

مطالعه تجربی اثر سرعت جریان سوخت و رقیق سازی اکسیدکننده بر شعله نفوذی پروپان و گاز طبیعی

بابک کشیر^۱، امیر مردانی^۲، صادق تابع جماعت^۳

تهران - خیابان حافظ - روبروی خیابان سمیه - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده هوافضا
babakashir@gmail.com

چکیده

در این پژوهش به مطالعه شعله نفوذی در محدوده جریان آرام و در دو مرحله پرداخته شده است. در مرحله اول اثر افزایش دبی سوخت در شرایطی که دبی اکسیدکننده ثابت است؛ مورد مطالعه قرار گرفته است. سوخت مورد استفاده گاز طبیعی و پروپان میباشد. اکسیدکننده هم یکبار هوا و در بار دیگر اکسیژن خالص میباشد. در مرحله دوم اثر رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با گازهای نیتروژن و دی اکسیدکربن و برای دو سوخت پروپان و گاز شهری، مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت پایداری شعله و نیز تغییر شکل شعله در برابر فرآیند رقیق سازی محور مطالعه قرار گرفته است. شعله پروپان نسبت به گاز طبیعی در برابر فرآیند رقیق سازی پایدارتر میباشد و نیز رقیق سازی با گاز نیتروژن پایدارتر از رقیق سازی با دی اکسیدکربن است.

واژه‌های کلیدی: مطالعه تجربی - شعله نفوذی - پروپان - گاز طبیعی - رقیق سازی

1- مقدمه

در شعله نفوذی بر خلاف شعله های پیش آمیخته، سوخت و اکسیدکننده قبل از رسیدن به محفظه احتراق با یکدیگر مخلوط نمیشوند. یک مثال کلاسیک از شعله نفوذی آرام، موردی است که اولین بار بصورت کمی توسط بورک و شومان مورد بررسی قرار گرفت. در این مورد سوخت و اکسیدکننده با سرعت یکسان در لوله های استوانه ای هم محور جریان می یابند. در شعله های نفوذی، نرخ اختلاط در قیاس با شدت واکنش سوخت و اکسیدکننده کند میباشد؛ لذا اختلاط شدت سوختن را کنترل میکند. در این شعله ها، سوخت و اکسیدکننده بواسطه دیفیوژن مولکولی و توربولنت در منطقه واکنش در کنار یکدیگر قرار میگیرند. سوخت ممکن است به شکل جت سوخت گازی و یا محیط کندانس شده (جامد یا مایع) باشد. اکسید کننده ممکن است یک جریان جاری گاز و یا هوای ساکن باشد. مشخصه مجزا کننده شعله دیفیوژن این است که نرخ سوزش (یا مصرف سوخت) بوسیله نرخی که در آن سوخت و اکسیدکننده با نسبتهای مناسب برای واکنش بهم میرسند؛ تعریف میشود. [1]

در شعله نفوذی همانند شعله های پیش آمیخته، پارامترهایی نظیر سرعت شعله که به آسانی قابل اندازه گیری باشند؛ وجود ندارد. با این وجود این شعله ها از دید پژوهشی و کاربردی حائز اهمیت میباشند. پارامترهایی نظیر طول شعله، شکل و دمای آن، پایداری و آلاینده‌گی از مهمترین ویژگیهایی است که در این شعله ها توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است.

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا

2- دانشجوی دکترا مهندسی هوافضا

3- دانشیار دانشکده مهندسی هوافضا

تحقیقات گسترده ای روی رقیق سازی سوخت و اکسیدکننده در شعله نفوذی انجام شده است. تاثیر رقیق سازی سوخت و یا اکسیدکننده و تغییر نسبت سوخت به اکسیدکننده بر دمای شعله، شکل و میزان برخواستگی و در نتیجه آلاینده‌گی و پایداری آن، بسیار حائز اهمیت میباشد و میتوان از آن به عنوان ابزار قدرتمندی در جهت کنترل شعله استفاده کرد. Ruan و همکاران [2] اثر رقیق سازی اکسیژن را با CO₂ و N₂ در شعله آرام متان بصورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار داده اند. Juddoo و همکاران [3] در دانشگاه سیدنی اثر تغلیظ شعله دیفیوژن آرام متان را با اکسیژن مورد بررسی قرار داده اند. Stipe و همکاران [4] تولید دوده در شعله دیفیوژن متان در وضعیت قرارگیری مشعل به صورت عمودی و رو به پایین را مورد توجه قرار داده اند. Aalburg و همکاران [5] شعله دیفیوژن آرام متان را در شرایط خلاء بصورت تجربی آزمایش کرده اند. Gulder و همکاران [6] و [14] در دانشگاه تورنتو، اندازه گیری غلظت دوده و درجه حرارت را در شعله آرام پس اختلاط متان- هوا و پروپان- هوا در فشارهای بالا مورد توجه قرار داده اند. Meier و همکاران [7] بوسیله روشهای تجربی Raman، Rayleigh و LIF جزء جرمی اجزاء اکثریت مثل (H₂O و CO₂) و اجزاء اقلیت مثل (OH و NO) را در شعله توربولنت دیفیوژن متان- هوا بدست آورده اند. Ghosal و همکاران [8] بصورت تحلیلی جدایش (lift-off) و فرار در نتیجه آن (blowout) را در شعله دیفیوژن آرام مطالعه کرده اند. Beltrame و همکاران [9] در دانشگاه شیکاگو تشکیل NO و دوده در شعله های نفوذی، همراه با تغلیظ هوا با اکسیژن را مورد مطالعه قرار داده اند. Walsh و همکاران [10] اثر جاذبه و رقیق سازی سوخت با نیتروژن را در شعله دیفیوژن آرام، بصورت تجربی و عددی مطالعه کرده اند. Mcenally و همکاران [11] شعله پس اختلاط متان- هوا را در شرایط برخواستگی (lift-off) بصورت عددی و تجربی محور بررسی قرار داده اند. James Usowicz [12] هم بصورت تجربی روی طول شعله دیفیوژن اتیلن کار کرده است. از دیگر کارهای تجربی میتوان از Kumar و همکاران [13] نام برد که روی احتراق مخلوط متان- هوا بصورت تجربی در مقیاس میکرو کار کرده اند.

