار تکرار شده‌اند.

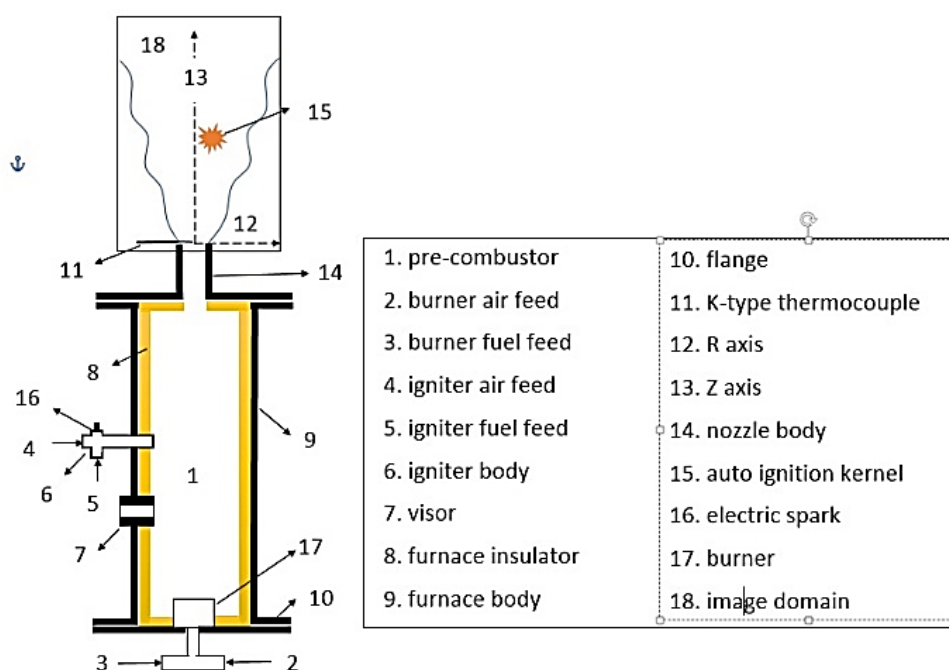


Figure 1- Schematic of the combustor to produce high temperature jet

شکل ۱- شمایی از محفظه جهت تولید جت گاز داغ

جدول ۱- ترکیب گاز طبیعی مورد استفاده در تست

Table 1- The natural gas composition			
Species	% Mole	Species	% Mole
CH ₄	87.70	C ₅ H ₁₂ -i	0.13
C ₂ H ₆	4.70	C ₅ H ₁₂ -n	0.10
C ₃ H ₈	1.74	C ₆ H ₁₄	0.08
C ₄ H ₁₀ -i	0.37	CO ₂	0.05
C ₄ H ₁₀ -n	0.42	N ₂	4.70

در شکل ۲، نمایی از سطح داخلی محفظه احتراق با دولایه پوشش عایق حرارتی نشان داده شده است. در این تصویر مشعل در کف محفظه احتراق قابل مشاهده است. در شکل ۳، محل قرارگیری ترموکوپل جهت اندازه‌گیری دمای جت خروجی در دهانه خروجی نازل خروجی محفظه احتراق نشان داده شده است. در این تصویر چیدمان آزمونگر، نازل خروجی محفظه احتراق و تابلو اندازه‌گیری و تنظیم دبی سوخت و هوا نیز مشخص است. رفتار شکل‌گیری شعله در میدان با استفاده از تصویربرداری سرعت بالا و با استفاده از فیلتر CH شناسایی می‌شود. شکل ۴ نشان‌دهنده تصویر شعله بدون فیلتر (راست) و با استفاده از فیلتر CH (چپ) است. همان‌طور که مشخص است، استفاده از فیلتر CH می‌تواند نور گسیل‌شده از ذرات دوده خروجی از نازل محفظه احتراق را فیلتر کند که کمک شایانی به استخراج رفتار شعله و هسته خوداشتعالی می‌کند.



Figure 2- The thermal isolation of combustor inner wall
شکل ۲- نمایی از پوشش عایق حرارتی دیواره داخلی محفظه



Figure 3- The nozzle exit, thermocouple, air and fuel rotameter
شکل ۳- نازل خروجی، ترموکوپل و روتامترهای سوخت و هوا

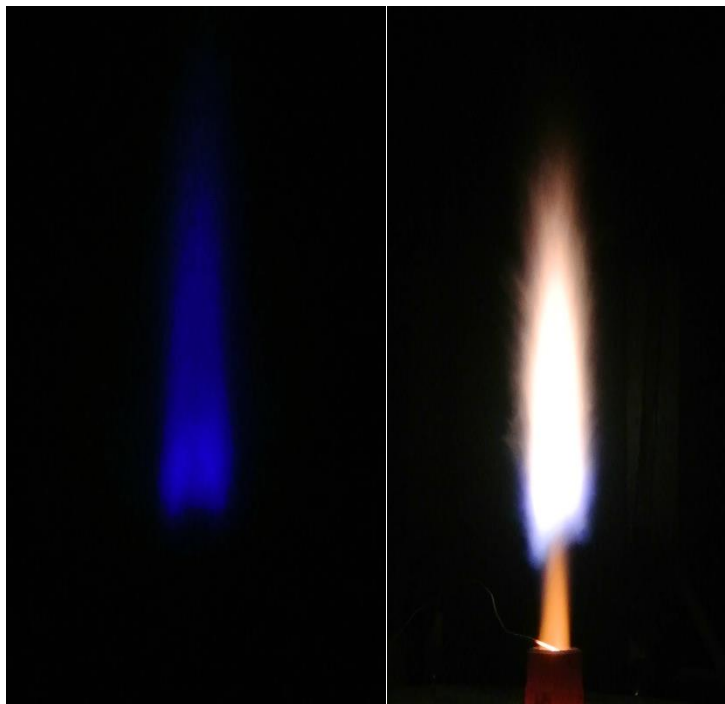


Figure 4- The visible and CH filtered photography of the lifted flame
شکل ۴- تصویری از شعله برخاسته در طیف مرئی (راست) و فیلتر CH (چپ)

