

اشتعال گذرای سوخت جامد در محفظه احتراق انبساط ناگهانی

مرتضی سرباز کرج آباد^{۱*}، علیرضا پیشه ور^۲، علی اکبر جمالی^۳

۱- کارشناس ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، morteza.sarbaz98@ihu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، alireza195619@ihu.ac.ir

۳- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، jamalis5@gmail.com

* نویسنده مخاطب

چکیده

رگرسیمون گذرا و احتراق یک سوخت جامد در یک جریان اکسید کننده داغ در یک محفظه احتراق انبساط ناگهانی مورد مطالعه قرار گرفت. احتراق همرفتی سوخت جامد (پلی متیل متاکریلات) در یک محفظه احتراق انبساط ناگهانی از منظر فعل و انفعالات شعله و گرداب بررسی شده است. سه فاز از گسترش شعله گذرا از طریق تشخیص تجسم جریان و سرعت سنجی تصویر ذرات شناسایی می شوند. نفوذ گردابه های کوچک / بزرگ به ترتیب در رژیم های قبل / بعد از اشتعال آشکار می شود، که تبدیل گرداب کوچک به بزرگ را به دلیل انتشار گرما نشان می دهد. با توجه به کاهش زمان واکنش مشخصه و افزایش اختلاط، اولین اشتعال در انتهای پایین دست سوخت مشاهده می شود، پس از آن یک شعله اولیه تشکیل می شود و شروع به گسترش شعله در خلاف جهت می کند. در طول گسترش، رفتار غلظتی هسته های شعله تحت تسلط گرداب های کوچک در نظر گرفته می شود. اثرات ترکیبی گرداب های شکسته و پیرولیز ادامه یافته، خاموشی - اشتعال دوره ای را در اطراف ناحیه اتصال مجدد معرفی می کند. در مرحله نهایی، حباب هسته های شعله به لایه برشی توسط گرداب های ریزشی بزرگ تسهیل می شود و شعله انتشار پایدار برقرار می شود. این مطالعه بینش جدیدی در مورد اشتعال همرفتی سوخت جامد در جریان جدا - اتصال مجدد ارائه می دهد.

کلمات کلیدی: اشتعال، انبساط ناگهانی، سوخت جامد، شعله و گرداب، احتراق

مقدمه

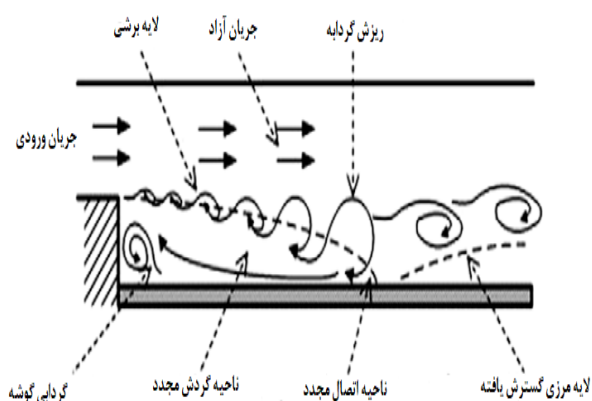
محفظه احتراق انبساط ناگهانی که با هندسه نسبتاً ساده آن مشخص می شود، به طور گسترده در کاربردهای عملی مورد استفاده قرار می گیرد. پله در محفظه احتراق به عنوان جزء اصلی نگهدارنده شعله عمل می کند، و ویژگی های مختلفی در جریان جداسازی و اتصال مجدد بر روی پشت پله مشاهده می شود. در میان آنها، متمایزترین الگوها عبارتند از گرداب گوشه، ناحیه چرخش مجدد، لایه برشی، گرداب های ریزش، ناحیه اتصال مجدد، و لایه مرزی دوباره توسعه یافته (شکل ۱). منطقه چرخش محیطی را فراهم می کند که در آن سرعت جریان بسیار کمتر از جریان آزاد است و از خاموش شدن شعله جلوگیری می کند. از سوی دیگر، نفوذ آشفته قوی در لایه برشی اختلاط بین واکنش دهنده ها را بهبود می بخشد. فعل و انفعالات پیچیده بین الگوها توسط گردابه های ریزشی از لایه برشی معرفی می شوند که با موضوع ناپایداری مرتبط هستند [۱،۲]. با این وجود، با توجه به انتشار انرژی کنترل شده و توزیع شده معمولی احتراق سوخت جامد غیر پیش آمیخته که در این مطالعه بررسی شده است، نگرانی از ناپایداری در مقایسه با همای سوخت مایع آن کمتر برجسته است [۳].

بیشتر مطالعات در مورد احتراق های انبساط ناگهانی بر جریان غیر واکنشی و الگوهای انتقال حرارت متمرکز است. برای جریان واکنشی، موارد از پیش آمیخته به طور جامع تری مورد بحث قرار می گیرند [۴-۷]. به جز تحقیق در مرجع [۸-۱۳]، ادبیات اختصاص داده شده به پدیده اشتعال سوخت جامد در احتراق های انبساط ناگهانی نادر است. مروری بر اصول اولیه اشتعال سوخت جامد ممکن است به [۱۴] ارجاع شود، که در آن اشتعال به دو حالت جلو و عقب دسته بندی می شود. اشتعال پیشرانه منفرد در محیطی ساکن و اشتعال / اشتعال پذیری پیشرانه های مختلف بیشتر برای

تأیید مدل های نظری مورد بررسی قرار گرفت [۱۵]. تا آنجا که به اشتعال در احتراق مربوط می شود، اکثر مطالعات به بررسی اثرات هندسه احتراق (ارتفاع پله) و ترکیب سوخت بر روی حد اشتعال [۱۶-۲۱] می پردازند، در حالی که برخی از ویژگی های مرتبط با اشتعال گذرا نشان داده شده است [۲۲]. از سوی دیگر، مشابه موتورهای رم جت سوخت جامد واقعی، اکثر سکوها تحقیقاتی از جرقه زن خارجی برای شروع احتراق استفاده می کنند [۳].

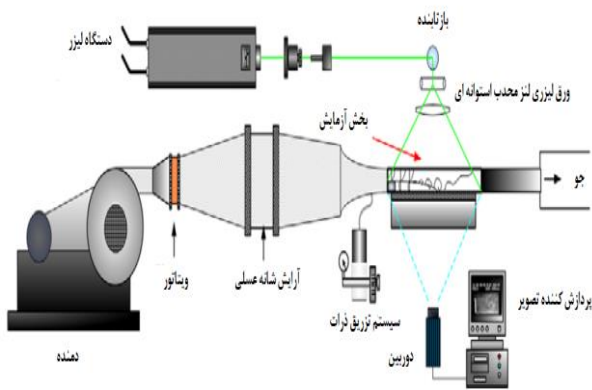
قبل از ایجاد شعله پایدار، هسته های شعله بلافاصله پس از اشتعال روی سطح سوخت جامد پخش می شوند. دو دسته گسترش شعله با توجه به جهت نسبی آن نسبت به جریان اکسید کننده شناسایی می شود. اگر جهت گسترش شعله با جهت جریان اکسید کننده مطابقت داشته باشد، این یک گسترش "هم جهت" است. در غیر این صورت، به عنوان "مخالف" شناخته می شود، که برای آن مخلوط قابل اشتعال بدون شعله که جلوتر از شعله با انتشار بخار سوخت در پشت شعله تشکیل شده است، بسیار مهم است [۲۳]، و بررسی تئوری ها برای گسترش شعله مخالف است. می توان به [۲۴] اشاره کرد.

