



## مطالعه‌ی تجربی پایداری شعله‌ی غیر پیش آمیخته و آشفته گاز طبیعی و پروپان در شرایط رقیق سازی

بابک کشیر\* و صادق تابع جماعت\*\*

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوافضا

(دریافت: ۱۳۸۷/۱۰/۵، پذیرش: ۱۳۸۸/۶/۱۰)

در پژوهش حاضر به مطالعه‌ی تجربی پایداری شعله‌ی غیر پیش آمیخته و آشفته پروپان و گاز طبیعی همراه با جریان اکسیدکننده هم‌محور پرداخته شده است. اثر سرعت جریان‌های سوخت و اکسیدکننده و رقیق سازی جریان اکسیدکننده مطالعه شده و دو نوع حد پایداری مشاهده شده است. برخاستگی شعله از روی نازل سوخت اولین حد پایداری است. دومین حد، خاموشی قسمت آشفته شعله در نقطه گذار از جریان آرام به آشفته است. در طی انجام آزمایش‌ها، جریان‌های سوخت و اکسیدکننده در دمای محیط ( $25^{\circ}\text{C}$ ) هستند. در طی فرایند رقیق سازی، اکسیدکننده اکسیژن با گازهای نیتروژن یا دی اکسیدکربن رقیق می‌شود و در سایر آزمایش‌ها از هوای محیط به عنوان اکسیدکننده استفاده شده است.

واژگان کلیدی: مطالعه‌ی تجربی، پایداری، شعله‌ی غیر پیش آمیخته و آشفته، رقیق سازی

### مقدمه

شعله پس اختلاط آشفته یکی از مهم‌ترین و مورد توجه‌ترین شعله‌ها از دیدگاه پژوهش‌های بنیادی و کاربردی است. به ویژه، ساختار و پایداری شعله‌ی غیر پیش آمیخته‌ی آشفته توسط پژوهشگران متعددی بررسی شده است. تاکنو و همکاران [۱-۴] شعله‌های پس اختلاط آشفته گاز طبیعی و هیدروژن را همراه با هوای هم‌محور با دمای بالا مطالعه کردند. آن‌ها جت سرد را با جت شعله مقایسه کرده و دریافتند که حضور واکنش شیمیایی فرایند گذار را به تاخیر می‌اندازد. این مورد به آزاد شدن گرما در طی واکنش شیمیایی نسبت داده شد. آن‌ها در پژوهشی دیگر به مطالعه‌ی تجربی روی پایداری شعله همراه با انتالپی اضافی پرداخته و دریافتند که حدود پایداری شعله به صورت نسبتی که در آن نسبت اختلاط کاهش می‌یابد، بستگی دارد [۵]. چیه-یانگ و همکاران [۶] بر مبنای یافته‌های تجربی خود یک سازوکار خاموشی برای شعله‌های پس اختلاط آشفته پیشنهاد کردند. آن‌ها نقطه‌ای را که در آن فاصله‌ی شعاعی بین کانتور بیضوی استوکیومتریکی و جت شعله به یک مقدار بیشینه می‌رسد؛ به عنوان یک نقطه‌ی تقسیم کننده که مناطق پایدار و ناپایدار را برای شعله‌ی برخاسته در فرایند خاموشی جدا می‌کند، در نظر گرفتند.

اثر شناوری روی مشخصات شعله‌های اختلاط آشفته توسط ایدچریا و همکاران [۷] مطالعه شده است. ایشان مشاهده کردند که شعله‌های با عدد رینولدز بسیار بالا بدون توجه به سطح جاذبه طول یکسانی دارند. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط پیرز و همکاران [۸] نشان داد که شارهای گرمایی آشفته تمایل دارند که به لایه اختلاط که گرادیان دمای بالایی دارد، محدود شوند. مونیز و همکاران [۹] به مقایسه جت‌های سرد با جت‌های همراه با واکنش شیمیایی پرداخته و دریافتند که آزاد شدن گرما، عرض جت را تا ۲۰ درصد و شدت‌های آشفته‌گی را تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهد. مطالعه‌ی عددی یاماشیتا و همکاران [۱۰] نشان داد که ساختار شعله پس اختلاط آشفته مجموعه‌ای از شعله‌های پیش مخلوط لحظه‌ای محلی، نفوذی و پیش مخلوط نسبی است. یک پژوهش<sup>۱</sup> DNS جدید، شعله‌های غیر پیش آمیخته و آشفته برخاسته‌ی هیدروژن را به صورت جزایر رقیق شعله‌ی

\* کارشناس ارشد (ایمیل: babakkashir@gmail.com)

\*\* دانشیار - نویسنده مخاطب (ایمیل: sadegh@aut.ac.ir)

<sup>1</sup> Direct Numerical Simulation

بابک کشیر و صادق تابع جماعت

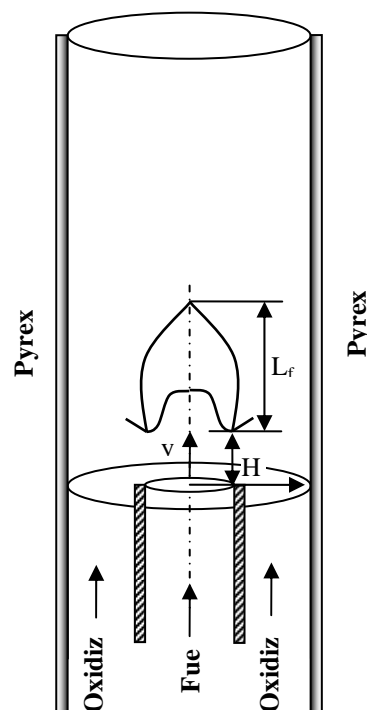
پس اختلاط که شعله‌ی پیش مخلوط داخلی را احاطه کرده، نشان داده است [۱۱]. تحقیقات گسترده‌ای بر روی رقیق سازی سوخت و اکسیدکننده در شعله‌ی غیر پیش آمیخته انجام شده است. تاثیر رقیق سازی سوخت و یا اکسیدکننده و تغییر نسبت سوخت به اکسیدکننده بر دمای شعله، شکل و میزان برخاستگی و در نتیجه آلاینده‌گی و پایداری آن، بسیار حایز اهمیت‌اند و می‌توان از آن‌ها به عنوان ابزار قدرتمندی در جهت کنترل شعله استفاده کرد.

روآن و همکاران [۱۲] اثر رقیق سازی اکسیژن را با  $CO_2$  و  $N_2$  در شعله‌ی آرام متان به صورت عددی و تجربی مطالعه کرده و نشان داده‌اند که اثر  $CO_2$  بر روی ساختار و پایداری شعله بیش‌تر از  $N_2$  است؛ زیرا دی اکسیدکربن ظرفیت گرمایی بالاتر و نرخ انتقال پایین‌تری نسبت به نیتروژن دارد. در پژوهش دیگری که توسط سولیوان و همکاران [۱۳] صورت گرفته است، شعله‌ی نفوذی آرام متان- هوا در نظر گرفته شده است. آن‌ها متان را با آمونیاک ( $NH_3$ ) رقیق کرده و مشاهده کردند که میزان  $NO_2$  تولیدی تا ۵۰ درصد در حالت استفاده‌ی محدود از آمونیاک و تا ۳۰ درصد در حالت استفاده‌ی زیاد از آمونیاک کاهش می‌یابد. کومار و همکاران [۱۴] با افزودن  $H_2$  به جریان سوخت، کاهش سطح گسیل  $NO_x$  را مشاهده کردند. این پدیده به نفوذ افزایش یافته نسبت داده شد که زمان اقامت<sup>۱</sup> گازها را کاهش می‌دهد.