در مطالعه تجربی حاضر اثر تغییر پارامتر سرعت سوخت در برابر سرعت اکسیدکننده ثابت و همچنین رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با N₂ و CO₂ برای دو سوخت پروپان و گاز شهری در تهران مورد پژوهش و مقایسه قرار گرفته است.

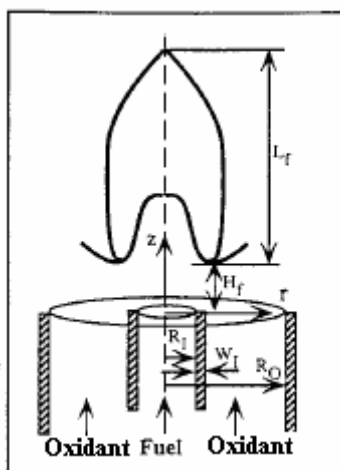
2- تجهیزات و روش آزمایش

برای بررسی شعله نفوذی پروپان و گاز طبیعی از یک مشعل هم محور (co-flow) استفاده شده است. شکل (1) تصاویری از این مشعل را نشان میدهد. در این مشعل نازل سوخت دارای قطر داخلی 4.8 میلیمتر میباشد که در مرکز یک لوله پیرکس با قطر داخلی 11.14 سانتیمتر بصورت عمودی قرار گرفته است. جریان اکسید کننده از فضای بین نازل سوخت و لوله پیرکس وارد مشعل میشود و با سوخت خروجی از نازل مخلوط میشود. وجود لوله پیرکس سبب میشود که هوای ساکن محیط نقشی در احتراق نداشته باشد. ضخامت نازل سوخت هم برابر 0.35 میلیمتر میباشد.

در آزمایشات رقیق سازی اکسید کننده اکسیژن خالص میباشد که در طی پروسه های آزمایش توسط گازهای دی اکسید کربن و نیتروژن رقیق میشود. جریان سوخت و اکسیژن و گازهای رقیق کننده توسط شیرهای حساس نیوماتیکی و دبی سنجهایی با دقت 1/2 fs کنترل میشود. سپس از شعله توسط دوربین عکاسی دیجیتال Power Shot G6 که دارای کیفیت 7.1 مگاپیکسل است؛ بصورت مستقیم عکسبرداری و تصاویر حاصل توسط نرم افزار فتوشاپ بصورت هندسی مورد آنالیز قرار میگیرد. مشخصات ارائه شده در مقاله، مطابق تعاریف شکل (2) میباشد.



شکل 1- دو تصویر از مشعل مورد استفاده



شکل 2- شماتیک مشعل بدون شیشه پیرکس

در طی آزمایشات رقیق سازی، پارامتری به نام Z تعریف شد که نشان دهنده درصد رقیق سازی است. این پارامتر به صورت میزان مول ماده رقیق کننده ضرب در 100 تقسیم بر مجموع میزان مول ماده رقیق کننده و اکسیدکننده تعریف میشود. به عبارتی اگر میزان مول ماده رقیق کننده را با $[X]$ و میزان مول ماده اکسیدکننده را با $[O]$ نشان دهیم؛ آنگاه پارامتر Z به صورت زیر در می آید:

$$Z = ([X]/([X] + [O])) \times 100 \quad (1)$$

3- نتایج حاصل

در این مطالعه آزمایشات زیر انجام و نتایج حاصل آنالیز شد.