مکانیسم های کنترلی متمایز برای حالت های مربوط به گسترش شعله پیشنهاد شده است [۲۵]. در حالی که سینتیک شیمیایی فاز گاز برای گسترش شعله مخالف حیاتی است، انتقال حرارت شعله به جامد در حالت همزمان غالب تر در نظر گرفته می شود. ویژگی های گسترش شعله برای دو حالت تحت جریان های صرفاً اجباری در مرجع [۲۶]، که در آن مدلی برای گسترش شعله مخالف فرموله و تحلیل می شود.



شکل ۱: یک نمودار شماتیک از ساختار جریان در یک محفظه احتراق.

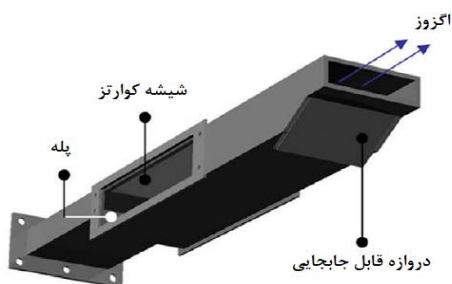
تا آنجا که به گسترش شعله در موشک های سوخت جامد مربوط می شود، تجزیه و تحلیل از دیدگاه غلظت اکسیژن، فشار، سرعت جریان آزاد، سرعت جریان جرمی جرقه زن، ناحیه گلوگاه، و زبری سطح پیشرانه انجام می شود [۲۷]. برای کاربردهای روی موشک های هیبریدی، دمیدن شعله در مجاری سوخت باریک مورد مطالعه قرار می گیرد [۲۸]، که در آن جداسازی جریان



شکل ۲: یک نمودار شماتیک از آزمایش لوله متصل.

بخش آزمایش یک احتراق با انبساط ناگهانی است (شکل ۳). ابعاد ورودی که در بالادست پشت پله قرار دارد ۲۰۰ میلی متر (عرض) ۵۰ میلی متر (ارتفاع) دارد. یک تکه پلی متیل متاکریلات با ضخامت ۶ میلی متر به عنوان گرین سوخت عمل می کند و ارتفاع پله (h) در این مطالعه ۳۵ میلی متر تعیین شده بود. گرین سوخت ابتدا بر روی یک شاسی نگهدارنده ساخته شده از فولاد ضد زنگ به عنوان یک مجموعه سوخت جامد کامل نصب می شود. پس از اینکه دمای جریان اکسید کننده به T_0 تعیین شده (۸۱۰ درجه سانتیگراد) رسید، کل مجموعه از طریق یک دروازه در پایین دست به محفظه احتراق وارد می شود (شکل ۳).

نصب به محض رسیدن انتهای بالادست آن و تماس با پشت پله کامل می شود. شیشه های کوارتز نسوز در سه ضلع غیر از دیواره پایینی بخش آزمایش برای دسترسی نوری استفاده می شوند. برای ضبط تصاویر اشتعال گذرا، از یک دوربین پرسرعت با قابلیت ثبت حداکثر ۱۰۰۰۰ فریم در ثانیه با وضوح 1024×1280 پیکسل استفاده شده است. یک پورت ترموکوپل در ۱۴۰ میلی متر (دیوار بالایی) در بالادست پشت پله قرار گرفته است تا دمای جریان اکسید کننده را کنترل کند. ترموکوپل مورد استفاده از نوع K با قطر نوک ۱۲۵ میلی متر است.



شکل ۳: شماتیک از محفظه احتراق انبساط ناگهانی.

ساختار گردابی جریان به صورت کمی از طریق سرعت سنجی تصویر ذرات تجزیه و تحلیل می شود. جریان اکسید کننده با ذرات اکسید آلومینیوم با قطر متوسط ۳ میلی متر تزریق می شود. سیستم سرعت سنجی تصویر ذرات از یک لیزر با حداکثر نرخ تکرار ۱۵ هرتز و یک دوربین تشکیل شده است که قادر است دو تصویر متوالی را در ۱۰۰ میکرو ثانیه نشان دهد. دو

در مقابل لبه جلویی شعله برای حفظ زمان ماند کافی برای اکسید کننده و سوخت گازی یافت می شود.

با این وجود، مقالاتی که به طور خاص با شعله های گذرا منتشر می شوند، پیشران جامد با اشتعال خودکار در احتراق های انبساط ناگهانی، که دارای پتانسیل قابل توجهی برای پیشبرد سیستم های محرکه هستند، بسیار نادر هستند.

به جز مرزهای محدود، شعله انتشار در یک احتراق انبساط ناگهانی شبیه شعله جت غیرپیش آمیخته [۳] است، که برخی از متون قبلی به نفوذ گردابها اشاره کرده اند. اختلاط کافی بین بخار سوخت و جریان اکسید کننده برای اشتعال بسیار مهم است، که از منظر "واکنشی ترین کسر مخلوط" در مرجع [۲۹] تأیید شد.

با توجه به تجزیه و تحلیل شعله جت انتشار، اختلاط از طریق گرداب انجام می شود [۳۰، ۳۱]. از سوی دیگر، اثرات کرنش متناظر گردابها نیز مورد مطالعه قرار گرفته است [۳۰-۳۳]. بر این اساس، انتظار می رود که ارتباط بین گردابها و گسترش اشتعال/شعله در مطالعه حاضر قابل توجه باشد. با این وجود، برای شعله گذرا که روی سطح سوخت جامد در احتراق های انبساط ناگهانی واقعی پخش می شود، اثرات گرداب های ریزش و رفتار تلاطم به ندرت مورد توجه قرار گرفته اند.

هدف از مطالعه حاضر، روشن کردن اثرات ساختارهای گردابی در طول اشتعال گذرا سوخت جامد همدم مشتعل در یک احتراق انبساط ناگهانی است.

این رویکرد نه تنها به طور بالقوه از بحث در مورد سیستم های پیشران بدون جرقه زن و برخی مسائل ایمنی آتش سوزی سود می برد، بلکه انتظار می رود ساختارهای جریان متناظر (مانند گردابها) را بدون دخالت رویکرد اشتعال آزمایشی به طور واضح تر نشان دهد. با این وجود، زمان اشتعال نسبتاً غیرقابل پیش بینی است و تشخیص کمی در زمان واقعی اشتعال گذرا از طریق سرعت سنجی تصویر ذرات^۱ چالش برانگیز است. در نتیجه، اندازه گیری های سرعت سنجی تصویر ذرات برای هر دو رژیم قبل و بعد اشتعال برای تکمیل تصاویر با سرعت بالا که در طول اشتعال گذرا در مطالعه حاضر ثبت شده اند، انجام می شوند.