در مطالعه‌ی حاضر تصویربرداری مستقیم از شعله برای بررسی ساختار شعله‌های پس اختلاط گذرا و آشفته به کار رفته است. پژوهش حاضر قصد دارد تا کار تاکنو و همکاران [۱-۴] و چیه-یانگوو و همکاران [۶] را با بررسی اثر رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با گازهای نیتروژن و دی اکسیدکربن بر روی ساختار و پایداری شعله‌ی نفوذی هم‌محور آشفته ادامه دهد.

## تجهیزات و روش آزمایش

برای بررسی شعله‌ی پس اختلاط آشفته پروپان و گاز طبیعی از یک مشعل هم محور (Co-flow) استفاده شده است. شکل (۱) طرحواره‌ی از این مشعل را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرحواره‌ی مشعل هم محور مورد استفاده همراه با شعله‌ی برخاسته

<sup>۱</sup> residence time

در این مشعل نازل سوخت قطر داخلی ۱/۷ میلی‌متر دارد که در مرکز یک لوله‌ی پیرکس با قطر داخلی ۱۱/۱۴ سانتی‌متر به صورت عمودی قرار گرفته است. ضخامت نازل سوخت ۰/۲ میلی‌متر است. جریان اکسیدکننده از فضای بین نازل سوخت و لوله‌ی پیرکس وارد مشعل شده و با سوخت خروجی از نازل مخلوط می‌شود. وجود لوله‌ی پیرکس سبب می‌شود که هوای ساکن محیط نقشی در احتراق نداشته باشد. دبی جریان‌های سوخت و اکسیدکننده توسط روماترهای تعبیه شده در مسیر تغذیه‌ی مشعل، سنجیده می‌شود. دقت روماترهای مورد استفاده  $\pm 0.2\%$  درصد از مقیاس کامل<sup>۱</sup> است. از تصاویر دیجیتال با کیفیت بالا (دوربین Power Shot G6) و سرعت بالا msec ۰/۱ برای تحلیل رفتار شعله استفاده شده است. تصاویر به دست آمده توسط نرم افزار فتوشاپ به صورت هندسی تحلیل می‌شوند. تمام جریان‌های سوخت و اکسیدکننده در دمای محیط ( $25^{\circ}\text{C}$ ) هستند. در انجام آزمایش‌ها متغیری به نام Z تعریف شده است که به صورت میزان مول ماده رقیق کننده تقسیم بر مجموع میزان مول ماده رقیق کننده و اکسیدکننده ضرب در ۱۰۰ است و به صورت کلی درصد رقیق سازی را نشان می‌دهد.

## بحث و بررسی نتایج

در این پژوهش به منظور بررسی ساختار شعله‌ی پس اختلاط آشفته و گذرا برای هر سوخت یعنی گاز طبیعی و پروپان سه آزمایش زیر انجام شده است.

- اثر سرعت جریان اکسیدکننده‌ی هوا بر ساختار شعله‌ی پس اختلاط

- اثر رقیق سازی اکسیژن با  $\text{N}_2$  بر ساختار شعله‌ی پس اختلاط

- اثر رقیق سازی اکسیژن با  $\text{CO}_2$  بر ساختار شعله‌ی پس اختلاط

در طی فرایند آزمایش‌های رقیق سازی، سرعت جریان اکسیدکننده همواره ثابت و برابر  $6\text{ cm/s}$  است. دمای جریان‌های سوخت و اکسیدکننده هم همواره برابر با دمای محیط یعنی  $298\text{ K}$  است.

## سوخت گاز طبیعی

در آزمایش‌های با سوخت گاز طبیعی، ابتدا بر اساس اکسیدکننده‌ی هوا به معرفی روند حاکم بر آزمایش‌ها پرداخته و در ادامه نتایج مربوط به آزمایش‌های رقیق سازی آورده شده است. در آزمایش با سوخت گاز طبیعی محدودیت پیش رو (با توجه به امکانات آزمایشگاه) دبی گاز طبیعی است که حداکثر به مقدار  $4\text{ lit/min}$  می‌رسد و به ما امکان عبور از عدد رینولدز  $2818$  را برای سوخت گاز طبیعی نمی‌دهد.

## اثر سرعت جریان اکسیدکننده‌ی هوا بر ساختار شعله‌ی پس اختلاط گاز طبیعی

پایداری شعله به غلظت اکسیژن در جریان اکسیدکننده و نوع سوخت وابسته است. در آزمایش‌های مربوط به سوخت گاز طبیعی و با اکسیدکننده‌ی هوا یک حد پایداری دیده می‌شود. این حد، جدایش یا برخاستگی شعله از روی نازل سوخت است. شکل (۲) تصاویری از تغییرات ساختار شعله در برابر سرعت جت سوخت را نشان می‌دهد. در این آزمایش سرعت جریان هوا برابر  $3\text{ cm/s}$  است. هنگامی که سرعت جریان سوخت ( $U_j$ ) پایین است (زیر  $10$  متر بر ثانیه)، یک شعله‌ی آرام که با شیبی باریک گسترش می‌یابد، وجود دارد (تصویر اول). طول شعله با  $U_j$  افزایش می‌یابد و بیش‌ترین طول آن به  $50\text{ cm}$  می‌رسد. با افزایش  $U_j$  در امتداد شعله یک نقطه‌ی گذار<sup>۲</sup> دیده می‌شود. دو مکانیزم مجزای ایجاد گذار وجود دارد. ناپایداری هیدرودینامیک جت سوخت در نزدیک محور در اثر اصطکاک سوخت و هوا در مرز جت آزاد و آشفتنگی جریان سوخت در داخل انژکتور [۱۶و۱۵]. آشفتنگی مقیاس پایین سینوسی<sup>۳</sup> پدید آمده در نقطه‌ی گذار در داخل جت بسیار نزدیک به محور و آشفتنگی‌های (گردابه‌ها) مقیاس بالای پدید آمده در بیرون شعله، آهنگ انتقال جرم و گرما را در منطقه‌ی واکنش به شدت بالا

<sup>1</sup> full scale

<sup>2</sup> transition point

<sup>3</sup> sinusoidal small-scale fluctuation

برده و سبب می‌شوند تا منطقه‌ی واکنش گسترش ناگهانی پیدا کند [۳]. شیب باریک مربوط به شعله‌ی آرام از بین می‌رود و جریان در پایین دست این نقطه وارد فاز آشفته می‌شود (تصویر دوم). در فاز آشفته، شعله حالت نوسانی پیدا می‌کند. با افزایش  $U_a$  نقطه گذار به سمت بالادست حرکت می‌کند (تصویر سوم). سرانجام در یک سرعت بحرانی شعله از روی نازل بلند می‌شود (تصویر چهارم).