مشخصات جت

با استفاده از شبیه‌سازی عددی سرعت، دما و ترکیب گاز خروجی از دهانه نازل محاسبه می‌شود. این روش به دلیل محدودیت در اندازه‌گیری مشخصات جت خروجی به صورت تجربی مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که هدف از این پژوهش تنها ارائه نتایج تجربی است، مختصری از روش حل و نتایج حل عددی ارائه خواهد شد. میدان محاسباتی به صورت سه بعدی و برای یک قطاع 60° درجه معادل $1/6$ میدان واقعی با شرایط مرزی پرریودیک تولید شده است. محفظه احتراق یک استوانه به طول ۴۷ سانتیمتر و قطر ۱۵ سانتیمتر است. هوا از طریق یک مشعل چرخان و سوخت به صورت غیر پیش آمیخته وارد محفظه احتراق می‌شوند. محصولات احتراق توسط یک لوله با قطر $1/3$ سانتیمتر و طول ۱۵ سانتیمتر به هوا تخلیه می‌شود. دیواره محفظه عایق و دیواره لوله غیر بی دررو است. میدان حل برای تخلیه جت در هوای آزاد به اندازه ارتفاع محفظه و قطر آن در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار Converge CFD صورت پذیرفته است. شبکه محاسباتی کارتیزین که بزرگترین ابعاد سلول در محفظه برابر با ۲ میلی‌متر و کمترین آن در لوله خروجی به 0.5 میلی‌متر می‌رسد برای شبیه‌سازی استفاده محفظه احتراق و فضای خارج آن به کار رفته است. شبیه‌سازی جریان آشفته با استفاده از روش $k-\epsilon$ قابل‌تحقق با ضرایب استاندارد صورت گرفته است. شبیه‌سازی احتراق نیز با استفاده از روش Sage صورت می‌پذیرد. در این روش از مکانیزم شیمیایی DRM19 استفاده شده است.

میانگین گونه‌های جرمی خروجی از محفظه احتراق در جدول ۲ گزارش شده است. افزایش نسبت هم ارزی در محفظه احتراق از جت C2 تا C4 منجر به افزایش سوخت نسوخته، متان، CO و H2 شده است.

1. Swirler
2. Non-Adiabatic

جدول ۲- ترکیب کسر مولی گونه‌های شیمیایی در صفحه خروجی نازل محفظه

Table 2-The mixture composition at the nozzle exit plane

	C2	C3	C1& C4
N2	0.6824	0.6759	0.6620
O2	0.0080	0.0132	0.0139
C2H4	0.0047	0.0053	0.0087
H2	0.0216	0.0283	0.0305
H2O	0.1757	0.1692	0.1666
CO	0.0276	0.0305	0.0355
CO2	0.0687	0.0631	0.0569
CH4	0.0106	0.0179	0.0249

توزیع سرعت محوری در راستای شعاع برای هر سه مورد شبیه سازی به صورت نرمالایز شده در شکل ۵ آمده است.

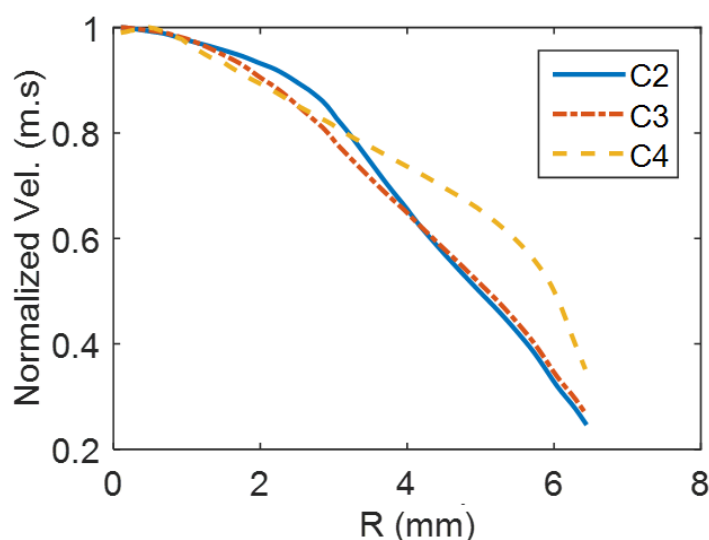


Figure 5- The normalized jet velocity profile at the nozzle exit plane

شکل ۵- توزیع سرعت محوری نرمالایز شده در راستای شعاعی در مقطع خروجی نازل محفظه

بررسی نتایج آزمون

آزمون‌های صورت گرفته در بازه نسبت هم ارزی پیش-محفظه ۰/۹۷ تا ۲/۲، دمای جت گاز خروجی ۱۰۸۰ تا ۱۳۴۴ کلوین و عدد رینولدز جت بین ۳۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ مشخص می‌شوند.

رفتار شکل‌گیری اشتعال و شعله

رفتار جت گاز داغ برای اشتعال، تشکیل شعله و خاموشی برای عدد رینولدز ثابت جت (۶۰۰۰ ~) با نسبت هم ارزی متغیر محفظه ۰/۹۷ تا ۲/۲ مشاهده و ثبت شده است. بر اساس مشاهده‌ها، رفتار جت را می‌توان از لحاظ کیفی به پنج نوع طبقه‌بندی کرد:

- ۱- بدون شعله: هیچ شعله‌ای یا هسته اشتعال در این نوع مشاهده نمی‌شود، شکل ۶- A. این رفتار در دو حالت رخ می‌دهد حالت اول هنگامیست که نسبت هم ارزی برابر با یک یا کمتر از یک باشد، با وجود دمای مناسب جت، ترکیب شیمیایی جت قابل احتراق نیست. در حالت دوم، محصولات احتراق بیش از حد غنی از سوخت باشند که منجر به محصولات با دمای پایین می‌شود، به طوری که دمای جت خروجی کمتر از دمای خوداشتعالی باشد.
- ۲- شعله غیرپیش‌آمیخته چسبیده: در این حالت شعله تقریباً به نازل چسبیده است و با ارتفاع برخاست شعله کمتر از قطر جت است. نسبت هم ارزی محفظه کمی از یک بیشتر است، شکل ۶- B و C و D.
- ۳- شعله غیرپیش‌آمیخته برخاسته: شعله برخاسته آشفته ولی پایدار است. ارتفاع برخاست نسبت به دسته دوم افزایش پیدا کرده است و خاموشی موقتی رخ نمی‌دهد، شکل ۶- E.
- ۴- شعله پیش‌آمیخته برخاسته و ناپایدار: در این حالت، هسته خوداشتعالی شکل می‌گیرد و می‌تواند به بالادست و پایین دست گسترش یابد اما شعله شکل گرفته ناپایدار است و به صورت مکرر خاموش و روشن می‌شود. این خاموشی و اشتعال مجدد به طور مکرر اتفاق می‌افتد و ارتفاع برخاست از دسته سوم بیشتر است، شکل ۶- F.
- ۵- هسته خوداشتعالی تصادفی: شکل‌گیری هسته‌های خوداشتعالی به طور تصادفی در جریان جت شکل می‌گیرد. هسته‌های اشتعال امکان تبدیل شدن به یک شعله گسترده را ندارند و در زمان اندکی خاموش می‌شوند. این هسته‌ها به پایین دست جریان منتقل شده و خاموش می‌شوند. ارتفاع شکل‌گیری هسته‌های اشتعال بیشتر از دسته چهارم است. شکل‌گیری هسته‌های خوداشتعالی همراه با صدای بلند ثبت شده است که در مرجع [۱۲] نیز گزارش شده است.