همراه با مقایسه ساختارهای گردابی متمایز در رژیم های قبل/پس از اشتعال، مشاهدات پدیدارشناختی به عنوان مبنایی عملی برای ارزیابی برهم کنش های گرداب شعله همراه است. نتایج این مطالعه نه تنها بینش جامع تری را در مورد این فرآیند اشتعال ویژه ارائه می دهد، بلکه انتظار می رود برای پیشرفت کنترل اشتعال نیز مفید باشد.

طراحی آزمایش

یک مرکز آزمایش لوله متصل برای کاربردهای رمجت در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. این تاسیسات شامل یک دمنده، یک ویتاتور^۲، یک بخش ته نشینی جریان (شامل یک پخش کننده، یک محفظه ته نشینی و یک مخروط انقباضی) و یک بخش آزمایشی است.

یک نمودار شماتیک از ساخت کلی تونل باد در شکل ۲ نشان داده شده است. جریان اکسید کننده گرم شده مورد نیاز برای آزمایش از احتراق مخلوط هوا - (گاز نفت مایع)^۳ در داخل ویتاتور تولید می شود.

1 PIV
2 vitiator
3 LPG

ورق لیزری همپوشانی از طریق اندازه‌گیری‌های نوری تشکیل می‌شوند که در امتداد محور مرکزی بخش آزمایشی قطع می‌شوند. لیزر به صورت متوالی با تأخیر زمانی ۳۰۰ میکرو ثانیه تابیده می‌شود و نور پراکنده شده از ذرات تزریق بر روی فریم‌های مربوطه تصویر می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار، بردارهای سرعت از طریق الگوریتم همبستگی متقابل با ناحیه بازجویی 16×16 پیکسل تعیین می‌شوند. توجه داشته باشید که برای تسهیل تشخیص سرعت سنجی تصویر ذرات تحت وجود شعله، یک فیلتر نوری (انتقال < 0.85) برای نور پراکنده ذرات تزریق ($k = 532$ نانومتر) با لنز جلویی دوربین تطبیق داده شده است.

برای اعتبارسنجی اندازه‌گیری‌های سرعت سنجی تصویر ذرات، از تناسب گاوسی پیک‌های همبستگی ذره - تصویر برای حل جابه‌جایی زیرپیکسل استفاده می‌شود [۳۴]. هم فیلترهای انحراف استاندارد جهانی و هم فیلترهای میانگین محلی برای شناسایی و حذف بردارها و نقاط پرت جعلی (معمولاً > 3) اعمال می‌شوند و درون یابی خطی برای پر کردن شکاف‌ها معرفی می‌شود [۳۵].

در این مطالعه، خطای سیستماتیک بر اساس کالیبراسیون و تجربه تخمین زده می‌شود، در حالی که خطای تصادفی از طریق تجزیه و تحلیل آماری داده‌های خام (با سطح اطمینان ۹۵٪) ارزیابی می‌شود [۳۶،۳۷].

نتایج و بحث

از آنجایی که تکه سوخت جامد به طور ناگهانی در جریان دمای بالا قرار می‌گیرد، پیرولیز قابل توجهی از سوخت ممکن است قبل از اشتعال رخ دهد. مدت زمان قرار دادن تکه سوخت تا لحظه اشتعال به عنوان تأخیر اشتعال تعریف می‌شود. در این مطالعه، گسترش شعله دینامیکی پس از اشتعال متمایز از مواردی است که در مقالات قبلی نشان داده شده است، که در آن شیوه‌ای پیوسته‌تر مشاهده شده است.

بر اساس [۱۴]، اشتعال یک موشک سوخت جامد به سه مرحله تقسیم می‌شود: (۱) دوره واکنش حرارتی قبل از وقوع شعله اولیه، (۲) دوره گسترش شعله و (۳) دوره پر کردن فشار. بحث در این مطالعه در دوره‌های (۱) و (۲) نهفته است.

توجه داشته باشید که داده‌ها از بیش از ۱۰ آزمایش جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل می‌شوند. درست است که تأخیر اشتعال دقیق ممکن است از آزمایشی به آزمایشی دیگر منحرف شود. با این وجود، مراحل ثابت اشتعال از آزمایش‌های مختلف تحت یک تنظیم به نتیجه می‌رسد. عکس‌های نشان‌دهنده در اثر حاضر به‌عنوان واضح‌ترین و معرف‌ترین عکس‌ها در میان منابع متعدد انتخاب شده‌اند.

فرآیند اشتعال

فرآیند اشتعال گذرا، که به عنوان مدت زمان از اولین مشاهده هسته شعله بر روی سطح سوخت (اشتعال) تا زمانی که لایه برشی با ایجاد یک شعله پایدار مشتعل شود، تعریف می‌شود. در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس تعریف «اشتعال» در مطالعه حاضر، هسته شعله اولیه در شکل ۴ در $(t = \tau)$ تشکیل شده است. در ابتدای اشتعال، هسته‌های شعله ریزی در اطراف انتهای پایین دست تکه سوخت تشکیل می‌شود. تکامل هسته‌های شعله شروع به گسترش همزمان شعله در لایه مرزی توسعه‌یافته‌ای می‌کند که توسط آن شعله اولیه در نهایت ایجاد می‌شود. شعله اولیه به عنوان یک

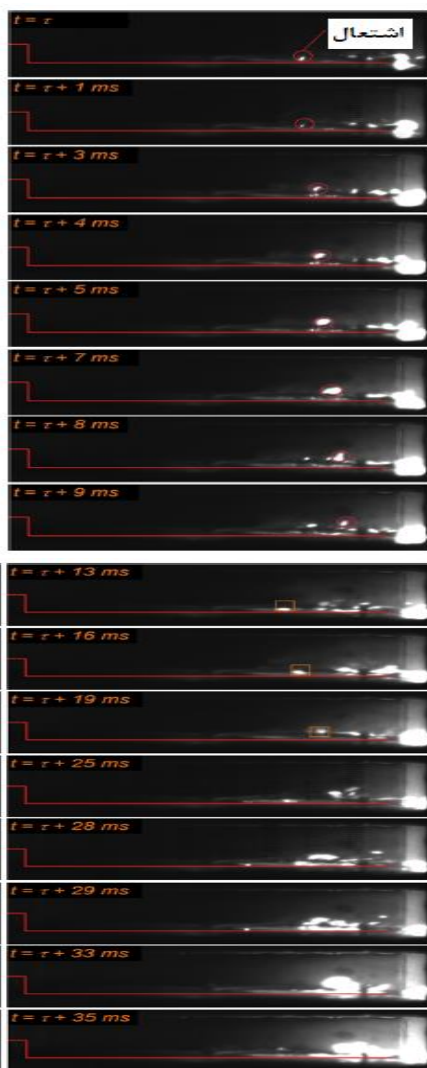


شکل ۴: تصاویر متوالی از اشتعال گذرا



شکل ۵: عدم وجود شعله در ناحیه گردش مجدد پس از اشتعال (همانطور که با فلش نشان داده شده است).