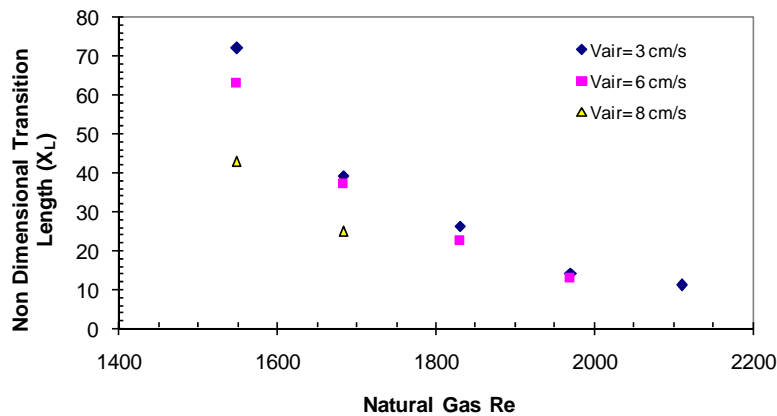


شکل ۲- تغییرات شکل شعله‌ی گاز طبیعی با سرعت تزریق سوخت و برای هوا با سرعت ۳ سانتیمتر بر ثانیه  
 (۱)  $Re_{N,G}=1269$ ، (۲)  $Re_{N,G}=1830$ ، (۳)  $Re_{N,G}=2110$ ، (۴)  $Re_{N,G}=2245$

در این پژوهش، طول گذار به صورت فاصله‌ی خروجی نازل تا نقطه گذار تعریف می‌شود. با تقسیم این عدد بر قطر نازل متغیری به دست می‌آید که آن را طول گذار بی‌بعد<sup>۱</sup> می‌نامیم. آزمایش‌ها در این قسمت برای سه سرعت مختلف جریان هوا انجام شده است. در هر سه آزمایش روند حاکم بر تغییرات ساختار شعله یکسان است. شکل (۳) نمودار طول گذار بی‌بعد را در برابر عدد رینولدز گاز طبیعی و با سرعت هوا ( $U_a$ ) به عنوان متغیر نشان می‌دهد. جدول (۱) سرعت بحرانی جت سوخت و عدد رینولدز مرتبط با آن که جدایش شعله از روی نازل رخ می‌دهد را نشان می‌دهد. اولین حد پایداری بسیار آشناست و در غلظت‌های پایین اکسیژن در جریان اکسیدکننده دیده می‌شود. این نوع به نفوذ جریان‌های سوخت و اکسیدکننده در منطقه‌ی جریان آرام بلافاصله در پایین دست نازل سوخت وابسته است.

همان‌طور که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود، افزایش سرعت جریان هوا سبب می‌شود تا نقطه گذار در فاصله‌ی نزدیک‌تری نسبت به خروجی نازل پدیدار شود (کاهش طول گذار بی‌بعد در برابر عدد رینولدز سوخت ثابت). علت را می‌توان افزایش اثر برشی جریان هوا دانست که به ظهور آشفتگی‌های روی مرز شعله کمک می‌کند.

<sup>1</sup> non-dimensional transition length



شکل ۳- طول گذار بی بعد در برابر عدد رینولدز گاز طبیعی و با اکسیدکننده‌ی هوا در سرعت‌های مختلف

جدول ۱- سرعت بحرانی برخاستگی و عدد رینولدز مرتبط در آزمایش با اکسیدکننده‌ی هوا و با سوخت گاز طبیعی

ارتفاع برخاستگی	N.G. Re	سرعت بحرانی سوخت	سرعت اکسید کنندگی
۲۰ mm	۲۲۴۵	۱۸/۴ m/s	Ua= ۳ cm/s
۲۱ mm	۲۱۱۰	۱۷/۳ m/s	Ua= ۶ cm/s
۲۲ mm	۱۸۳۰	۱۵ m/s	Ua= ۹ cm/s

همان‌طور که در جدول (۱) دیده می‌شود افزایش سرعت جریان هوا سبب افزایش ارتفاع برخاستگی می‌شود. علت را می‌توان تاخیر در تشکیل مخلوط استوکیومتریک در اثر افزایش سرعت جریان هوا دانست. برای هر سه سرعت آزمایش شده، شعله پس از رسیدن به حالت گذرا به مرور دچار کاهش طول شده و این روند کاهش طول با افزایش عدد رینولدز ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که شعله دچار برخاستگی می‌شود.

#### اثر رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن بر ساختار شعله‌ی پس اختلاط گاز طبیعی

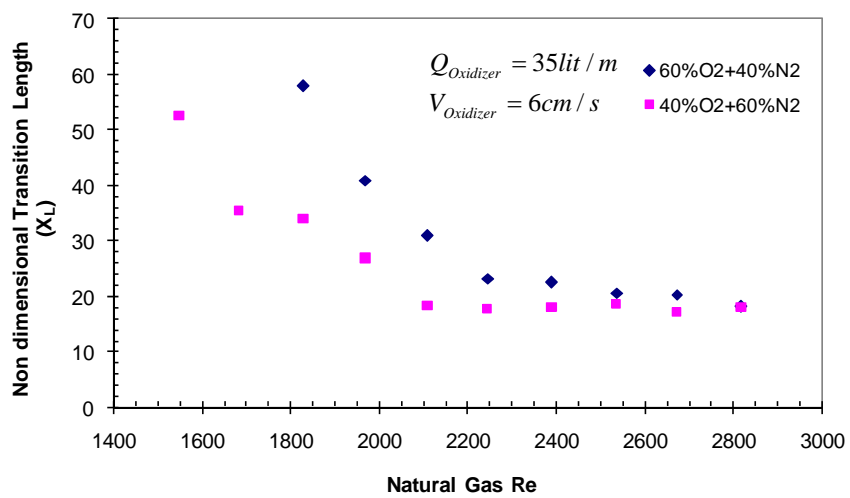
آزمایش‌های این قسمت در دو درصد مختلف رقیق سازی انجام شده است. در شکل (۴) تغییرات شکل شعله‌ی گاز طبیعی با سرعت تزریق جت سوخت و برای جریان اکسیدکننده شامل ۶۰ درصد مولی اکسیژن و ۴۰ درصد مولی نیتروژن دیده می‌شود. سرعت جریان اکسیدکننده همانند سایر آزمایش‌های رقیق سازی در این مقاله برابر ۶ cm/s است. در این آزمایش با توجه به محدودیت پیش رو در مورد دبی گاز طبیعی و در گستره‌ی اعداد رینولدز سوخت مورد بررسی، تغییرات ساختاری مشاهده شده کاهش طول قسمت آشفته‌ی شعله است. انتظار می‌رود در صورت افزایش بیشتر سرعت جریان سوخت حد پایداری دوم (خاموشی قسمت آشفته شعله) مشاهده شود. در حقیقت در این آزمایش افزایش چشمگیر رادیکال‌های اکسیژن در منطقه‌ی واکنش سبب تغییر الگوی پایداری شعله شده است [۳].

هنگامی که سرعت سوخت پایین است (زیر ۱۵ متر بر ثانیه) یک شعله‌ی آرام داریم که با شیبی باریک گسترش می‌یابد (تصویر اول). طول شعله با افزایش سرعت سوخت افزایش می‌یابد و به حدود ۲۵ cm می‌رسد (تصویر دوم). حال با افزایش سرعت سوخت، یک نقطه‌ی گذار در امتداد شعله پدیدار می‌شود که شعله در پایین دست این نقطه آشفته می‌شود (تصویر سوم). در نقطه‌ی گذار به علت افزایش شدید و ناگهانی نرخ انتقال جرم و گرما، منطقه‌ی واکنش گسترش ناگهانی دارد. با افزایش سرعت سوخت نقطه‌ی گذار به سمت بالادست حرکت می‌کند (تصویر چهارم). در نهایت نقطه‌ی گذار به مکانی می‌رسد که با افزایش سرعت جت سوخت تغییر مکان نمی‌دهد و شعله‌ی آشفته کاملاً توسعه یافته پدید می‌آید (تصویر پنجم). شکل (۵) طول گذار بی بعد در برابر عدد رینولدز گاز طبیعی و با درصد مولی رقیق سازی به عنوان یک متغیر را نشان می‌دهد.