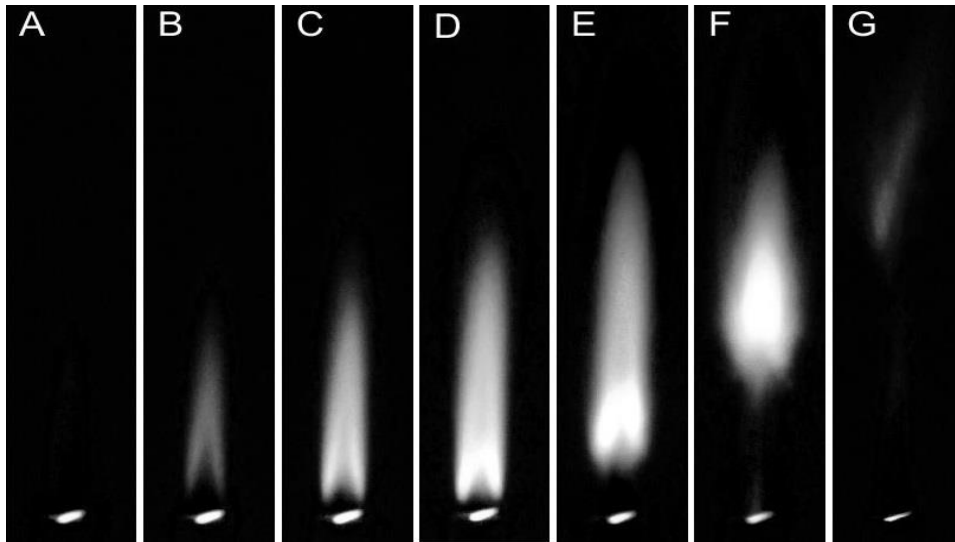


Figure 6- The flame formation regimes are shown for $Re = 6000$ with combustor equivalence ratio equal to 0.97, 1.02, 1.13, 1.34, 1.61, 1.72, 1.77 respectively. The illuminated line is thermocouple.

شکل ۶- رژیم‌های شکل‌گیری شعله در جریان جت برای نسبت هم‌ارزی برابر با ۰/۹۷، ۱/۰۲، ۱/۱۳، ۱/۳۴، ۱/۶۱، ۱/۷۲، ۱/۷۷ به ترتیب از شکل A تا G با عدد رینولدز ثابت و برابر با $Re = 6000$ نشان داده شده است. خط درخشان تشعشع پوشش ترموکوپل است که در خروجی نازل قرار گرفته است.

1. Anchored non-premixed flame
2. Lifted non-premixed flame
3. Lifted unstable non-premixed flame
4. Random Autoignition kernel

ویژگی هسته خوداشتعالی تصادفی

در این بخش به تشکیل هسته خوداشتعالی و خاموشی به عنوان تابعی از نسبت هم ارزی از محفظه، دمای جت و عدد رینولدز پرداخته می‌شود و نتایج مطالعه تجربی جت گاز داغ با چهار عدد رینولدز و نسبت هم ارزی معین برای بررسی هسته خوداشتعالی تصادفی ارائه می‌شود. عدد رینولدز میانگین و نسبت هم ارزی محفظه جدول ۳ و همچنین محدوده دمای هر مورد گزارش شده است. دبی سوخت و هوای گزارش شده در جدول زیر به صورت اصلاح نشده گزارش شده است.

جدول ۳- مشخصات چهار نقطه تست

Table 3- The test points properties

Test setup	Air mass flow (slm)	Fuel mass flow (slm)	Re	ϕ	nozzle dia. (mm)
C1	100	16	3200	1.66	20
C2	100	14	5300	1.35	13
C3	125	19	6400	1.46	13
C4	190	37	10400	1.66	13

تصویربرداری با سرعت بالا برای به دست آوردن هسته خوداشتعالی تصادفی در جریان جت مورد استفاده قرار می‌گیرد. کد توسعه یافته برای پردازش تصویر به منظور ثبت هسته‌های احتراق خوداشتعالی ایجاد شده است. نتایج آن عبارتند از: ارتفاع، طول عمر و فرکانس هسته. شکل ۷، تکامل شکل‌گیری هسته خوداشتعالی، حرکت آن به پایین دست و خاموشی آن را نشان می‌دهد.

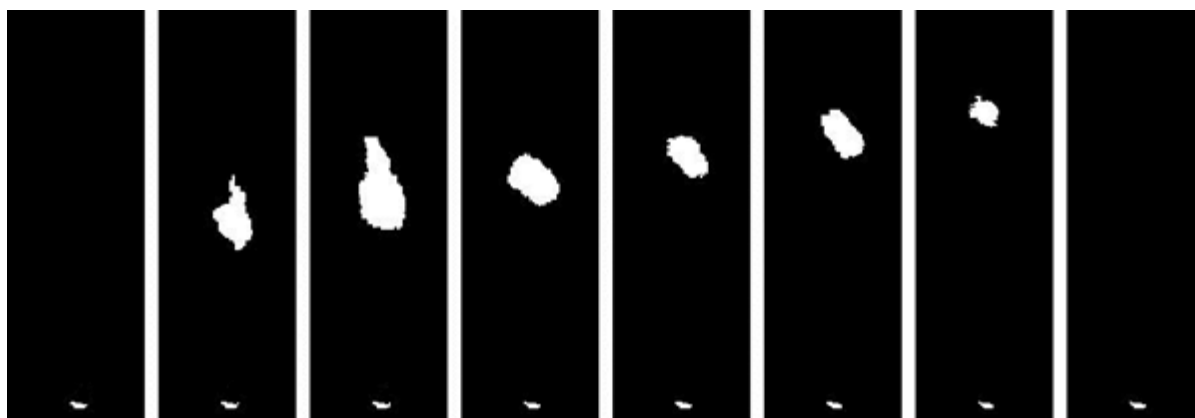


Figure 7- The autoignition kernel formation, convection and extinction using 2.5 ms resolution high frame rate photography. The jet Reynolds number is 5000 and the combustor equivalence ration is 2.24

شکل ۷- شکل‌گیری هسته و خاموشی هسته در تصویربرداری پر سرعت با وضوح ۲/۵ میلی ثانیه ضبط شده است. عدد رینولدز جت

$$Re \sim 5000 \text{ و نسبت هم ارزی برابر با } \phi_A = 2/24$$

اثر عدد رینولدز جت بر محل شکل‌گیری هسته خوداشتعالی

احتمال تکرار رخداد هسته خوداشتعالی در محورهای طولی و شعاعی، توزیع احتمال هسته خوداشتعالی نامیده می‌شود. برای توزیع محوری، توزیع احتمال به صورت نسبت تعداد هسته‌های خوداشتعالی شکل‌گرفته در محور طولی نشان داده شده است. حداکثر توزیع احتمال به عنوان مناسب‌ترین منطقه برای رخداد هسته خوداشتعالی در جهت محوری یا شعاعی تفسیر می‌شود.