نهایت، هسته‌های شعله آشکارتر مشاهده می‌شود و یک شعله اولیه در انتهای پایین دست تکه سوخت جامد باشد، اشتعال در انتهای پایین دست تکه سوخت جامد حالت مطلوب‌تری در این مطالعه پیدا می‌کند. این پدیده را نتیجه رقابت بین زمان اقامت و دمای بالا می‌دانند. به طور کلی، یک اشتعال موفق با نسبت بین زمان ماند و زمان واکنش شیمیایی مشخصه مخلوط بخار سوخت - اکسیدکننده تعیین می‌شود. از منظر انرژی درگیر، این نسبت برابر است با نسبت بین نرخ آزاد شدن انرژی و تلفات حرارتی همرفتی. معمولاً انتظار می‌رود مکان‌هایی که زمان اقامت طولانی‌تری دارند، مانند منطقه چرخش مجدد، مکان‌های مناسبی باشند که اشتعال موفقیت آمیز را ممکن می‌کند. با این حال، اگر زمان واکنش شیمیایی مشخصه به طور قابل توجهی کاهش یابد، غالب زمان ماند ممکن است پیشی بگیرد. دو حالت اشتعال همرفتی ذکر شده در بالا در مرجع [۸] مورد بحث قرار گرفته است.



شکل ۶: فاز ۱ اشتعال گذرا. دایره و مربع رفتار غلظتی هسته‌های شعله را نشان می‌دهند.

در فاز ۲، گسترش شعله مخالف به ناحیه اتصال مجدد می‌رسد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، شعله‌های آتش بلافاصله خاموش شده و توسط گرداب‌های شکسته به دلیل اتصال مجدد جریان اکسید کننده، پراکنده می‌شوند. توجه داشته باشید که برخی از شعله‌های پراکنده در بالادست از طریق فاصله بین تکه سوخت و دیواره جانبی بخش آزمایش پخش می‌شوند. از سوی دیگر، بیشتر شعله‌های پراکنده به پایین دست به لایه مرزی توسعه یافته منتقل می‌شوند، جایی که شعله اولیه قبلاً ایجاد شده است. مشاهده می‌شود که شعله اولیه در حال نوسان است، که به اثرات ترکیبی ریزش گرداب و کاهش بخار سوخت در پایین دست نسبت داده می‌شود. در حالی که بخار سوخت حاصل از پیرولیز ادامه‌دار از شعله

اگرچه انتظار می‌رود که ناحیه چرخش بلافاصله در پایین دست پشت پله مکانی ایده‌آل برای اشتعال سوخت جامد باشد، اشتعال در انتهای پایین دست تکه سوخت جامد حالت مطلوب‌تری در این مطالعه پیدا می‌کند. این پدیده را نتیجه رقابت بین زمان اقامت و دمای بالا می‌دانند. به طور کلی، یک اشتعال موفق با نسبت بین زمان ماند و زمان واکنش شیمیایی مشخصه مخلوط بخار سوخت - اکسیدکننده تعیین می‌شود. از منظر انرژی درگیر، این نسبت برابر است با نسبت بین نرخ آزاد شدن انرژی و تلفات حرارتی همرفتی. معمولاً انتظار می‌رود مکان‌هایی که زمان اقامت طولانی‌تری دارند، مانند منطقه چرخش مجدد، مکان‌های مناسبی باشند که اشتعال موفقیت آمیز را ممکن می‌کند. با این حال، اگر زمان واکنش شیمیایی مشخصه به طور قابل توجهی کاهش یابد، غالب زمان ماند ممکن است پیشی بگیرد. دو حالت اشتعال همرفتی ذکر شده در بالا در مرجع [۸] مورد بحث قرار گرفته است.

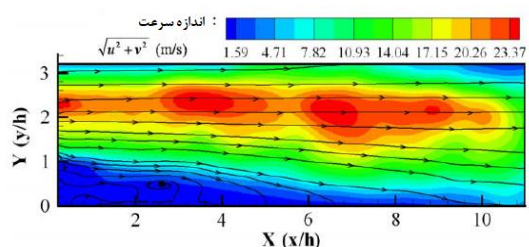
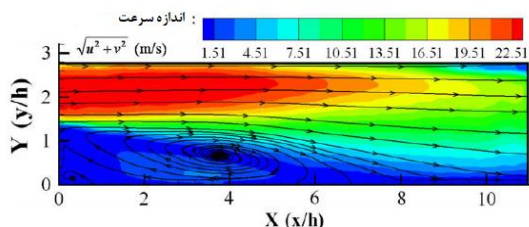
در حالی که حالت ۱ به وقوع اولین هسته اشتعال در بالادست ناحیه اتصال مجدد اشاره دارد. اشتعال در انتهای پایین دست تکه سوخت به عنوان حالت ۲ طبقه بندی. مشخص شد که این پدیده با پیش‌بینی‌های معادله آرنیوس مطابقت دارد. اشتعال عقب مشاهده شده در مطالعه حاضر با اشتعال حالت ۲ مطابقت دارد که ممکن است از منظر زمان اقامت نیز مشهود باشد. برای ارزیابی زمان ماند جریان در محفظه احتراق انبساط ناگهانی، یک تخمین ساده از طریق تقسیم ارتفاع پله بر سرعت ورودی جریان اکسید کننده به دست می‌آید. زمان تخمینی اقامت مطالعه حاضر اساساً معادل حالت ۲ در رفرنس [۸] است. در مقایسه با شرایط آزمایش اشتعال حالت ۱، زمان ماندگاری بیشتر در حالت ۲ مزیت منطقه چرخش مجدد را کاهش می‌دهد. بر این اساس، منطقه با دمای بالاتر، مانند انتهای پایین دست تکه سوخت، برای وقوع اشتعال مطلوب می‌شود زیرا زمان واکنش به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

در این مطالعه، پیرولیز سوخت جامد پس از ورود تکه سوخت به بخش آزمایش انبساط ناگهانی تحت برخورد جریان اکسید کننده پایدار حرارتی آغاز می‌شود. همانطور که پیرولیز ادامه می‌یابد، اختلاط بین بخار سوخت و جریان اکسید کننده توسط گرداب‌های کوچک حمل شده توسط جریان اکسید کننده جدا شده انجام می‌شود. این مخلوط به عنوان واکنش دهنده برای احتراق پیش آمیخته مشخص می‌شود و برخی از هسته‌های شعله در پایین دست تکه سوخت تشکیل می‌شوند. در نتیجه، دما به تدریج در آن منطقه افزایش می‌یابد و زمان واکنش شیمیایی مشخصه مخلوط اکسید کننده بخار سوخت به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. پدیده خاص نشان می‌دهد که اگر مزیت زمان ماندن قادر به اطمینان از اشتعال در منطقه چرخش مجدد نباشد، دمای بالا در انتهای پایین دست مجموعه سوخت جامد جایگزین می‌شود. در نتیجه، دمای بالا تنها عامل غالب می‌شود، زیرا تجزیه در اثر حرارت ادامه می‌یابد و سوخت جامد تخلیه می‌شود.