شکل ۴- تغییرات شکل شعله‌ی گاز طبیعی با سرعت تزریق سوخت و برای رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن. جریان اکسیدکننده شامل ۶۰ درصد مولی اکسیژن و ۴۰ درصد مولی نیتروژن است.

(۱)  $Re_{N,G} = 1403$  (۲)  $Re_{N,G} = 1683$  (۳)  $Re_{N,G} = 1830$  (۴)  $Re_{N,G} = 2110$  (۵)  $Re_{N,G} = 2818$

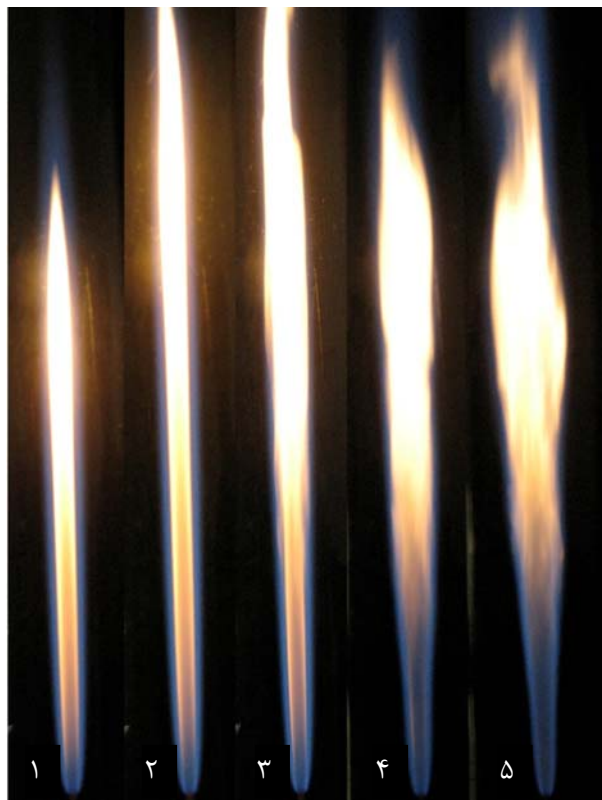


شکل ۵- طول گذار بی بعد در برابر عدد رینولدز گاز طبیعی و برای رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن.

همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود؛ افزایش غلظت اکسیژن در جریان اکسیدکننده سبب پایداری بیش‌تر شعله می‌شود و باعث می‌شود حالت گذرا در اعداد رینولدز سوخت بالاتری اتفاق بیافتد. هم‌چنین از شکل (۵) مشخص است که طول گذار بی بعد، بعد از عبور از عدد رینولدز ۲۵۰۰ (یعنی بعد از هنگامی که جریان در داخل نازل سوخت به وضعیت کاملاً توسعه یافته<sup>۱</sup> می‌رسد)، برای هر دو درصد مختلف رقیق سازی مقدار تقریباً یکسانی پیدا می‌کند. این روند تغییر مکان نقطه گذار در برابر عدد رینولدز جریان سوخت و عدم تغییر مکان محسوس آن بعد از ورود جریان داخل نازل سوخت به وضعیت کاملاً توسعه یافته و آشفته، توسط محققان دیگر و برای سوخت هیدروژن گزارش شده است [۳].

### اثر رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن بر ساختار شعله‌ی پس اختلاط گاز طبیعی

همانند رقیق سازی با نیتروژن، آزمایش‌های این قسمت برای دو درصد مختلف رقیق سازی انجام گرفته است. برای جریان اکسیدکننده شامل ۶۰ درصد مولی اکسیژن و ۴۰ درصد مولی دی اکسیدکربن تغییر ساختار دیده شده، از بین رفتن<sup>۲</sup> تدریجی قسمت آشفته شعله (قسمتی که پس از نقطه گذار شروع می‌شود) است. انتظار می‌رود در صورت افزایش بیش‌تر سرعت جت سوخت در نهایت خاموشی قسمت آشفته شعله را شاهد باشیم. در این درصد رقیق سازی ( $Z=40$ ) به علت حضور گسترده‌ی رادیکال‌های اکسیژن در منطقه‌ی واکنش، جدایش شعله از روی نازل سوخت دیده نمی‌شود. اما در آزمایش دیگر که جریان اکسیدکننده شامل ۴۰ درصد مولی اکسیژن و ۶۰ درصد مولی دی اکسیدکربن ( $Z=60$ ) است، حد پایداری برخاستگی شعله از روی نازل است. شکل (۶) تغییرات ساختار شعله در برابر سرعت تزریق جت سوخت را برای  $Z=60$  نشان می‌دهد.



شکل ۶- تغییرات شکل شعله‌ی گاز طبیعی با سرعت تزریق سوخت و برای رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن.

جریان اکسیدکننده شامل ۶۰ درصد مولی اکسیژن و ۴۰ درصد مولی دی اکسیدکربن است.

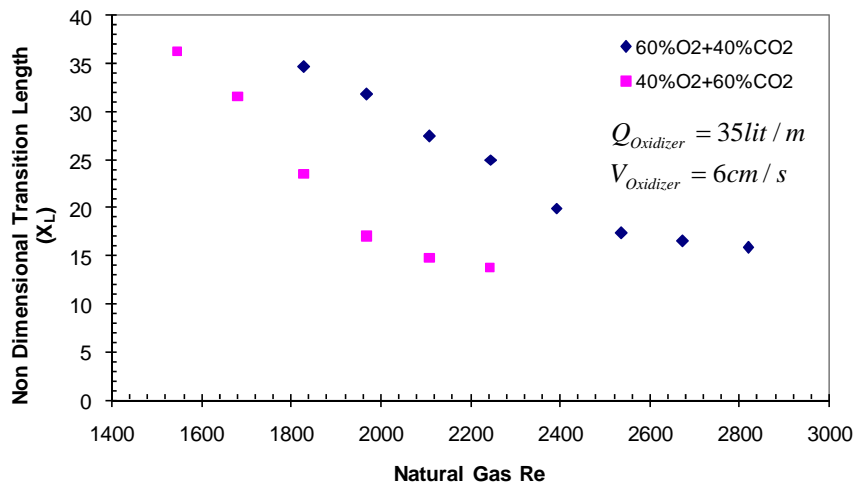
(۱)  $Re_{N,G}=1269$  ، (۲)  $Re_{N,G}=1683$  ، (۳)  $Re_{N,G}=1830$  ، (۴)  $Re_{N,G}=2245$  ، (۵)  $Re_{N,G}=2818$

<sup>1</sup> fully-developed flow

<sup>2</sup> break-off or extinction



در شکل (۷) طول گذار بی بعد ( $X_L$ ) در برابر عدد رینولدز گاز طبیعی و برای رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن دیده می‌شود.