- اثر سرعت جریان سوخت

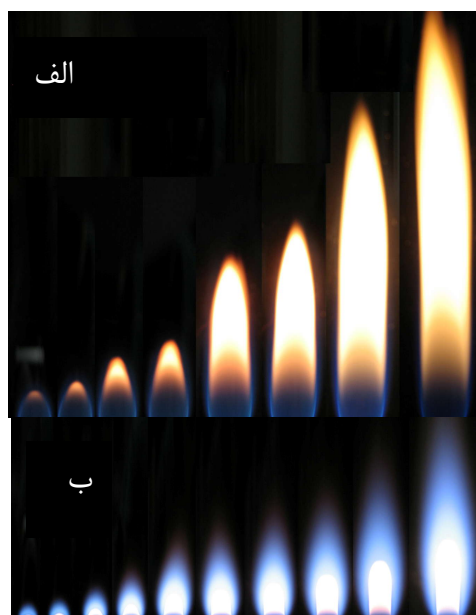
- اثر رقیق سازی اکسیژن با N_2 و CO_2

1-3- اثر سرعت جریان سوخت

در این قسمت بمنظور بررسی اثر سرعت جریان سوخت در شرایط دبی اکسیدکننده ثابت، برای هر سوخت دو آزمایش جداگانه انجام شده است. در یک آزمایش از هوا و در آزمایش دیگر از اکسیژن بعنوان اکسید کننده استفاده شده است. در هر دو آزمایش دبی اکسیدکننده ثابت و برابر 36 (l/min) در نظر گرفته شد تا سرعت خروجی جریان اکسید کننده ثابت و برابر 6 (cm/s) باشد و دمای ورودی سوخت و اکسیدکننده برابر 300K میباشد. در این آزمایشات عدد رینولدز برای گاز شهری در محدوده جریان آرام و در حدود 4 تا 150 و برای پروپان از حدود 15 تا 250 تغییر میکند. در ادامه ابتدا نتایج مربوط به گاز طبیعی و سپس نتایج مربوط به پروپان آورده شده است.

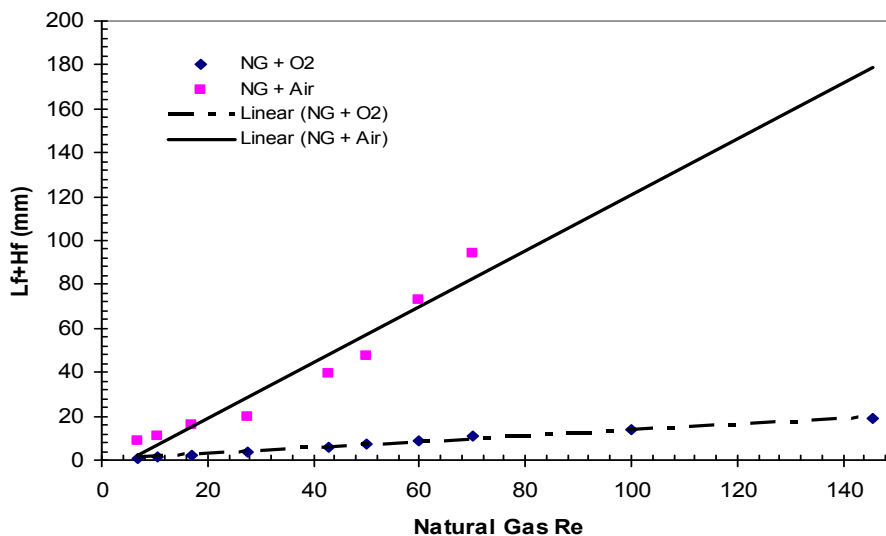
1-1-3-1-1- اثر سرعت جریان سوخت گاز طبیعی

همانطور که در دو شکل (3) و (4) ملاحظه میشود طول شعله در حالت اکسیژن خالص کمتر است. این بخاطر افزایش غلظت اکسیژن در منطقه اختلاط و بالاتر رفتن نرخ اختلاط اکسیژن با سوخت است که سبب کاهش ارتفاع شعله میشود. در حالت اکسید کننده ی هوا، کمتر بودن میزان اکسیژن در منطقه اختلاط سبب میشود که شعله طول بیشتری داشته باشد. ملاحظه میشود که با افزایش دبی سوخت اختلاف طول دو شعله تشدید میشود که این بخاطر افزایش میزان سوخت در شرایط میزان اکسیدکننده ثابت و قابل پیش بینی است.