مراحل گسترش شعله

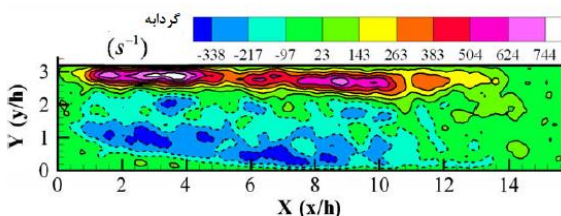
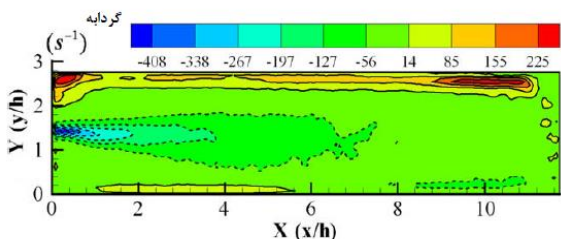
بر اساس تصاویر متوالی ثبت شده در طول اشتعال گذرا، سه فاز متمایز از گسترش شعله شناسایی و با جزئیات تجزیه و تحلیل می‌شوند. در لحظه اشتعال، برخی از هسته‌های شعله که به صورت چرخشی پراکنده شده‌اند، در بالای انتهای پایین دست تکه سوخت جامد مشاهده می‌شوند (فاز ۱؛ شکل ۶). آنها به صورت دوره‌ای به دلیل جریان اکسید کننده ورودی با تلاطم شدید و نرخ کرنش بالا تشکیل می‌شوند و منفجر می‌شوند. در

تشخیص سرعت سنجی تصویر ذرات به طور میانگین محاسبه می‌شود. یک ساختار چرخشی بزرگ برای قرار دادن پایین دست پشت پله با طول اتصال مجدد $Xr = 7h$ برای جریان غیر واکنشی مشاهده شده است. در مقابل، ساختار گردش مجدد برای جریان واکنش به دلیل افزایش ویسکوزیته نسبتاً ناچیز است [۴۹].



شکل ۸: خطوط متوسط خط جریان با اندازه سرعت. (بالایی) جریان بدون واکنش، جریان واکنش (کمتر) [۴۳].

خطوط گردابی متوسط هم برای جریان‌های غیرواکنش کننده و هم برای جریان‌های واکنش‌دهنده در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. برای جریان واکنش‌دهنده، گردابه‌های قوی بیشتر در پایین دست پخش می‌شوند و دامنه اشغال شده توسط ساختارهای گردابی در جهت عقربه‌های ساعت افزایش می‌یابد.

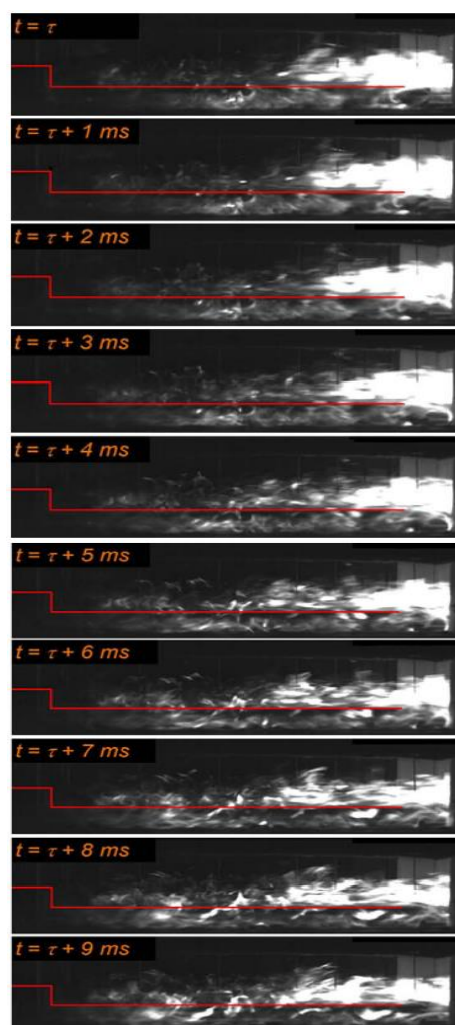


شکل ۹: میانگین خطوط گردابی. جریان بدون واکنش (بالایی)؛ جریان واکنش دهنده (پایین) [۴۳].

در نتیجه لایه برشی ضخیم شده و طول اتصال مجدد کاهش می‌یابد. رشد لایه مرزی مجاور دیوار بالایی نیز مشاهده می‌شود. توجه داشته باشید که اگرچه وجود ساختار منسجم در مقیاس بزرگ در کانتور میانگین مشخص شده است، انتظار می‌رود که در خطوط گذرا به وضوح نشان داده شود. تجسم جریان گذرا بدون واکنش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. گردابه‌های کوچکی در داخل لایه برشی مشاهده می‌شود، همانطور که بین

اولیه پشتیبانی می‌کند، انرژی حمل شده توسط هسته‌های شعله نیز ممکن است توسط گردابه‌ها از بین برود. از سوی دیگر، کاهش بخار سوخت، شعله را نیز خاموش می‌کند، در حالی که ریزش گرداب ممکن است اختلاط بین واکنش دهنده‌ها را بهبود بخشد و باعث اشتعال مجدد شود. علاوه بر این، از آنجایی که انرژی به طور مداوم توسط گردابه‌های برخوردی منتقل می‌شود، گسترش شعله مخالف نمی‌تواند مستقیماً به منطقه چرخش مجدد حرکت کند. با این وجود، منطقه اتصال مجدد به طور مداوم توسط هر دو جریان اکسید کننده مجدد وصل شده و گسترش شعله مخالف گرم می‌شود.

فاز ۳ شامل اشتعال موفقیت آمیز لایه برشی به دلیل حباب شعله‌های پراکنده در ناحیه چرخش مجدد است. نقش‌های مرتبطی که توسط گردابه‌های ریزش انجام می‌شود، که در میان آنها فعل و انفعالات فشرده پیش می‌رود، در بخش‌های زیر بحث می‌شود.