شکل ۷- طول گذار بی بعد در برابر عدد رینولدز گاز طبیعی و برای رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن

همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود، افزایش درصد رقیق سازی زمان شروع حالت گذرا را تسریع می‌کند یعنی ورود به حالت گذرا در اعداد رینولدز پایین‌تری اتفاق می‌افتد. در وضعیتی که جریان اکسیدکننده شامل ۶۰ درصد مولی اکسیژن و ۴۰ درصد مولی دی اکسیدکربن است، دیده می‌شود که با عبور عدد رینولدز سوخت از مقدار ۲۵۰۰ میزان تغییرات طول گذار بی بعد در برابر عدد رینولدز سوخت کاهش محسوسی دارد، یعنی بعد از این که جریان داخل نازل سوخت به حالت کاملاً توسعه یافته می‌رسد تغییرات مکانی نقطه گذار کاهش بسیار محسوسی دارد. در جدول (۲) سرعت بحرانی جت سوخت و عدد رینولدز مرتبط که در آن پدیده برخاستگی شعله روی می‌دهد آورده شده است.

جدول ۲- سرعت بحرانی برخاستگی و عدد رینولدز مرتبط در رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن و با سوخت گاز طبیعی

ارتفاع برخاستگی	N.G. Re	سرعت بحرانی سوخت	ترکیب اکسیدکننده
۲۸ mm	۲۳۹۱	۱۹/۶ m/s	۴۰٪ O <sub>2</sub> + ۶۰٪ CO <sub>2</sub>

## سوخت پروپان

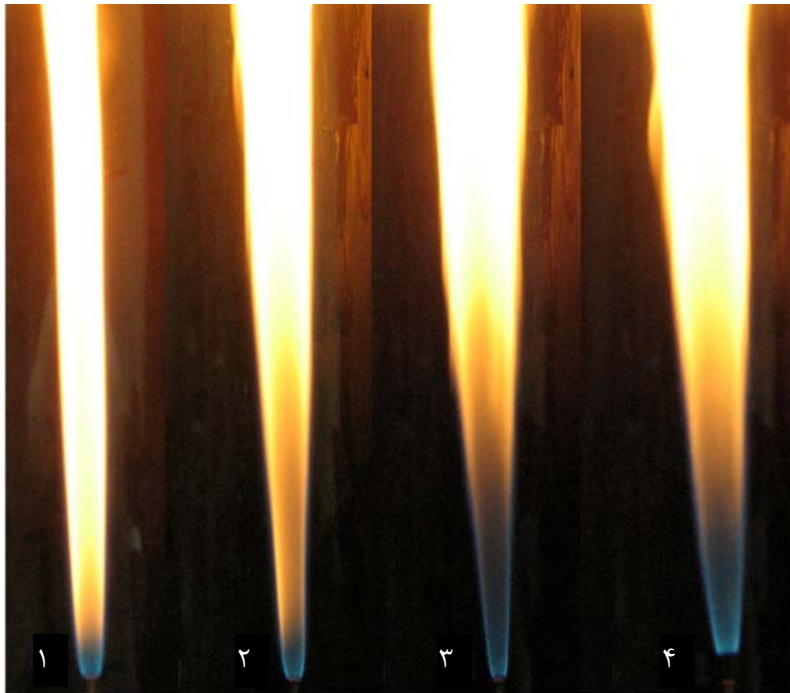
در این مرحله به مطالعه‌ی تجربی بر روی ساختار شعله‌ی پس اختلاط پروپان پرداخته شده است. ما در این قسمت برای بالا بردن سرعت تزریق جت سوخت پروپان محدودیت نداشته و شعله‌های آشفته پروپان تا اعداد رینولدز حدود ۲۵۰۰۰ را مطالعه کردیم.

### اثر سرعت جریان اکسیدکننده هوا بر ساختار شعله‌ی نفوذی پروپان

آزمایش‌ها برای دو سرعت مختلف جریان هوا انجام شده است و نتایج به دست آمده برخاستگی شعله را برای افزایش سرعت تزریق جت سوخت نشان می‌دهد. شکل (۸) تغییر ساختار شعله را برای جریان هوا با سرعت ۶ cm/s نشان می‌دهد. در شکل (۹) تغییرات طول گذار بی بعد در برابر عدد رینولدز پروپان و برای سرعت جریان هوا به عنوان یک متغیر آورده شده است. افزایش سرعت جریان هوا به زودتر رخ دادن آشفته‌گی‌ها در مرز شعله کمک می‌کند. آزاد شدن گرمای ناشی از واکنش‌های شیمیایی بر روی گردابه‌های جریان تاثیر می‌گذارد. آزاد شدن انرژی شیمیایی مواد واکنش دهنده در طی فرایند احتراق سبب

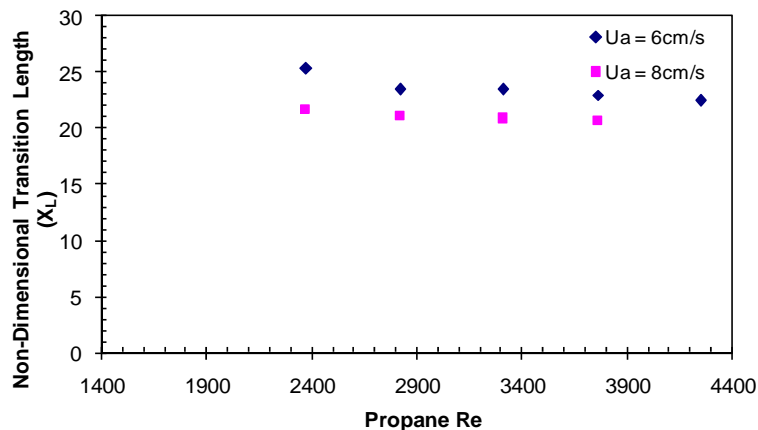


می‌شود تا جت شعله چگالی کم‌تر و چسبندگی بیش‌تری نسبت به جت غیر واکنشی و سرد داشته باشد [۹]. چسبندگی افزایش یافته سبب می‌شود تا آشفته‌گی‌های سرعت در هنگام نزدیک شدن به سطح شعله و ورود به لایه با چسبندگی بالا ناپدید شوند. اثر دیگر چسبندگی افزایش یافته در لایه لزج، (بلافاصله در داخل سطح شعله) فرونشاندن میدان نوسان آشفته‌گی‌های سطح شعله است. اگر این لایه‌های لزج نباشند؛ میدان نوسان آشفته‌گی‌ها به سرعت واگرا خواهد شد [۳]. انبساط سیال ناشی از آزاد شدن گرما، گردش را کاهش می‌دهد و گردابه‌های محلی را از بین می‌برد [۱۷]. احتراق پروپان در قیاس با احتراق گاز طبیعی به دلیل شکسته شدن تعداد بیش‌تر پیوندهای کربن نرخ آزاد شدن گرمای بیش‌تری دارد؛ لذا احتراق پروپان در قیاس با احتراق گاز طبیعی نقش مستهلک‌کننده‌ی بیش‌تری دارد و انتظار می‌رود شروع حالت گذرا در احتراق پروپان در اعداد رینولدز بالاتری نسبت به گاز طبیعی رخ دهد.



شکل ۸- تغییرات شکل شعله‌ی پروپان با سرعت تزریق سوخت و برای هوا با سرعت ۶ سانتی‌متر بر ثانیه.