شکل ۸، توزیع احتمال رخداد هسته خوداشتعالی را در راستای محوری (چپ) و شعاعی (راست) براساس پردازش تصویر برای سه عدد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. تحلیل صورت گرفته بر مبنای وقوع ۲۳۶۵ مورد هسته خود اشتعالی ثبت شده در تصویربرداری سرعت بالا ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که محور جت مناسب‌ترین مکان برای تشکیل هسته است. یافته مطابق با گزارش سداندان و همکاران، در مورد محل شکل‌گیری هسته اشتعال است [۲۳]. همچنین، احتمال تشکیل هسته خوداشتعالی با افزایش فاصله شعاعی از مرکز جت کاهش می‌یابد. در فاصله $R/D > 1$ امکان وقوع هسته خوداشتعالی صفر است. افزون بر این، افزایش عدد رینولدز جت باعث کاهش کمی احتمال تشکیل هسته در محور جت می‌شود و احتمال وقوع در خارج از مرکز جت را افزایش می‌دهد.

عدد رینولدز بیش‌ترین تأثیر را بر مکان محوری تشکیل هسته خوداشتعالی دارد. توزیع احتمال هسته خوداشتعالی در راستای محوری نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز فاصله محوری (Z) بیشترین احتمال رخداد هسته خوداشتعالی افزایش می‌یابد. افزون بر این، عدد رینولدز بالاتر، حداکثر احتمال تشکیل هسته خوداشتعالی در راستای محوری را کاهش می‌دهد. برای مثال، در C3 با $Re = 6400$ ، مناسب‌ترین نقطه شکل‌گیری هسته اشتعال برابر با $Z/D = 7$ با توزیع احتمال 0.45 است در حالی‌که در C4 با $Re = 10400$ مناسب‌ترین ارتفاع برابر با $Z/D = 11$ و توزیع احتمال 0.33 است.

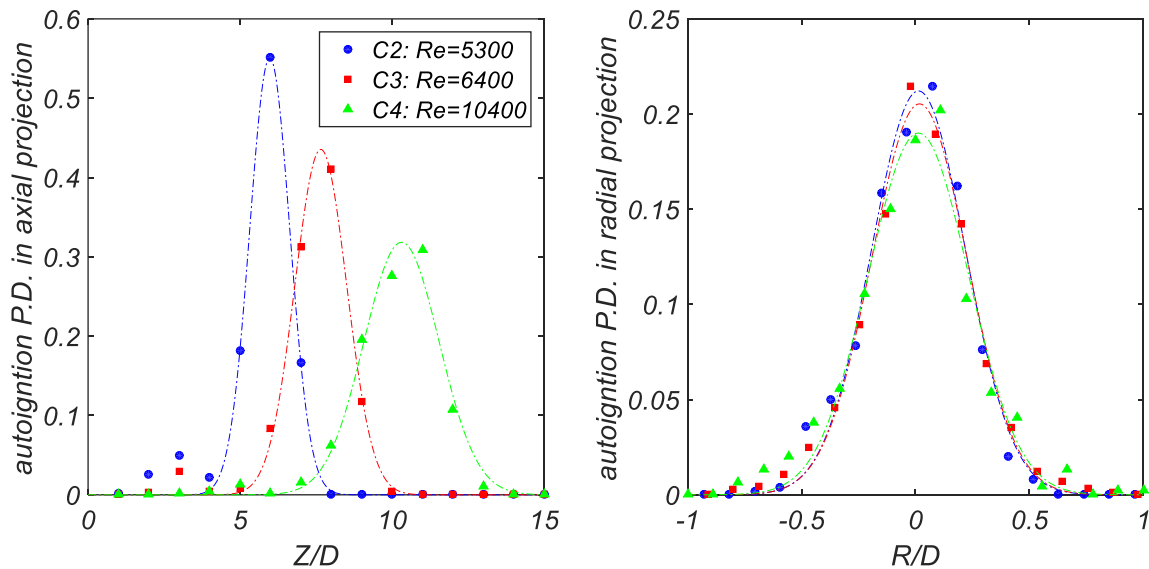


Figure 8- The autoignition kernel probability distribution along the radial and axial direction
 شکل ۸- توزیع احتمال توزیع هسته خوداشتعالی در راستای محوری (چپ) و شعاعی (راست)

اثر دمای جت بر محل شکل‌گیری هسته خوداشتعالی

در مطالعات گسترده صورت گرفته پیرامون خوداشتعالی جت، دما به‌عنوان پارامتر کلیدی برای تعریف خوداشتعالی معرفی می‌شود. بر اساس معادله آرنیوس، درجه حرارت مستقیماً بر میزان واکنش یک مخلوط قابل اشتعال تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، با افزایش دمای مخلوط، حدود اشتعال پذیری مخلوط از هر دو طرف رقیق و غنی، گسترده می‌شود [۳۰].

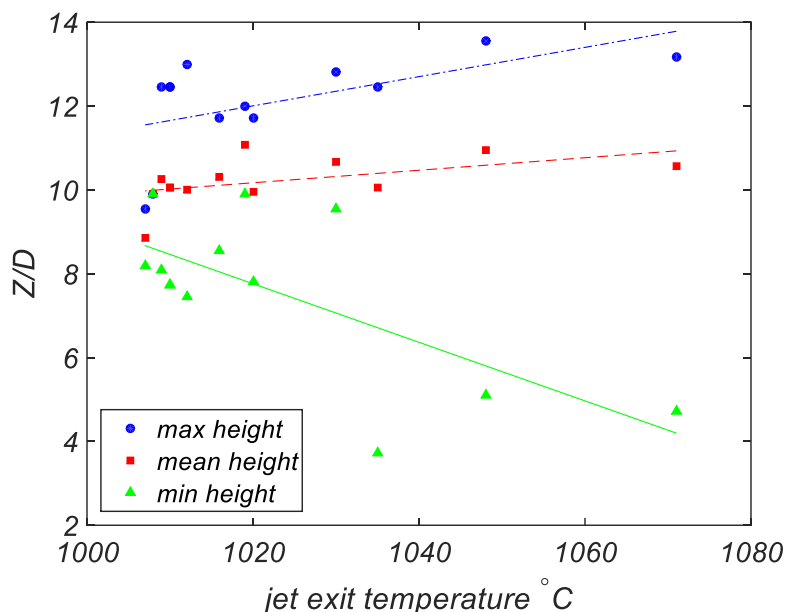


Figure 9- The effect of the jet temperature on the minimum and maximum height of the autoignition kernel formation
 شکل ۹- اثر افزایش دمای جت C4 بر حداقل و حداکثر ارتفاع شکل‌گیری هسته خوداشتعالی