شکل 3- شعله گاز طبیعی با الف : اکسیدکننده هوا ب: اکسیژن

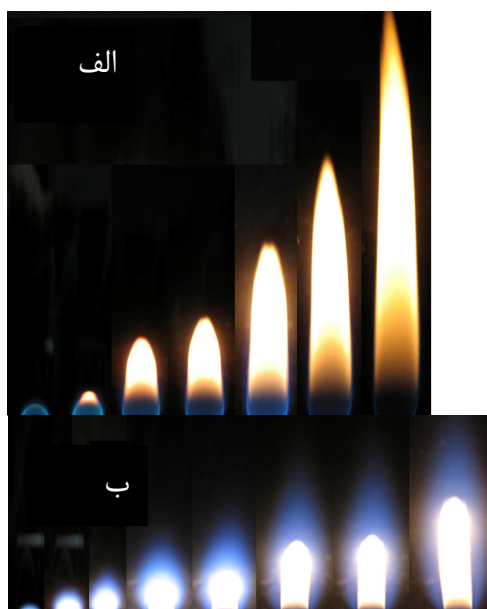
همانطور که از شکل (4) پیداست، تغییرات برای هر دو نوع اکسیدکننده حالت خطی دارد. لازم به ذکر است که بر اساس تحلیل تئوریک Kau طول شعله دیفیوژن در جریان آرام با دبی جرمی سوخت نسبت مستقیم و با نرخ اختلاط نسبت معکوس دارد. [15] نتایج اثر سرعت با تحلیل تئوری نشان دهنده صحت انجام آزمایشات می باشد.



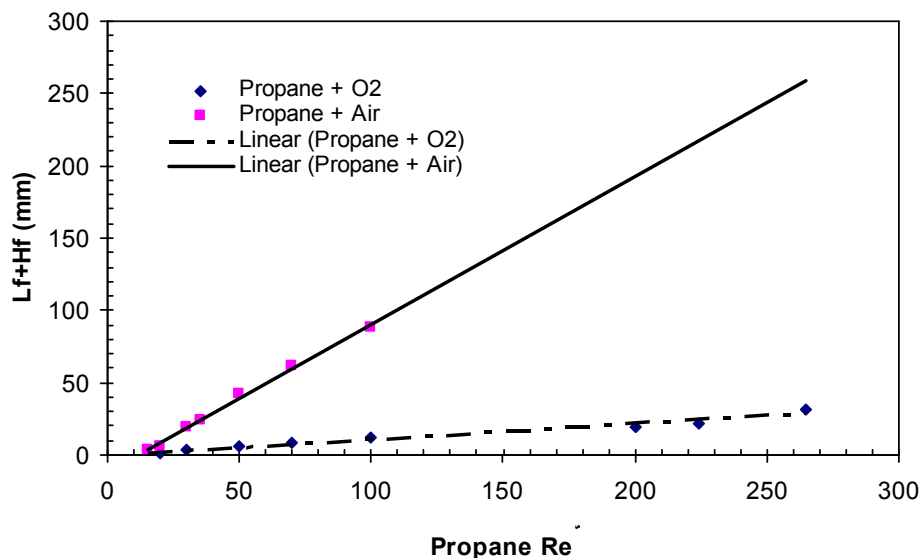
شکل 4- تغییرات طول شعله گاز طبیعی با افزایش دبی سوخت برای هوا و اکسیژن

2-1-3- اثر سرعت جریان سوخت گاز پروپان

همانطور که در اشکال (5) و (6) مشهود است؛ طول شعله پروپان در حالت اکسیژن خالص کمتر از هوا است. علت امر هم همانطور که در مورد گاز طبیعی شرح داده شد، دسترسی بیشتر سوخت به اکسیژن و در نتیجه بالا رفتن نرخ اختلاط است. شعله پروپان نسبت به شعله گاز طبیعی در شرایط اکسید کننده یکسان، طول بیشتری دارد که علت آن هم سنگینتر بودن سوخت پروپان نسبت به گاز طبیعی و اینکه در شرایط غلظت اکسیدکننده یکسان، تعداد رادیکالهای کربن بیشتر پروپان سبب میشود تا برای رسیدن به اکسیژن مورد نیاز مسافت بیشتری را طی کنند.



شکل 5- شعله گاز پروپان با الف: اکسیدکننده هوا ب: اکسیژن



شکل 6- تغییرات طول شعله گاز پروپان با افزایش دبی سوخت برای هوا و اکسیژن

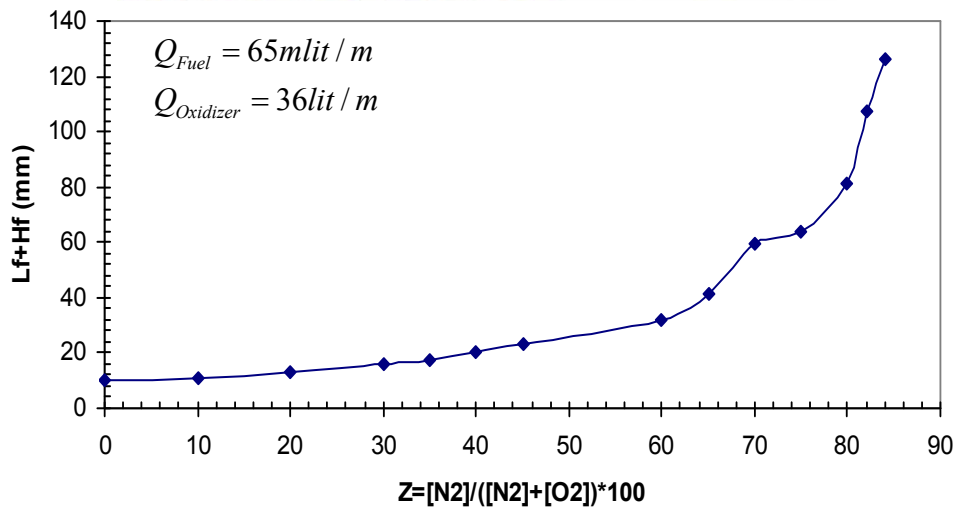
شعله پروپان نسبت به گاز طبیعی درخشندگی بیشتری دارد. این به خاطر شکسته شدن تعداد بیشتر پیوندهای کربن در احتراق پروپان است که سبب میشود حرارت بیشتری در طی احتراق آزاد شود و شعله پروپان ماکزیمم درجه حرارت بیشتری نسبت به گاز طبیعی داشته باشد. بالاتر بودن ماکزیمم درجه حرارت سبب تشعشع بیشتر رادیکالهای کربن میشود.