$Re_{Propane} = 1634$  (۱) ،  $Re_{Propane} = 2369$  (۲) ،  $Re_{Propane} = 4248$  (۳) ،  $Re_{Propane} = 4697$  (۴)



شکل ۹- طول گذار بی بعد در برابر عدد رینولدز پروپان و برای اکسیدکننده‌ی هوا در دو سرعت مختلف

نتایج آزمایشگاهی به دست آمده با آن چه انتظار می‌رود مطابقت دارد. زیرا در آزمایش با اکسیدکننده‌ی هوا و با سوخت پروپان شروع حالت گذرا از حدود رینولدز ۲۳۰۰ است؛ در حالی که با سوخت گاز طبیعی این حالت از حدود عدد رینولدز ۱۵۰۰ پدیدار می‌شود. مقایسه‌ی شکل‌های (۳) و (۹) این مطلب را به خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۳) دیده می‌شود و نیز انتظار می‌رود افزایش سرعت هوا سبب افزایش ارتفاع برخاستگی (در اثر تاخیر در تشکیل مخلوط استوکیومتریک) می‌شود.

جدول ۳- سرعت بحرانی برخاستگی و عدد رینولدز مرتبط در آزمایش با اکسیدکننده‌ی هوا و با سوخت پروپان

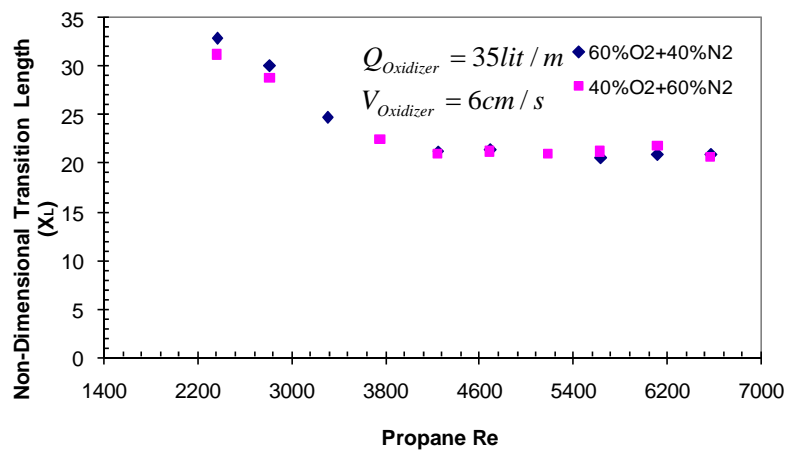
ارتفاع برخاستگی	عدد رینولدز پروپان	سرعت بحرانی سوخت	سرعت اکسیدکنندگی
۶ mm	۴۶۹۷	۱۱/۵ m/s	Ua= ۶ cm/s
۷/۵ mm	۳۷۵۸	۱۰/۴ m/s	Ua= ۸ cm/s

### اثر رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن بر ساختار شعله‌ی پس اختلاط پروپان

آزمایش‌های این قسمت همانند سایر آزمایش‌های رقیق سازی در این پژوهش برای دو درصد مختلف رقیق سازی انجام شده است. در شکل (۱۰) تغییر ساختار شعله برای ۴۰ درصد رقیق سازی نشان داده شده است. جریان اکسیدکننده شامل ۶۰ درصد مولی اکسیژن و ۴۰ درصد مولی نیتروژن است. در این درصد رقیق سازی ( $Z=40$ ) تغییر ساختار دیده شده کاهش طول قسمت آشفته شعله در نقطه گذار از جریان آرام به آشفته است که انتظار می‌رود در نهایت به خاموشی قسمت آشفته شعله ختم شود. در شکل (۱۱) طول گذار بی بعد در برابر عدد رینولدز پروپان و برای درصد رقیق سازی به عنوان یک متغیر آورده شده است.



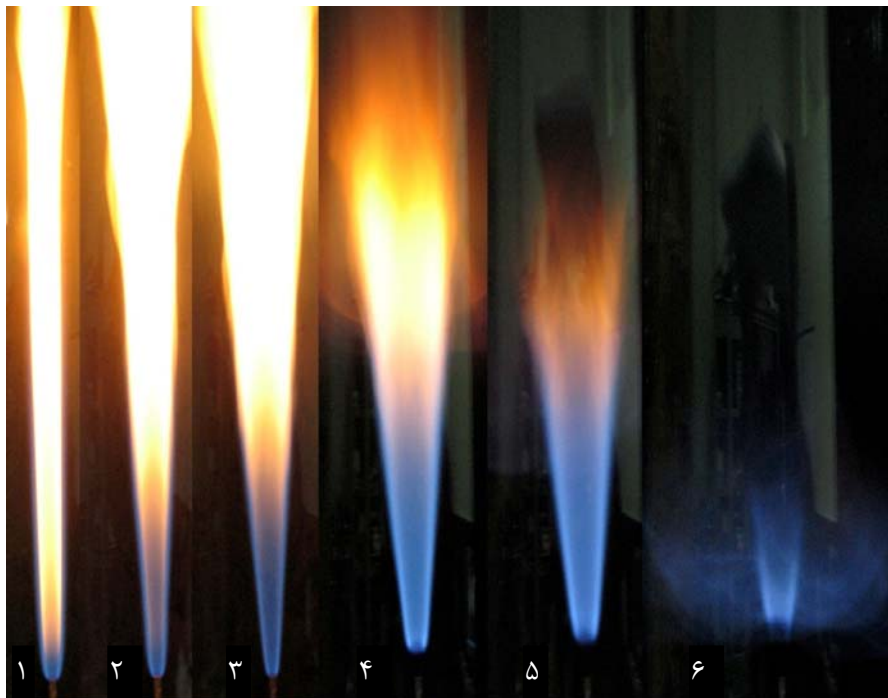
شکل ۱۰- تغییرات شکل شعله‌ی پروپان با سرعت تزریق سوخت و برای رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن. جریان اکسیدکننده شامل ۶۰ درصد مولی اکسیژن و ۴۰ درصد مولی نیتروژن است. (۱)  $Re_{Propane}=1879$ ، (۲)  $Re_{Propane}=2369$ ، (۳)  $Re_{Propane}=7066$ ، (۴)  $Re_{Propane}=16500$



شکل ۱۱- طول گذار بی بعد در برابر عدد رینولدز پروپان و برای رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن

### اثر رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن بر ساختار شعله‌ی پس اختلاط پروپان

آزمایش‌های این قسمت در ۴۰ درصد مولی و ۶۰ درصد مولی رقیق سازی انجام شده است. در شکل (۱۲) تغییر ساختار شعله برای جریان اکسیدکننده شامل ۴۰ درصد مولی اکسیژن و ۶۰ درصد مولی دی اکسیدکربن نشان داده شده است. همان‌طور که شکل (۱۲) نشان می‌دهد، در این درصد رقیق سازی هر دو حد پایداری رخ می‌دهد. در سرعت بحرانی  $17/3 \text{ m/s}$  برای جت سوخت، شعله دچار برخاستگی می‌شود و در ادامه با افزایش سرعت تزریق جت سوخت تا  $46/1 \text{ m/s}$  حد پایداری دوم یعنی خاموشی قسمت آشفته شعله در نقطه گذار از جریان آرام به آشفته روی می‌دهد. در تصویر ششم این موضوع به خوبی دیده می‌شود.