اثر دمای جت در شکل‌گیری هسته خوداشتعالی در راستای محوری شکل ۹ برای مورد C4 نشان داده شده است. افزایش حدود اشتعال پذیری با افزایش دمای جت تخلیه شده به هوا، به معنای گسترش محدوده مناسب برای تشکیل هسته‌های خوداشتعالی به منطقه غنی‌تر (بالادست جریان جت) و همچنین منطقه رقیق (پایین دست جریان جت) است. توسعه محدوده اشتعال پذیری با افزایش دما به گونه‌ای است که ارتفاع میانگین شکل‌گیری هسته‌های خوداشتعالی اندکی افزایش یافته است. متوسط ارتفاع شکل‌گیری هسته خوداشتعالی در سه جت مختلف با اعداد رینولدز ۵۳۰۰، ۶۴۰۰ و ۱۰۴۰۰ و دمای مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که میانگین ارتفاع هسته‌های خوداشتعالی بیشتر تحت تاثیر عدد رینولدز جت است. افزون بر این، میانگین ارتفاع تشکیل هسته با دمای جت کمی افزایش می‌یابد.

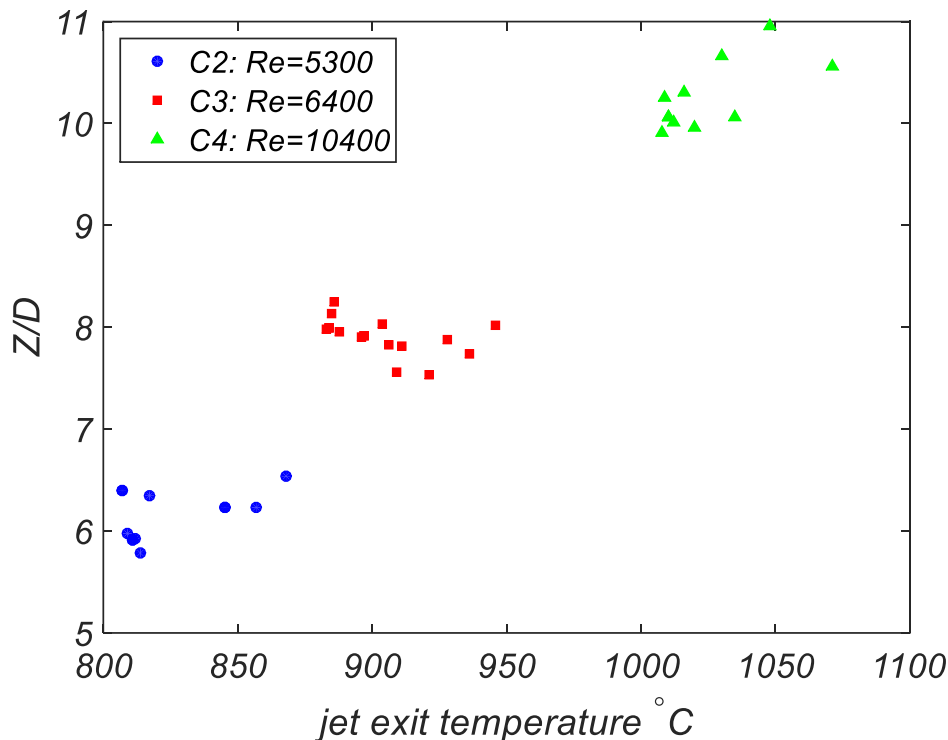


Figure 10- The effect of the jet temperature on mean autoignition kernel formation height
 شکل ۱۰- اثر افزایش دمای جت بر ارتفاع میانگین شکل گیری هسته خوداشتعالی

اثر دما بر عمر و فرکانس هسته ی خوداشتعالی

شکل گیری هسته خوداشتعالی و خاموشی آن از اهمیت ویژه ای برای تثبیت شعله آشفته و ارتفاع برخاست برخوردار است [۳۱]. شعله برخاسته می تواند به عنوان ناحیه واکنشی که توسط پاکت های هسته خوداشتعالی و احتراقی پشتیبانی می شود، تعبیر شود [۳۲]. بنابراین، طول عمر و فرکانس پاکت های احتراقی از ویژگی های اصلی در مطالعه هسته های خوداشتعالی تصادفی است. طول عمر و فرکانس هسته خوداشتعالی با استفاده از پردازش تصویر تصویربرداری سرعت بالا به دست می آید. فرکانس رخداد هسته ها با شمارش تعداد هسته در بازه تصویربرداری محاسبه می شود. دمای جت به صورت مستقیم بر تعداد رخداد هسته خوداشتعالی اثر گذار است و موجب افزایش فرکانس هسته ها می شود. مشاهده های تجربی نشان می دهد که با کاهش دمای جت خروجی نرخ رخداد هسته های خوداشتعالی کاهش یافته و در یک دمای معین رخداد به صفر می رسد که به معنای دمای خاموشی جت یا مرز پایین خوداشتعالی است. همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، افزایش دمای جت از حد خاصی منجر به شکل گیری شعله آشفته ناپایدار می شود که در بخش های قبل به عنوان دسته چهارم از پنج دسته معرفی شده طبقه بندی شد. افزایش دمای جت خروجی منجر به افزایش عمر هسته های خوداشتعالی می شود. شکل ۱۲ برای جت C1 و C4 با نسبت هم آرزوی ۱/۶۶ محفظه طول عمر هسته های خوداشتعالی با تغییرات دمای جت نشان داده شده است. برای جت با دمای پایین C1 حداقل طول عمر هسته ها در حدود ۸ میلی ثانیه اندازه گیری شده است در صورتی که برای C4 که دمای بالاتری دارد حداقل طول عمر هسته در حدود ۴ میلی ثانیه است. همچنین، افزایش دمای جت منجر به افزایش طول عمر هسته خوداشتعالی می شود. بیشینه عمر کرنل برای جت C1 بیشتر از C4 است که دلیل آن می تواند ناشی از تفاوت در عدد رینولدز جت خروجی باشد. عدد

رینولدز جت C1 برابر با ۳۲۰۰ و جت C4 برابر با ۱۰۴۰۰ است. وجود کرنش بیشتر در میدان جریان منجر به کاهش عمر هسته خوداشتعالی شده است.