2-3- اثر رقیق سازی اکسیژن با گازهای نیتروژن و دی اکسید کربن

در این مرحله از آزمایشات اثر رقیق سازی اکسید کننده (اکسیژن خالص) با نیتروژن و دی اکسید کربن مورد بررسی قرار گرفته است. دبی اکسید کننده برابر 36 (l/min) در نظر گرفته شد تا در طی آزمایشات سرعت اکسید کننده مقدار ثابت 6 (cm/s) را داشته باشد. سرعت سوخت هم ثابت و برابر 6 (cm/s) در نظر گرفته شد.

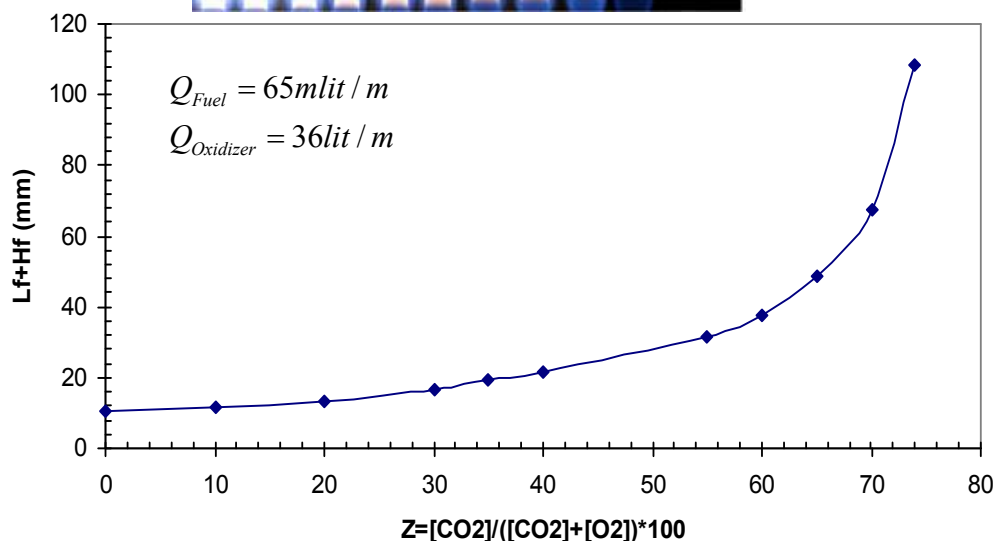
1-2-3- رقیق سازی با سوخت پروپان

همانطور که در شکل (7) دیده میشود؛ با افزایش درصد N2 در اکسیژن، بتدریج طول شعله افزایش می یابد. علت آن هم کمتر شدن میزان اکسیژن در دسترس برای رادیکالهای سوخت است که سبب میشود آنها برای اختلاط کامل و رسیدن به اکسیژن مورد نیاز مسافت بیشتری را طی کنند. در طی فرآیند رقیق سازی با افزایش درصد N2 از میزان درخشندگی شعله کاسته میشود. این پدیده بعلت کاهش دمای شعله و در نتیجه کاهش میزان تشعشع رادیکالهای کربن در اثر کاهش میزان اکسیژن در دسترس است. در درصدهای رقیق سازی بالا شعله ابتدا دارای برخاستگی شده و در نهایت از روی نازل فرار میکند. حد فرار شعله در رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن و با سوخت پروپان در 85 درصد مولی N2 است در شکل (8)، ابتدا تصاویر مستقیم گرفته شده توسط دوربین از فرآیند رقیق سازی اکسیژن با CO2 مربوط به سوخت پروپان دیده میشود. در این حالت حد فرار شعله در 75 درصد مولی CO2 است. با افزایش درصد CO2 در اکسیژن باز هم کاهش درخشندگی (luminosity) شعله قابل مشاهده است که، همانطور که در مورد رقیق سازی با N2 توضیح داده شد؛ این در اثر کاهش میزان تشعشع رادیکالهای کربن بخاطر کاهش میزان حداکثر درجه حرارت شعله است. سپس تغییرات طول شعله پروپان در طی فرآیند رقیق سازی اکسیژن با CO2 نشان داده شده است. در رقیق سازی با دی اکسید کربن، فرار در درصد کمتری از رقیق سازی صورت میگیرد. علت آن هم این است که CO2 ظرفیت گرمایی بالاتری نسبت به N2 دارد و لذا موجب کاهش بیشتر دمای شعله و عدم پایداری آن میشود. در نتیجه شعله رقیق شده با CO2 زودتر از N2 فرار میکند.