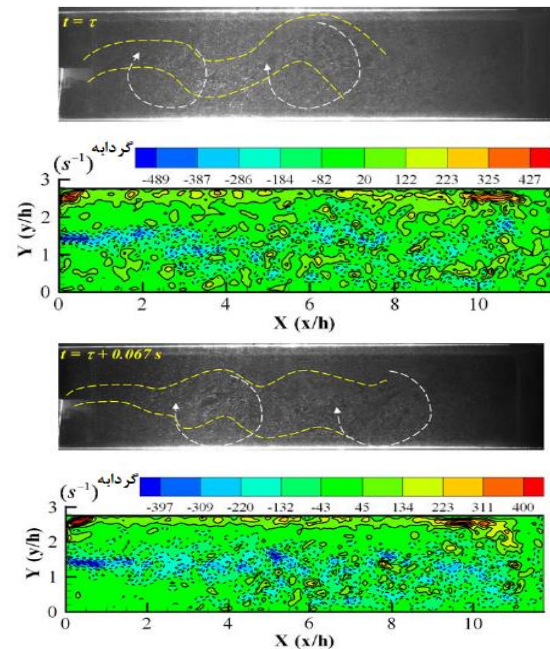


شکل ۷: فاز ۲ اشتعال گذرا

ساختارهای گردابی جریان

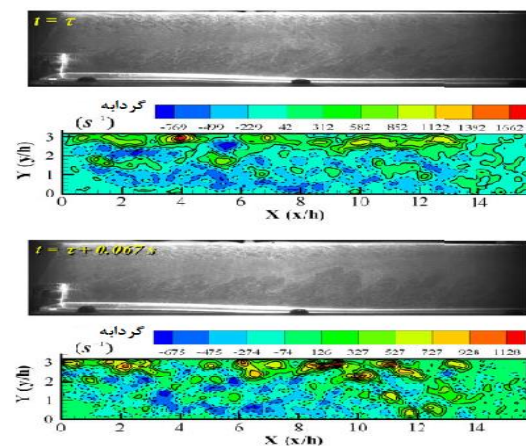
برای توصیف صریح جریان جداسازی - اتصال مجدد بر روی پشت پله، تجزیه و تحلیل ساختار گردابی مربوطه ضروری است. انتظار می‌رود که شعله پخش شده در طول اشتعال گذرا نیز تحت سلطه گردابه‌ها باشد. شکل ۸ خطوط جریان را با اندازه‌های سرعت جریان‌های بدون واکنش (پیش اشتعال) و واکنش دهنده (پس از اشتعال) در محفظه احتراق انبساط ناگهانی نشان می‌دهد که از ۳۰ مجموعه داده‌های متوالی از

دو خط نقطه زرد نشان داده شده است. به دنبال لایه برشی، گرداب‌های کوچک به تدریج در ساختارهای گردابی بزرگتر در پایین دست ادغام می‌شوند، که با خطوط چین سفید نشان داده می‌شوند. این الگو نیز با کانتور مربوط به گردابه نشان داده می‌شود.



شکل ۱۰: ساختارهای جریان گذرا و خطوط گردابی مربوط به جریان غیرواکنشی [۴۳].

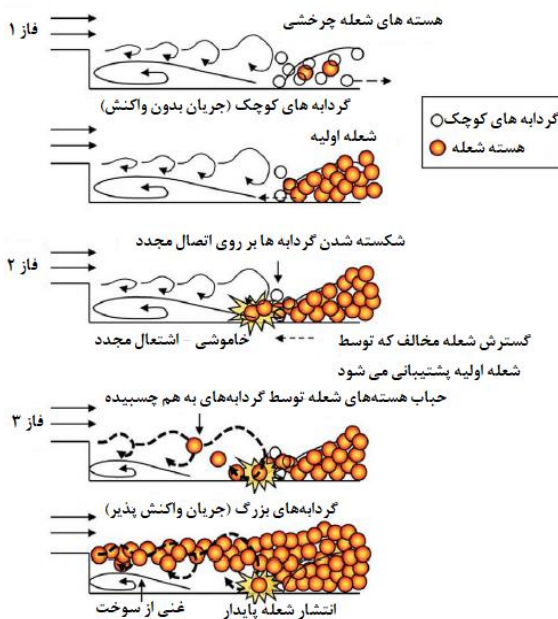
در مقابل، گرداب‌های بزرگ به وضوح برای مورد واکنش مشاهده می‌شود (شکل ۱۱). ساختار گردابی خاص نیز با توزیع متمایز ذرات تزریقی بین جریان اکسید کننده و منطقه زیر لایه برشی مشهود است. برای جریان واکنش، گرداب‌ها به طور مستقیم به سمت پایین دست حرکت می‌کنند، بدون اینکه گردابی در همتای غیر واکنشی خود ادغام شود. توجه داشته باشید که بخار سوخت توسط گردابه‌های بزرگ کشیده می‌شود و به صورت یک جریان ضعیف رو به بالا رفتار می‌کند. جریان رو به بالا برای خنثی کردن جریان بالادستی که توسط گرداب‌ها القا می‌شود، خنثی می‌کند، که با نتایج حاصل از مطالعه خنک سازی تعلق (نفوذ) در یک کانال انبساط ناگهانی مطابقت دارد [۴۰]. در نتیجه، ساختار چرخش در مقایسه با حالت بدون واکنش نسبتاً ناچیز است.



شکل ۱۱: ساختارهای جریان گذرا و خطوط گردابی مربوط به جریان واکنش دهنده [۴۳].

فعل و انفعالات شعله و گرداب

با مقایسه فرآیند گسترش شعله و ساختارهای گردابی در رژیم‌های قبل/پس از اشتعال، برهم کنش‌های شعله - گردابی به وضوح نشان داده می‌شوند (شکل ۱۲). همانطور که اشتعال گذرا به سمت فاز ۳ پیش می‌رود، ساختار گردابی مربوطه نیز به تدریج به جریان واکنش دهنده تبدیل می‌شود که توسط گرداب‌های بزرگ تحت سلطه است. از سوی دیگر، ویژگی‌های ساختار گردابی غیرواکنش در فاز ۱ قابل توجه‌تر است. از آنجایی که گرداب‌های کوچک بر جریان غیرواکنش کننده غالب هستند، هسته‌های شعله به طور مداوم در معرض تلفات حرارتی همرفتی با ریزش گرداب‌ها قرار می‌گیرند.



شکل ۱۲: تصاویر شماتیک از برهمکنش شعله - گرداب در طول اشتعال گذرا.

مشاهده می‌شود که این برهم کنش تعامل رفتار چرخشی هسته‌های شعله را معرفی می‌کند (شکل ۶). با این وجود، اختلاط بخار سوخت و جریان اکسید کننده نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه، در حالی که گسترش همزمان شعله توسط گرداب‌های ریزش کمک می‌کند، همتای مخالف آن به طور قابل توجهی مسدود می‌شود. یک شعله اولیه به تدریج به دلیل انباشته شدن شعله همزمان در لایه مرزی توسعه یافته تشکیل می‌شود. به دلیل اختلاط به کمک گرداب، شعله اولیه در انتهای پایین دست تکه سوخت دارای ویژگی شعله از پیش آمیخته است.

وجود شعله اولیه به عنوان یک منبع گرما برای تحریک شعله مخالف در فاز ۲ عمل می‌کند. از آنجایی که ناحیه اتصال مجدد به طور مداوم توسط جریان اکسید کننده برخوردی و گسترش شعله مخالف گرم می‌شود، تجزیه در اثر حرارت شدید سوخت جامد ادامه می‌یابد. همانطور که در رفرنس [۴۱] بیان شده، که در آن بزرگترین ضریب انتقال حرارت در نزدیکی ناحیه اتصال مجدد قرار دارد. گرداب‌های حمل شده توسط لایه برشی برخوردی در ناحیه اتصال مجدد شکسته می‌شوند. بر این اساس، کرنش برشی بالا مربوط به گردابه‌های شکسته در حال رقابت با گسترش شعله مخالف است، که توسط شعله اولیه در لایه مرزی توسعه یافته دوباره به حرکت در می‌آید. از سوی دیگر، به دلیل تامین سوخت کافی و اختلاط به کمک گرداب‌ها، هسته‌های شعله در ناحیه اتصال مجدد تشکیل می‌شوند.