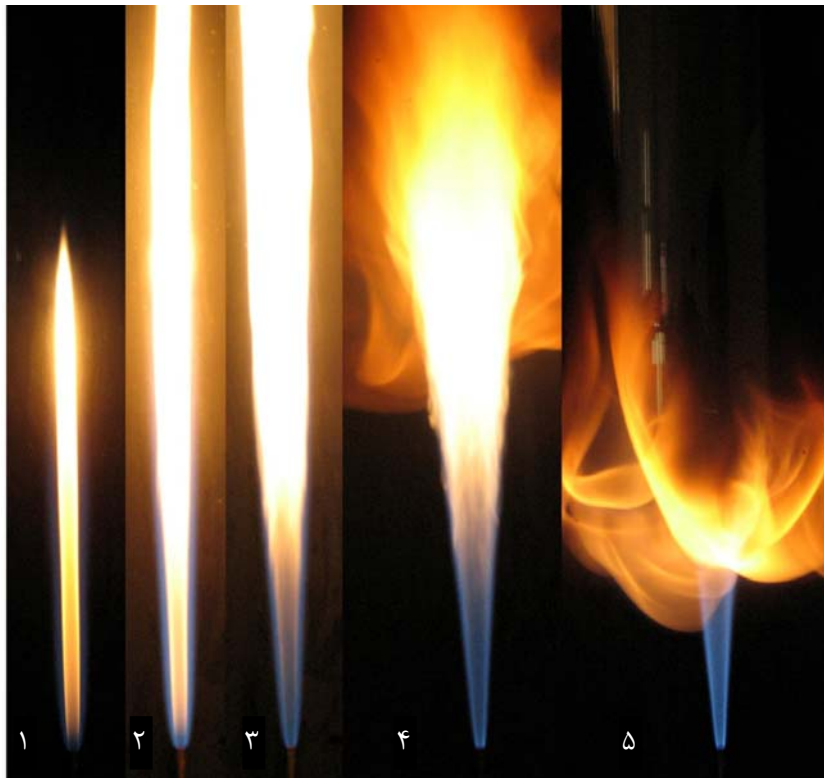


شکل ۱۲- تغییرات شکل شعله‌ی پروپان با سرعت تزریق سوخت و برای رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن.

جریان اکسیدکننده شامل ۴۰ درصد مولی اکسیژن و ۶۰ درصد مولی دی اکسیدکربن است.

(۱)  $Re_{Propane} = 1634$ ، (۲)  $Re_{Propane} = 2818$ ، (۳)  $Re_{Propane} = 5636$ ، (۴)  $Re_{Propane} = 11763$ ، (۵)  $Re_{Propane} = 14132$ ، (۶)  $Re_{Propane} = 18829$

حد پایداری دوم (خاموشی از نقطه گذار) تنها هنگامی رخ می‌دهد که پایداری شعله روی نازل (پایداری حلقه<sup>۱</sup>) به گونه‌ای افزایش یابد. در این آزمایش‌ها این کار با افزایش درصد مولی اکسیژن در منطقه‌ی واکنش نسبت به هوای محیط صورت گرفته است. این حد ناشی از ناپایداری شعله‌ی پس اختلاط آشفته است. ناپایداری در نقطه گذار روی می‌دهد؛ یعنی جایی که افزایش ناگهانی نرخ انتقال جرم و گرما در شعله اتفاق می‌افتد. اگر این افزایش بسیار زیاد باشد نرخ محدود انجام واکنش شیمیایی نمی‌تواند این افزایش را تحمل کند و سبب کاهش دمای شعله می‌شود که منجر به خاموشی در این مکان می‌شود. سازوکار این ناپایداری اساساً همانند شعله‌ی نفوذی جریان متقاطع آرام<sup>۲</sup> است. در شعله‌های نفوذی جریان متقاطع آرام، افزایش سرعت جریان‌های سوخت و اکسیدکننده، نرخ نفوذ مولکولی را افزایش می‌دهد که منجر به بالا رفتن شدت احتراق می‌شود. اما افزایش بسیار زیاد سرعت جریان‌های واکنش دهنده، زمان ماندگاری آن‌ها را در منطقه‌ی واکنش به شدت کاهش داده و نرخ انتقال جرم را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد؛ به طوری که نرخ محدود انجام واکنش شیمیایی قادر به پذیرش آن نیست و سبب عدم تشکیل مخلوط استوکیومتریک و خاموشی شعله می‌شود [۱۸]. ناپایداری توسط عدد دامکهلر که نسبت زمان مشخصه انتقال به زمان مشخصه واکنش شیمیایی است؛ کنترل می‌شود. در شکل (۱۳) نیز تغییرات ساختار شعله برای ۴۰ درصد رقیق سازی ( $Z=40$ ) دیده می‌شود.



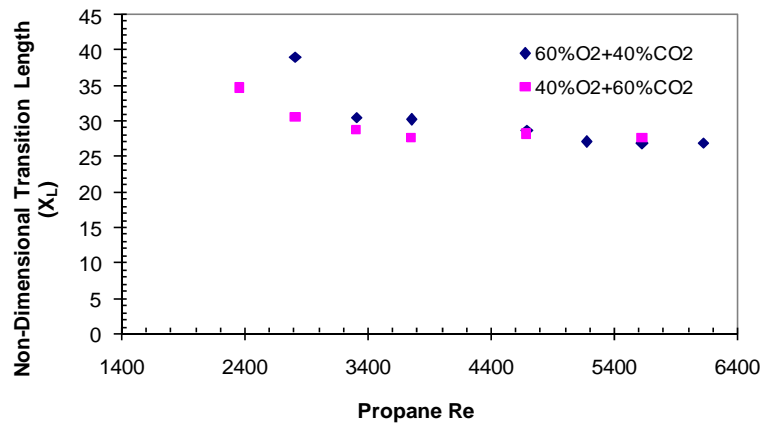
شکل ۱۳- تغییرات شکل شعله‌ی پروپان با سرعت تزریق سوخت و برای رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن. جریان اکسیدکننده شامل ۶۰ درصد مولی اکسیژن و ۴۰ درصد مولی دی اکسیدکربن است.

$Re_{Propane} = 2124$  (۱) ،  $Re_{Propane} = 2818$  (۲) ،  $Re_{Propane} = 7066$  (۳) ،  $Re_{Propane} = 16500$  (۴) ،  $Re_{Propane} = 24506$  (۵)

در ۴۰ درصد رقیق سازی حد پایداری دیده شده، خاموشی قسمت آشفته شعله است. این مورد در تصویر پنجم به خوبی دیده می‌شود. شکل (۱۴) تغییرات طول گذار بی بعد در برابر عدد رینولدز پروپان همراه با درصد رقیق سازی به عنوان متغیر را نشان می‌دهد. جدول (۴) نیز سرعت بحرانی برخاستگی و عدد رینولدز جت را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> rim stability

<sup>2</sup> laminar counter-flow diffusion flame



شکل ۱۴- طول گذار بی بعد در برابر عدد رینولدز پروپان و برای رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن

جدول ۴- سرعت بحرانی برخاستگی و عدد رینولدز مرتبط در رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن و با سوخت پروپان

ترکیب اکسید کننده	سرعت بحرانی سوخت	عدد رینولدز پروپان	ارتفاع برخاستگی
۴۰٪ O <sub>2</sub> + ۶۰٪ CO <sub>2</sub>	۱۷/۳ m/s	۷۰۶۶	۴ mm

## نتیجه گیری

در این تحقیق به مطالعه‌ی تجربی بر روی ساختار شعله‌ی پس اختلاط گذرا و آشفته گاز طبیعی و پروپان پرداخته شده و نتایج زیر به دست آمده است.