شکل 7- تغییرات طول شعله پروپان برای رقیق سازی اکسیژن با N2

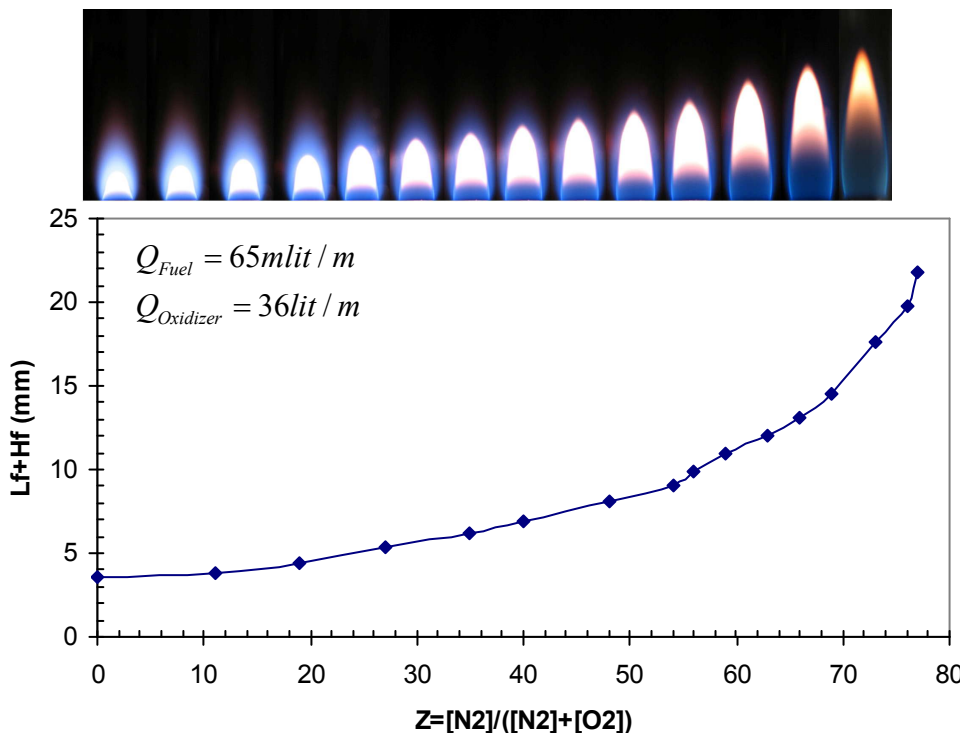
بلند شدن شعله از روی نازل از تاخیر در بوجود آمدن مخلوط استوکیومتریکی ناشی میشود. زیرا رقیق سازی سبب میشود میزان غلظت مولکولی اکسیدکننده پایین آید و لذا برای ایجاد مخلوط استوکیومتری به زمان بیشتری نیاز است. در نتیجه مخلوط استوکیومتری در ارتفاع بالاتری تشکیل میشود.