اشتعال مجدد هسته‌های شعله مشاهده می‌شود و گسترش شعله مخالف در اطراف ناحیه اتصال مجدد مسدود می‌شود. ساختار گردابی رژیم قبل از اشتعال که به انتشار گرمای کنترل شده و توزیع شده معمولی احتراق غیر پیش آمیخته سوخت جامد نسبت داده می‌شود، با ادامه گسترش شعله، به الگوی تحت سلطه گرداب‌های بزرگ تبدیل می‌شود. در فاز ۳، دگرگونی کوچک به بزرگ سازه‌های گردابی در نهایت حباب هسته‌های شعله را در لایه برشی تسهیل می‌کند. پس از آن شعله نفوذی پایدار برقرار می‌شود، که نشان دهنده پایان اشتعال گذرا است. نتایج حاصل از این مطالعه نه تنها به درک اشتعال همرفتی سوخت جامد تحت تأثیر گردابه‌های ریزشی کمک می‌کند، بلکه دیدگاه‌های جدیدی را برای اقدامات کنترل اشتعال، که برای عملیات قابل اعتماد سیستم‌های محرکه سوخت جامد ضروری است، ارائه می‌کند.

مراجع

- 1- Keller, J. O., Vaneveld, L., Korschelt, D., Hubbard, G. L., Ghoniem, A. F., Daily, J. W., & Oppenheim, A. K. (1982). Mechanism of instabilities in turbulent combustion leading to flashback. *Aiaa Journal*, 20(2), 254-262.
- 2- Schadow, K. C., & Gutmark, E. (1992). Combustion instability related to vortex shedding in dump combustors and their passive control. *Progress in Energy and Combustion Science*, 18(2), 117-132.
- 3- Krishnan, S., & George, P. (1998). Solid fuel ramjet combustor design. *Progress in aerospace sciences*, 34(3-4), 219-256.
- 4- Ganji, A. R., & Sawyer, R. F. (1980). Experimental study of the flowfield of a two-dimensional premixed turbulent flame. *AIAA Journal*, 18(7), 817-824.
- 5- Cohen, J. M., Wake, B. E., & Choi, D. (2003). Investigation of instabilities in a lean, premixed step combustor. *Journal of Propulsion and Power*, 19(1), 81-88.
- 6- Ghoniem, A. F., Park, S., Wachsman, A., Annaswamy, A., Wee, D., & Altay, H. M. (2005). Mechanism of combustion dynamics in a backward-facing step stabilized premixed flame. *Proceedings of the Combustion Institute*, 30(2), 1783-1790.
- 7- Behrens, A. A., & Strykowski, P. J. (2007). Controlling volumetric heat release rates in a dump combustor using counter-current shear. *AIAA journal*, 45(6), 1317-1323.
- 8- Yang, J. T., Wu, C. Y. Y., & Din, S. J. (1994). Ignition transient of a polymethylmethacrylate slab in a sudden-expansion combustor. *Combustion and flame*, 98(3), 300-308.
- 9- Wu, C. Y. Y. (1994). Fuel Mixing and Ignition Transient in a Sudden-Expansion Combustor (Doctoral dissertation, Ph. D. Dissertation, Power Mechanical Engineering Dept., National Tsing-Hua Univ., Hsinchu, Taiwan, ROC).
- 10- Yang, J. T., & Wu, C. Y. (1995). Controlling mechanisms of ignition of solid fuel in a sudden-expansion combustor. *Journal of Propulsion and Power*, 11(3), 483-488.
- 11- Wu, C. Y. Y., Yang, J. T., & Yang, H. T. (1997). Effects of inlet configuration on ignition and fuel regression behind a backstep. *Journal of propulsion and power*, 13(6), 714-720.
- 12- Yang, J. T., Hsiao, F. C., & Lin, Y. C. (2009). Transient flame spread during convective ignition of solid fuel in a sudden-expansion combustor. *Combustion and flame*, 156(10), 1917-1925.
- 13- Yang, J. T., Hsiao, F. C., & Lin, Y. C. A Study of Flame Spread Over Convectively Ignited Solid Fuel in a Sudden-Expansion Combustor. In 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (p. 5039).

با این وجود، اتلاف گرمای همرفتی قابل توجهی همیشه با گرداب‌های فراگیر همراه است. در نتیجه، اثرات ترکیبی گرداب‌های شکسته و پیرولیز ادامه‌دار، پدیده خاموشی - اشتعال مجدد را در اطراف ناحیه اتصال مجدد معرفی می‌کند.

گرداب‌های بزرگ برای تسلط بر جریان واکنش غیرپیش‌آمیخته در این مطالعه مشاهده می‌شوند. این الگو با الگوی آشکار شده در مورد پیش‌آمیخته [۴]، که توسط گرداب‌های کوچکی که در رژیم پیش از اشتعال نیز آشکار شده است، متمایز است. این پدیده به انتشار گرمای توزیع شده و کنترل شده نسبت داده می‌شود که نمونه‌ای از احتراق غیرپیش‌آمیخته سوخت جامد است [۳]. با توجه به انتشار گرما در طول اشتعال گذرا، ساختار گردابی رژیم قبل از اشتعال، که توسط گرداب‌های کوچک غالب است، به جریان واکنش‌دهنده غیر پیش‌آمیخته تبدیل می‌شود. دگرگونی کوچک به بزرگ سازه‌های گردابی سرانجام حباب هسته‌های شعله را در لایه برشی امکان‌پذیر می‌سازد، جایی که اختلاط شدید بین بخار سوخت و جریان اکسیدکننده انجام می‌شود [۴۲]. توجه داشته باشید که حباب یک مرحله حیاتی برای اشتعال کامل است و ممکن است فقط از طریق مقیاس گرداب‌های بزرگ به دست آید. شایان ذکر است که قبل از اشتعال کامل، هر دو گسترش شعله همزمان و مخالف در امتداد لایه برشی رخ می‌دهد. با این وجود، گسترش همزمان کمی زودتر از همتای مخالف خود اتفاق می‌افتد، همانطور که در شکل ۴ مشهود است

شکل ۴: ($t = \tau + 48 ms$, $t = \tau + 68 ms$)

نتیجه‌گیری

اشتعال گذرا سوخت جامد پلی‌متیل‌متاکریلات در یک محفظه احتراق انبساط ناگهانی به طور تجربی بررسی شده است. اشتعال همرفتی از طریق رویکرد پیروژن حاصل می‌شود، که از یک جریان اکسیدکننده تولید شده توسط احتراق نفت گاز مایع در یک ویتاتور استفاده می‌کند. گسترش شعله و سازه‌های گردابی واکنش‌دهنده توسط عکس‌برداری با سرعت بالا و سرعت سنجی تصویر ذرات، که از آن سه فاز فرآیند طبقه‌بندی می‌شوند، تجزیه و تحلیل می‌شوند.