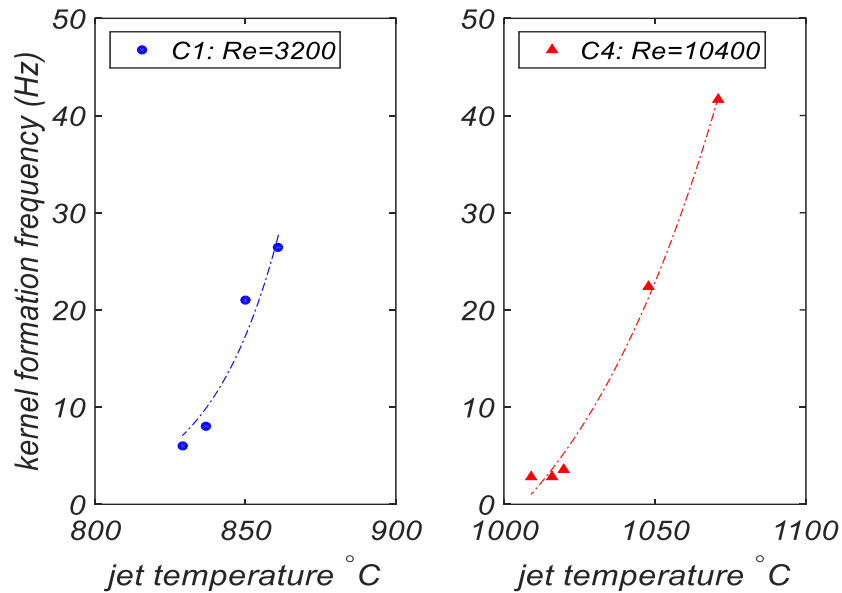


Figure 11- The effect of jet temperature on autoignition kernel frequency
 شکل ۱۱- اثر دمای جت بر فرکانس های خوداشتعالی

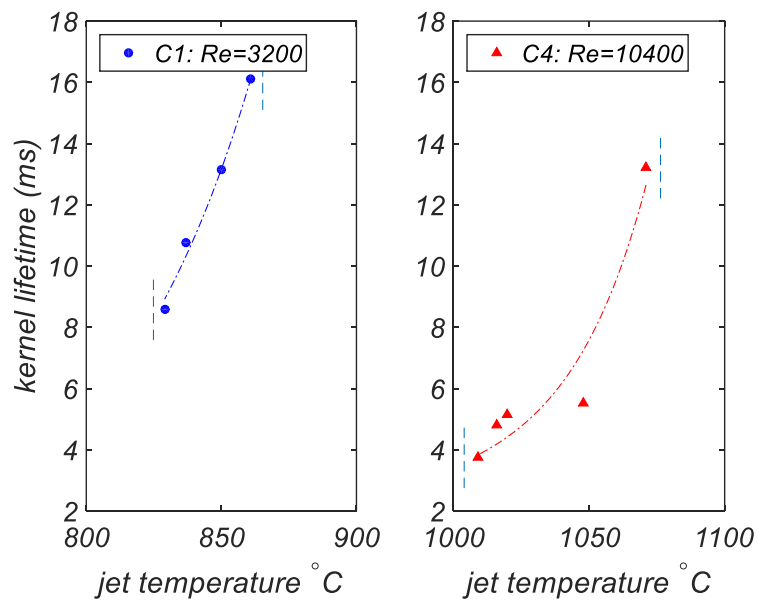


Figure 12- The jet temperature effect on the kernl life time
 شکل ۱۲- اثر دمای جت بر طول عمر هسته های خوداشتعالی

اثر عدد رینولدز جت بر عمر و فرکانس هسته‌ی خوداشتعالی

مطابق مشاهدات، عدد رینولدز جت بر طول عمر و فرکانس هسته‌های خوداشتعالی نیز اثرگذار است. شکل ۱۳ طول عمر هسته را برای دو مورد C1 و C4 با جت رینولدز به ترتیب ۳۲۰۰ و ۱۰۴۰۰ نشان می‌دهد. طول عمر هسته‌های خوداشتعالی به صورت یکنواخت با فرکانس وقوع آن‌ها افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که عدد رینولدز جت بالاتر، فرکانس کمینه و بیشینه را افزایش می‌دهد؛ به طوری که کمینه فرکانس برای C1 در حدود ۱۰ Hz و بیشینه آن ۲۵ Hz است در صورتی که با افزایش عدد رینولدز، فرکانس رخداد هسته‌های خوداشتعالی توسعه یافته و کمینه فرکانس برای C4 در حدود ۴ Hz و بیشینه آن به ۴۰ Hz می‌رسد.

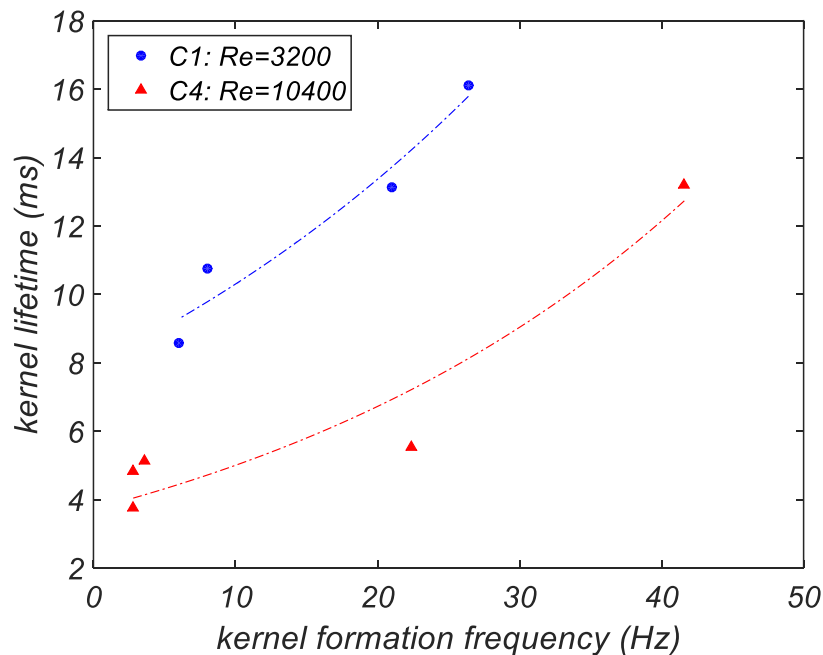


Figure 13- The effect of the jet Reynolds number on autoignition kernel frequency
 شکل ۱۳- اثر عدد رینولدز جت بر طول عمر و فرکانس هسته‌های خوداشتعالی