شکل 8- تغییرات طول شعله پروپان برای رقیق سازی اکسیژن با CO₂

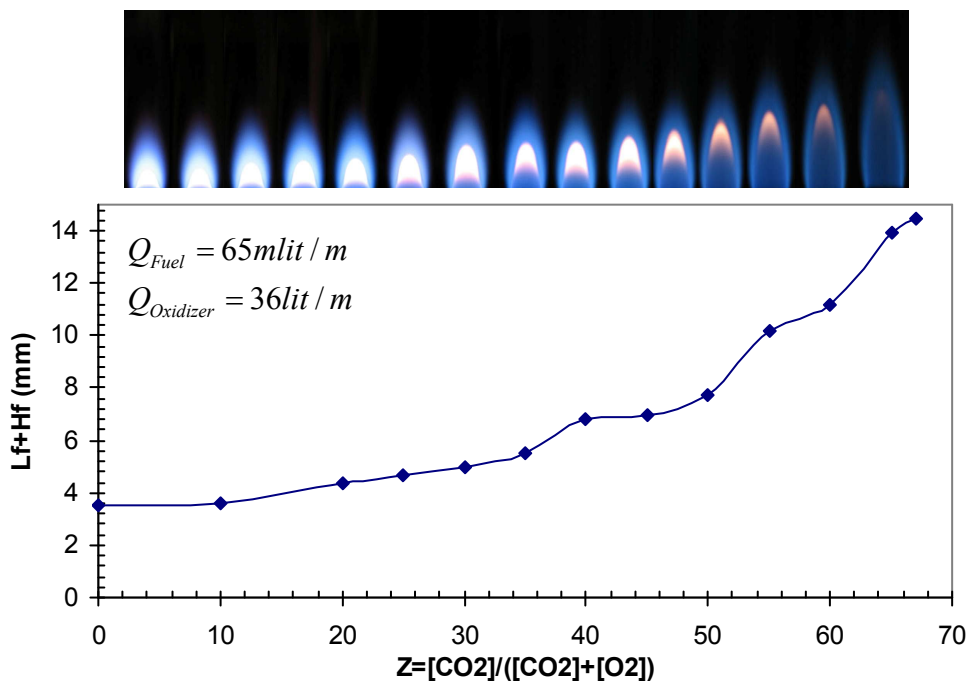
2-2-3- رقیق سازی با سوخت گاز طبیعی

در شکل (9) رقیق سازی اکسیژن با N₂ و برای سوخت گاز طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت بالایی تصاویر مستقیم شعله و در قسمت پایینی نمودار طول شعله بر حسب درصد رقیق سازی آورده شده است. در رقیق سازی اکسیژن با N₂ و برای سوخت گاز طبیعی حد فرار شعله در 79 درصد مولی نیتروژن است. در این حالت هم ابتدا در درصد های پایین رقیق سازی شاهد یک منطقه درخشان (luminous zone) خواهیم بود که با افزایش درصد رقیق سازی بتدریج این ناحیه کوچک میشود. در درصد های رقیق سازی بالا، شعله ابتدا دچار برخاستگی شده و سرانجام فرار میکند. در وضعیت برخاستگی رنگ شعله در تمام نقاط آبی میشود و ناحیه درخشان از بین میرود. بخاطر پایینتر بودن ماکزیمم درجه حرارت در شعله های گاز طبیعی نسبت به پروپان، میزان درخشندگی آن ها نسبت به شعله پروپان کمتر است. میزان برخاستگی نیز در شعله گاز طبیعی نسبت به پروپان کمتر است.



شکل 9- تغییرات طول شعله گاز طبیعی برای رقیق سازی اکسیژن با N₂

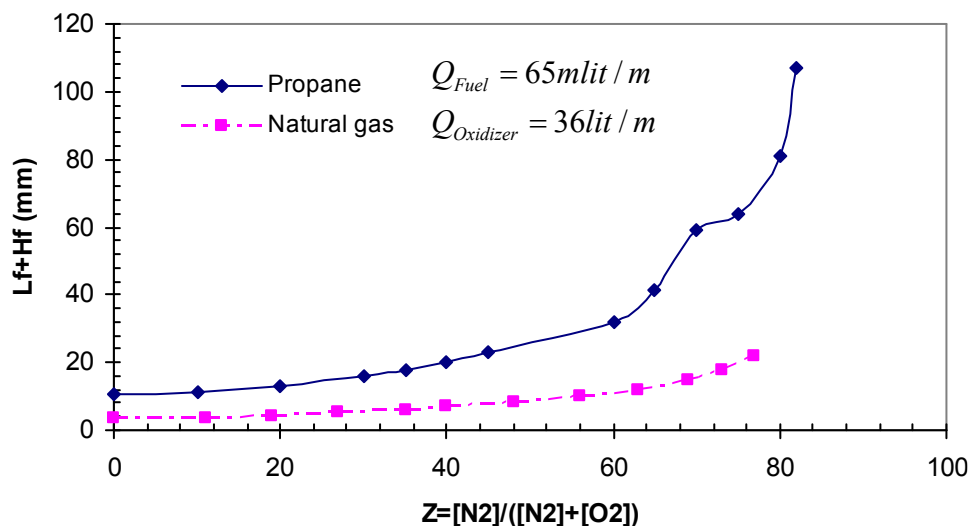
در ادامه و در شکل (10) اثر رقیق سازی اکسیژن با دی اکسید کربن و برای سوخت گاز طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش هم همانند سایر آزمایشات رقیق سازی در این مقاله، رقیق سازی سبب کاهش میزان درخشندگی شعله، افزایش طول و درنهایت برخاستگی و فرار شعله میشود. حد فرار شعله در این آزمایش در 73 درصد مولی CO₂ میباشد.