تکه سوخت جامد به جای اینکه در نزدیکی پشت پله مشتعل شود، به صورت خودکار در انتهای پایین دست مشتعل می‌شود. این وضعیت به رقابت بین زمان اقامت و دمای بالا نسبت داده می‌شود. به طور کلی، مزیت زمان ماند طولانی تر در ناحیه گردش مجدد با کاهش زمان واکنش در انتهای پایین دست جایگزین می‌شود. گردابه‌های کوچک برای جریان غیرواکنشی بر ساختارهای گردابی تسلط دارند و در فاز اولیه (فاز ۱) اشتعال نیز حیاتی هستند. اختلاط بین بخار سوخت و جریان اکسیدکننده توسط گرداب‌های ریزشی برای ادامه پیرولیز کمک می‌کند. از طرفی هسته‌های شعله‌ای تشکیل شده و به صورت چرخشی در پایین دست پخش می‌شوند.

انتشار همزمان هسته‌های شعله به زودی پس از اشتعال رخ می‌دهد و یک شعله اولیه در لایه مرزی دوباره توسعه یافته تشکیل می‌شود. شعله اولیه، که دارای ویژگی‌های یک شعله از پیش آمیخته است، شعله مخالف را که به سمت ناحیه اتصال مجدد پخش می‌شود، فعال می‌کند (فاز ۲). انتقال حرارت شدید در اطراف ناحیه اتصال مجدد بخار سوخت کافی برای واکنش تولید می‌کند، اما اتلاف گرمای همرفتی قابل توجهی هسته‌های شعله با گردابه‌های شکسته نیز همراه است. در نتیجه، خاموشی دوره‌ای -

- 33- Amantini, G., Frank, J. H., Bennett, B. A. V., Smooke, M. D., & Gomez, A. (2007). Comprehensive study of the evolution of an annular edge flame during extinction and reignition of a counterflow diffusion flame perturbed by vortices. *Combustion and flame*, 150(4), 292-319.
- 34- Westerweel, J. (1997). Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Measurement science and technology*, 8(12), 1379.
- 35- Raffel, M., Willert, C. E., & Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*: Springer Science & Business Media.
- 36- Abernethy, R. B., Benedict, R. P., & Dowdell, R. B. (1985). ASME measurement uncertainty.
- 37- Figliola, R. S., & Beasley, D. E. (2020). *Theory and design for mechanical measurements*. John Wiley & Sons.
- 38- Hsiao, F. C., Chen, C. H., Lin, Y. C., & Yang, J. T. Experimental and Numerical Analyses of Convective Ignition of PMMA in a Sudden-Expansion Channel.
- 39- Pitz, R. W., & Daily, J. W. (1983). Combustion in a turbulent mixing layer formed at a rearward-facing step. *AIAA journal*, 21(11), 1565-1570.
- 40- Tsai, G. L., Lin, Y. C., Wang, H. W., Lin, Y. F., Su, Y. C., & Yang, J. T. (2009). Cooling transients in a sudden-expansion channel with varied rates of wall transpiration. *International journal of heat and mass transfer*, 52(25-26), 5990-5999.
- 41- Tsou, F. K., Chen, S. J., & Aung, W. (1991). Starting flow and heat transfer downstream of a backward-facing step.
- 42- Yogesh, G. P., & Raghunandan, B. N. (1989). Flow structure and heat transfer characteristics behind a diaphragm in the presence of a diffusion flame. *International journal of heat and mass transfer*, 32(1), 19-28.
- 43- Yang, J. T., Hsiao, F. C., & Lin, Y. C. (2009). Transient flame spread during convective ignition of solid fuel in a sudden-expansion combustor. *Combustion and flame*, 156(10), 1917-1925.
- 14- Kuo, K. K. (Ed.). (1984). *Fundamentals of solid-propellant combustion*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- 15- Yang, J. T., Hsiao, F. C., & Lin, Y. C. (2009). Transient flame spread during convective ignition of solid fuel in a sudden-expansion combustor. *Combustion and flame*, 156(10), 1917-1925.
- 16- Kulkarni, A. K., Kumar, M., & Kuo, K. K. (1982). Review of solid-propellant ignition studies. *AIAA journal*, 20(2), 243-244.
- 17- Zvuloni, R., Gany, A., & Levy, Y. (1989). Geometric effects on the combustion in solid fuel ramjets. *Journal of Propulsion and Power*, 5(1), 32-37.
- 18- Zvuloni, R., Levy, Y., & Gany, A. (1989). Investigation of a small solid fuel ramjet combustor. *Journal of propulsion and power*, 5(3), 269-275.
- 19- Korting, P. A. O. G., Van Der Geld, C. W. M., Wijchers, T., & Schoyer, H. F. R. (1990). Combustion of polymethylmethacrylate in a solid fuel ramjet. *Journal of Propulsion and Power*, 6(3), 263-270.
- 20- Wooldridge, R. C., & Netzer, D. W. (1991). Ignition and flammability characteristics of solid fuel ramjets. *Journal of Propulsion and Power*, 7(5), 846-848.
- 21- Ciezki, H. K., Sender, J., Clauß, W., Feinauer, A., & Thumann, A. (2003). Combustion of solid-fuel slabs containing boron particles in step combustor. *Journal of propulsion and power*, 19(6), 1180-1191.
- 22- Peretz, A., Kuo, K. K., Caveny, L. H., & Summerfield, M. (1973). Starting transient of solid-propellant rocket motors with high internal gas velocities. *AIAA Journal*, 11(12), 1719-1727.
- 23- Ray, S. R., & Glassman, I. (1983). The detailed processes involved in flame spread over solid fuels. *Combustion science and technology*, 32(1-4), 33-48.
- 24- Chung, S. H. (2007). Stabilization, propagation and instability of tribrachial triple flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(1), 877-892.
- 25- Fernandez-Pello, A. C., & Hirano, T. (1983). Controlling mechanisms of flame spread. *Combustion Science and Technology*, 32(1-4), 1-31.
- 26- Kumar, A., Shih, H. Y., & James, S. (2003). A comparison of extinction limits and spreading rates in opposed and concurrent spreading flames over thin solids. *Combustion and flame*, 132(4), 667-677.
- 27- Raghunandan, B. N., Kumar, V. S., Unnikrishnan, C., & Sanjeev, C. (2001). Flame spread with sudden expansions of ports of solid propellant rockets. *Journal of Propulsion and Power*, 17(1), 73-78.
- 28- Hashimoto, N., Nagata, H., Totani, T., & Kudo, I. (2006). Determining factor for the blowoff limit of a flame spreading in an opposed turbulent flow, in a narrow solid-fuel duct. *Combustion and flame*, 147(3), 222-232.
- 29- Markides, C. N., & Mastorakos, E. (2008). Flame propagation following the autoignition of axisymmetric hydrogen, acetylene, and normal-heptane plumes in turbulent coflows of hot air. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 130(1).
- 30- Thevenin, D., Renard, P. H., Fiechtner, G. J., Gord, J. R., & Rolon, J. C. (2000). Regimes of non-premixed flame-vortex interactions. *Proceedings of the Combustion Institute*, 28(2), 2101-2108.
- 31- Lyons, K. M., Watson, K. A., Carter, C. D., & Donbar, J. M. (2005). On flame holes and local extinction in lifted-jet diffusion flames. *Combustion and flame*, 142(3).
- 32- Hermanns, M., Vera, M., & Liñán, A. (2007). On the dynamics of flame edges in diffusion-flame/vortex interactions. *Combustion and flame*, 149(1-2), 32-48.