قربانی و همکاران، به نقش کلیدی اختلاط میکرو (نفوذ مولکولی) و اختلاط ماکرو (آشفته جریان) در زمان تاخیر اشتعال و محل وقوع اشتعال اشاره کرده‌اند [۲۷]. عدد رینولدز بالاتر، منجر به جابه‌جایی جرمی ناشی از جریان آشفته هوای محیط به جریان جت می‌شود و موجب تقویت اختلاط میکرو و ماکرو در لایه برشی جت می‌شود. بنابراین، احتمال شکل‌گیری شرایط مناسب برای هسته خوداشتعالی افزایش می‌یابد و منجر به افزایش فرکانس می‌شود. از سوی دیگر به‌طور معکوس با افزایش عدد رینولدز و سرعت جت، منجر به افزایش نرخ کرنش جریان در لایه برشی جت شده در نتیجه امکان خاموشی را افزایش می‌دهد که باعث کاهش طول عمر هسته‌های خوداشتعالی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، طول عمر هسته‌های خوداشتعالی در یک فرکانس معین برای جت C1 بیشتر از جت C4 است.

نتیجه گیری

مطالعه تجربی رخداد هسته خوداشتعالی در جت داغ محصولات احتراق غنی از سوخت با هدف رفتارشناسی هسته خوداشتعالی و رژیم‌های حاکم بر اشتعال و خاموشی انجام شد. جت محصولات احتراق با استفاده از احتراق مخلوط هوا و گاز طبیعی غنی از سوخت در یک محفظه احتراق و تخلیه محصولات به هوای محیط تولید شده است. دمای جت با استفاده از ترموکوپل در دهانه نازل اندازه‌گیری شده است. با استفاده از دوربین فیلم‌برداری با سرعت بالا و پس پردازش نتایج آن محل، فرکانس، طول عمر، و توزیع احتمال رخداد هسته خوداشتعالی محاسبه و گزارش شده است. به‌طور خلاصه، رفتار هسته خوداشتعالی را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

- محور جت محتمل‌ترین مکان برای تشکیل هسته خود اشتعالی است.
- احتمال تشکیل هسته خوداشتعالی در راستای شعاعی بعد از فاصله $R/D > 1$ به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد.
- افزایش دمای جت، منجر به افزایش حدود اشتعال پذیری شده و در نتیجه ارتفاع تشکیل هسته خوداشتعالی را به سمت مخلوط غنی‌تر (بالادست جریان جت) و رقیق‌تر (پایین دست جریان جت) توسعه می‌دهد. با این حال، متوسط ارتفاع تشکیل هسته خوداشتعالی وابستگی کمی به دمای جت دارد و به‌شدت تحت تاثیر عدد رینولدز جت است.
- عمر هسته خود اشتعالی با دمای جت رابطه مستقیم دارد.
- فرکانس وقوع هسته‌های خود اشتعالی با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد و در یک فرکانس معین، عمر هسته‌های خوداشتعالی با کاهش عدد رینولدز جت افزایش می‌یابد.

منابع

- [1] K. Lee, H. Kim, P. Park, S. Yang, and Y. Ko, "CO₂ radiation heat loss effects on NO_x emissions and combustion instabilities in lean premixed flames," *Fuel*, 106, 2013, pp. 682–689.
- [2] S. Ji, X. Lan, J. Lian, H. Xu, Y. Wang, Y. Cheng and Y. Liu, "Influence of Ozone on Ignition and Combustion Performance of a Lean Methane/Air Mixture," *Energy & Fuels*, 31, 2017, pp. 14191–14200.
- [3] J. P. Bhasker and E. Porpatham, "Effects of compression ratio and hydrogen addition on lean combustion characteristics and emission formation in a Compressed Natural Gas fuelled spark ignition engine," *Fuel*, 208, 2017, pp. 260–270.
- [4] G. Li and B. Yao, "Nonlinear dynamics of cycle-to-cycle combustion variations in a lean-burn natural gas engine," *Appl. Therm. Eng.*, 28, 2008, pp. 611–620.
- [5] Y. Chen, Y. Wang, and R. Raine, "Correlation between cycle-by-cycle variation, burning rate, and knock: A statistical study from PFI and DISI engines," *Fuel*, 206, 2017, pp. 210–218.
- [6] F. Ma, S. Ding, Y. Wang, Y. Wang, J. Wang, and S. Zhao, "Study on combustion behaviors and cycle-by-cycle variations in a turbocharged lean burn natural gas S.I. engine with hydrogen enrichment," *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 2008, pp. 7245–7255.
- [7] M. Reyes, A. Melgar, A. Pérez, and B. Giménez, "Study of the cycle-to-cycle variations of an internal combustion engine fuelled with natural gas/hydrogen blends from the diagnosis of combustion pressure," *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 2013, pp. 15477–15487.
- [8] S. Biswas and L. Qiao, "Prechamber Hot Jet Ignition of Ultra-Lean H₂/Air Mixtures: Effect of Supersonic Jets and Combustion Instability," *SAE International Journal of Engines*, 9, 2016, pp. 1584–1592.
- [9] S. Biswas and L. Qiao, "A Numerical Investigation of Ignition of Ultra-Lean Premixed H₂/Air Mixtures by Pre-Chamber Supersonic Hot Jet," *SAE International Journal of Engines*, 10, 2017, pp. 2231–2247.
- [10] E. Murase, S. Ono, K. Hanada, and A. K. Oppenheim, "Initiation of Combustion in Lean Mixtures by Flame Jets," *Combustion Science and Technology*, 113, 1996, pp. 167–177.
- [11] M. P. Lee, B. K. Mcmillin, J. L. Palmer, and R. K. Hanson, "Planar fluorescence imaging of a transverse jet in a supersonic crossflow," *Journal of Propulsion and Power*, 8, 1992, pp. 729–735.
- [12] C. N. Markides and E. Mastorakos, "An experimental study of hydrogen autoignition in a turbulent co-flow of heated air," *Proceedings of the Combustion Institute*, 30, 2005, pp. 883–891.
- [13] N. Wang, J. Liu, W. L. Chang, and C. F. Lee, "A numerical study on effects of pre-chamber syngas reactivity on hot jet ignition," *Fuel*, 234, 2018, pp. 1–8.
- [14] H. Phillips, "Ignition in a transient turbulent jet of hot inert gas," *Combustion and Flame*, 19, 1972, pp. 187–195.