۱- با افزایش عدد رینولدز سوخت، در امتداد شعله‌ی آرام نقطه‌ای پدیدار می‌شود که با گسترش ناگهانی منطقه‌ی واکنش همراه است و آشفته‌گی‌ها بر روی مرز شعله پس از این نقطه پدیدار می‌شوند. این نقطه را نقطه‌ی گذار می‌نامیم. افزایش بیشتر عدد رینولدز سوخت سبب می‌شود تا نقطه گذار به خروجی نازل سوخت نزدیک‌تر شود. سرانجام با رسیدن جریان داخل نازل سوخت به وضعیت آشفته کاملاً توسعه یافته، مکان نقطه گذار تغییر نمی‌کند. این روند تغییر مکان نقطه گذار نسبت به عدد رینولدز جریان سوخت و عدم تغییر مکان محسوس آن بعد از ورود جریان سوخت داخل انژکتور به وضعیت آشفته کاملاً توسعه یافته، توسط محققان دیگر و برای سوخت هیدروژن گزارش شده است [۳].

۲- بسته به عدد رینولدز جت سوخت، دو حد پایداری دیده می‌شود. اولین مورد برخاستگی شعله از روی نازل سوخت است. دومین مورد خاموشی قسمت آشفته شعله در نقطه گذار از جریان آرام به آشفته است که یک شعله‌ی کوچک بلافاصله در پایین دست نازل سوخت باقی می‌گذارد.

۳- در صورت به کارگیری سازوکارهای پایدار کننده‌ی شعله (در این پژوهش افزایش غلظت اکسیژن در منطقه واکنش) پدیده‌ی برخاستگی در شعله مشاهده نمی‌شود و یا به تاخیر می‌افتد.

۴- در آزمایش‌های با اکسیدکننده‌ی اکسیژن و برای دو درصد رقیق سازی (۴۰ و ۶۰) با افزایش عدد رینولدز جت سوخت و ثابت شدن مکان نقطه‌ی گذار، طول گذار بی بعد برای هر دو درصد رقیق سازی مقدار تقریباً یکسانی پیدا می‌کند.

۵- استفاده از سوخت پروپان به جای گاز طبیعی سبب می‌شود تا ظهور نقطه‌ی گذار و ورود به حالت آشفته در اعداد رینولدز سوخت بالاتری رخ دهد، زیرا احتراق پروپان در قیاس با احتراق گاز طبیعی نرخ آزاد شدن گرمای بیش‌تری دارد که سبب مستهلک شدن بیشتر گردابه‌ها می‌شود و جریان را بیش‌تر آرام می‌کند.

## مراجع

1. Takeno, T., and Kotani, Y., "An Experimental Study on the Stability of Jet Diffusion Flame," Acta Astronautica, 2, pp. 999-1008, 1975.
2. Takeno, T., and Kotani, Y., "A Study on the Structure of Turbulent Jet Diffusion Flames," Comb. Sci. Tech., 10, pp. 45-57, 1975.
3. Takeno, T., "Transition and Structure of Jet Diffusion Flames," Twenty Fifth Symposium (International) on Combustion, pp. 1061-1073, 1992.
4. Takeno, T., and Kotani, Y., "Comments on Structure of Turbulent Jet Diffusion Flame," Acta Astronautica, 6, pp. 1009-1010, 1979.
5. Takeno, T., and Kotani, Y., "An Experimental Study on Stability and Combustion Characteristics of an Excess Enthalpy Flame," Nineteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 1503- 11509, 1982.
6. Wu, C. H., Chao, Y. C., Cheng, T. S., Li, Y. H., Lee, K. Y., and Yuan, T., "The Blowout Mechanism of Turbulent Jet Diffusion Flames," Combustion and Flame, 145, pp. 481-494, 2006.
7. Idicheria, C. A., Boxx, I. G., and Clements, N. T., "Characteristics of Turbulent Non-Premixed Jet Flames under Normal- and Low-Gravity Conditions," Combustion and Flame, 138, pp. 384-400, 2004.
8. Pires, A. C., Heitor, M. V., "Experimental Characterization of Non-Premixed Turbulent Jet Propane Flames," Experimental Thermal and Fluid Science, 32, pp. 115-132, 2000.
9. Muniz, L., and Mungal, M. G., "Effects of Heat Release and Buoyancy on Flow Structure and Entrainment in Turbulent Nonpremixed Flames," Combustion and Flame, 126, pp. 1402-1420, 2001.
10. Yamashita, H., Shimada, M., and Takeno, T., "A Numerical Study on Flame Stability at the Transition Point of Jet Diffusion Flames," Twenty Sixth Symposium (International) on Combustion, pp. 27-34, 1996.
11. Mizobuchi, Y., Tachibana, S., Shinio, J., Ogawa, S., and Takeno, T., "A Numerical Analysis of the Structure of a Turbulent Hydrogen Jet Lifted Flame," Proceedings of the Combustion Institute, 29, pp. 2009-2015, 2002.
12. Ruan, J., Kobayashi, H., and Niioka, T., "Effects of Diluents on Structure and Stability of Axisymmetric Lifted Laminar Diffusion Flames," 3<sup>rd</sup> Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC), 2001.
13. Sullivan, N., Jensen, A., Glarborg, P., and Pope, C. J., "Ammonia Conversion and NO<sub>x</sub> Formation in Laminar Coflowing Nonpremixed Methane-Air Flames," Combustion and Flame, 131, pp. 285-295, 2002.
14. Kumar, P., and Mishra, D. P., "Experimental Investigating of Laminar LPG-H<sub>2</sub> Jet Diffusion Flame," International Journal of Hydrogen Energy, 33, pp. 225-231, 2008.
15. Scholefield, D. A., and Garside, J. E., Third Symposium (International) on Combustion, pp. 102-110, 1953.
16. Gaydon, A. G., and Wolfhard, H. G., Flames, Their Structure, Radiation and Temperature, Third Edition, Chapman & Hall, 1970.
17. Kuo, K. K., Principles of Combustion, John Wiley & Sons, 1986.
18. Tsuji, H., and Yamaoka, I., "The Counterflow Diffusion Flame in the Forward Stagnation Region of a Porous Cylinder," Eleventh Symposium (international) on Combustion, pp. 979-984, 1967.

## English Abstract

### An Experimental Study of the Stability of City Gas and Propane Turbulent Non-Premixed Flames under Diluting Conditions

**B. Kashir and S. Tabejamaat**

Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology

*The stability behavior of jet non-premixed flame developing in a coflowing stream is studied experimentally, using city gas and propane as fuel gases. Effects of oxidant and fuel stream velocities and oxidant stream dilution have been studied. Two types of stability limits are observed. Blow-off of the rim-stabilized flame is the first stability limit. The second is the break-off or extinction of the turbulent portion of the flame at the transition point from laminar to turbulent flow. Oxidant and fuel streams are in environmental temperature. In dilution experiments, oxidant primary stream is oxygen as diluted with nitrogen or carbon dioxide. In the other experiments, oxidant is environmental air.*

**Keywords:** Experimental study, Stability, Turbulent non-premixed flame, Diluting