- [15] S. Yamaguchi, N. Ohiwa, and T. Hasegawa, "Ignition and burning process in a divided chamber bomb," *Combust. Flame*, 59, No. 2, 1985, pp. 177–187.
- [16] G. Gentz *et al.*, "A study of the influence of orifice diameter on a turbulent jet ignition system through combustion visualization and performance characterization in a rapid compression machine," *Applied Thermal Engineering*, 81, 2015, pp. 399–411.
- [17] G. Gentz, B. Thelen, P. Litke, J. Hoke, and E. Toulson, "Combustion Visualization, Performance, and CFD Modeling of a Pre-Chamber Turbulent Jet Ignition System in a Rapid Compression Machine," *SAE International Journal of Engines*, 8, No. 2, 2015, pp. 538–546.
- [18] M. Gholamisheeri, B. C. Thelen, G. R. Gentz, I. S. Wichman, and E. Toulson, "Rapid compression machine study of a premixed, variable inlet density and flow rate, confined turbulent jet," *Combustion and Flame*, 169, 2016, pp. 321–332.
- [19] R. P. Roethlisberger and D. Favrat, "Investigation of the prechamber geometrical configuration of a natural gas spark ignition engine for cogeneration: part I. Numerical simulation," *International Journal of Thermal Science*, 42, No. 3, 2003, pp. 223–237.
- [20] P. M. Allison, M. de Oliveira, A. Giusti, and E. Mastorakos, "Pre-chamber ignition mechanism: Experiments and simulations on turbulent jet flame structure," *Fuel*, 230, 2018, pp. 274–281.
- [21] G. Gentz, M. Gholamisheeri, and E. Toulson, "A study of a turbulent jet ignition system fueled with iso-octane: Pressure trace analysis and combustion visualization," *Applied Energy*, 189, 2017, pp. 385–394.
- [22] H. Wu, L. Wang, X. Wang, B. Sun, Z. Zhao, C. Lee, F. Liu, "The effect of turbulent jet induced by pre-chamber sparkplug on combustion characteristics of hydrogen-air pre-mixture," *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, No. 16, 2018, pp. 8116–8126.
- [23] R. Sadanandan, D. Markus, R. Schieß, U. Maas, J. Olofsson, H. Seyfried, M. Richter, M. Aldén, "Detailed investigation of ignition by hot gas jets," *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, No. 1, 2007, pp. 719–726.
- [24] S. Biswas, S. Tanvir, H. Wang, and L. Qiao, "On ignition mechanisms of premixed CH₄/air and H₂/air using a hot turbulent jet generated by pre-chamber combustion," *Applied Thermal Engineering*, 106, 2016, pp. 925–937.
- [25] S. Biswas and L. Qiao, "Ignition of ultra-lean premixed H₂/air using multiple hot turbulent jets generated by pre-chamber combustion," *Applied Thermal Engineering*, 132, 2018, pp. 102–114.
- [26] J. Carpio, I. Iglesias, M. Vera, A. L. Sánchez, and A. Liñán, "Critical radius for hot-jet ignition of hydrogen-air mixtures," *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, No. 7, 2013, pp. 3105–3109.
- [27] A. Ghorbani, G. Steinhilber, D. Markus, and U. Maas, "Numerical Investigation of Ignition in a Transient Turbulent Jet by Means of a PDF Method," *Combustion Science and Technology*, 186, No. 10–11, 2014, pp. 1582–1596.
- [28] C. Markides, N. Mastorakos, "Experimental Investigation of the Effects of Turbulence and Mixing on Autoignition Chemistry," *Flow Turbulence and Combustion*, 86, 2011, pp. 585–608.
- [29] N. Wang, J. Liu, W. L. Chang, and C. F. Lee, "Ignition kinetics of a homogeneous hydrogen/air mixture using a transient hot jet," *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, No. 33, 2018, pp. 16373–16385.
- [30] I. Wierzbna and V. Kilchyk, "Flammability limits of hydrogen-carbon monoxide mixtures at moderately elevated temperatures," *International Journal of Hydrogen Energy*, 26, No. 6, 2001, pp. 639–643.
- [31] K. M. Lyons, "Toward an understanding of the stabilization mechanisms of lifted turbulent jet flames: Experiments," *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, No. 2, 2007, pp. 211–231.
- [32] E. Oldenhof, M. J. Tummers, E. H. van Veen, and D. J. E. M. Roekaerts, "Transient response of the Delft jet-in-hot coflow flames," *Combustion Flame*, 159, No. 2, 2012, pp. 697–706.

English Abstract

The Experimental Study of the Autoignition Kernel Formation in a Jet

Saeedreza Zadsirjan¹, Sadegh Tabejamaat^{2*}, Masoud EidiAttarzadeh³

1- School of the Aerospace engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, s_zadsirjan@aut.ac.ir

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

3- School of the Aerospace engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Eidiattar@aut.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2021.11.25, Received in revised form: 2022.01.09, Accepted: 2022.02.21)

The non-premixed autoignition characteristic of a hot turbulent jet ejecting into the quiescent air was studied experimentally. The jet was the combustion product of fuel rich natural gas/air mixture burn in a thermally isolated combustion chamber. The combustion products discharge through a nozzle (13 and 20 mm in diameter) into the ambient air. The pre-chamber equivalence ratio, jet Reynolds number, and temperature are the governing parameters which are controlled by mass flow controller and thermocouples. The results of these experiments provide insight into the temporal and spatial non-premixed autoignition of the high-temperature combustible jet. Observations of ignition-flame formation –extinction behaviors of these jets are categorized into 1-no ignition 2- anchored diffusion flame 3- lifted diffusion flame 4- unstable diffusion flame 5- random autoignition kernel. The high-speed imaging helps to measure the location, lifetime and frequency of autoignition kernel using the in-house image processing developed code. Furthermore, the CH chemiluminescence imaging via an optical band-pass filter ensures that the jet composition is chemically quenched at the nozzle tip. The autoignition kernel can occur in radial and axial domain determined by the jet temperature and Reynolds number. The high-speed imaging shows that the most probable zone for autoignition kernel formation is on the jet axis and the jet Reynolds number has the major effect on axial distance. The jet temperature development merely extends this domain in the axial direction. Moreover, the temperature directly affects the lifetime and frequency of autoignition kernel.

Keywords: Autoignition kernel, Turbulent jet, Experimental test, Ignition, Extinction