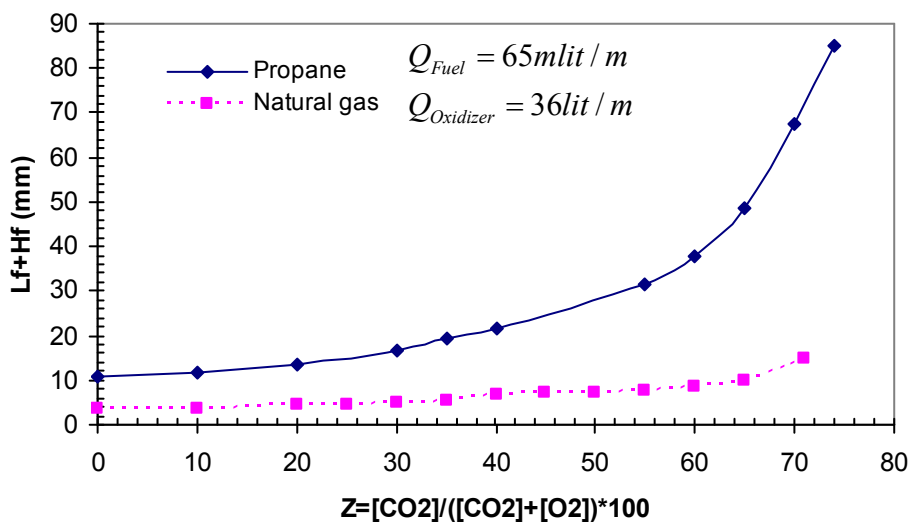
شکل 10- تغییرات طول شعله گاز طبیعی برای رقیق سازی اکسیژن با CO₂

3-3- اثر تغییر نوع سوخت روی رقیق سازی اکسیژن

در اشکال (11) و (12) به مقایسه اثر رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با گازهای نیتروژن و دی اکسید کربن برای دو سوخت پروپان و گاز طبیعی پرداخته شده است. همانطور که از دو شکل زیر پیداست، طول شعله پروپان بسیار بزرگتر از شعله گاز طبیعی است و این بعلت سنگینتر بودن سوخت پروپان نسبت به گاز طبیعی میباشد؛ و نیز رقیق سازی با سوخت پروپان پایدارتر از رقیق سازی با گاز طبیعی است. علت آن هم آزاد شدن مقدار بیشتری حرارت در طی احتراق پروپان است که سبب میشود احتراق در درجه حرارتهای بالاتری صورت گیرد.



شکل 11- مقایسه اثر رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن برای دو گاز پروپان و گاز طبیعی



شکل 12- مقایسه اثر رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن برای دو گاز پروپان و گاز طبیعی

4- نتیجه گیری

در این تحقیق به مطالعه اثر سرعت جریان سوخت در برابر سرعت اکسیدکننده ثابت و اثر رقیق سازی اکسیژن با گازهای نیتروژن و دی اکسیدکربن برای سوخت های پروپان و گاز طبیعی پرداخته شده و نتایج زیر بدست آمده است.

- 1- تغییرات طول شعله نسبت به سرعت جریان سوخت برای هر دو سوخت پروپان و گاز طبیعی و دو اکسیدکننده هوا و اکسیژن بصورت خطی است.
- 2- رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با N_2 و CO_2 در نهایت سبب برخاستگی و فرار شعله میشود. البته در رقیق سازی اکسیژن با CO_2 این برخاستگی در درصدهای کمتر رقیق سازی صورت میگیرد.
- 3- در رقیق سازی با سوخت پروپان برخاستگی و فرار شعله در درصدهای مولی بیشتری از CO_2 و N_2 نسبت به رقیق سازی با سوخت گاز طبیعی اتفاق می افتد. این هم بعلت شکسته شدن تعداد بیشتر پیوندهای کربن در احتراق پروپان است که سبب آزاد شدن مقدار حرارت بیشتری میشود. در نتیجه احتراق پروپان در درجه حرارت بالاتری صورت میگیرد که سبب پایداری و درخشندگی بیشتر شعله آن میشود.
- 4- با افزایش درصد رقیق سازی، شیب افزایش طول برای شعله های پروپان بسیار بزرگتر از شعله های گاز طبیعی است.
- 5- در رقیق سازی با گاز N_2 و با سوخت پروپان فرار در 85 درصد مولی نیتروژن روی میدهد؛ حال آن که این میزان سوخت گاز طبیعی 79 درصد است.
- 6- در رقیق سازی با گاز CO_2 و با سوخت پروپان فرار در 75 درصد مولی دی اکسیدکربن روی میدهد؛ حال آن که این میزان برای سوخت گاز طبیعی 73 درصد است.

مراجع

- 1- Glassman, I., Combustion, Academic Press, 1997.
- 2- Ruan, J., Kobayashi, H., Niioka, T., and Abuliti, A., "Effects of diluents on structure and stability of axisymmetric lifted laminar diffusion flames," The third asian-pacific combustion conference, June 2001.
- 3- Juddoo, M., Masri, A.R., and Bilger, R.W., "The effects of oxygen enrichment on the structure of laminar diffusion flames of methane," 6th Asia-Pacific conference on combustion, May 2007.
- 4- Stipe, C.B., Higgins, B.S., Lucas, D., and Koshland, C.P., "Inverted co-flow diffusion flame for producing soot," Scientific Instruments, Vol. 76, 2005.
- 5- Aalburg, C., Diez, F.J., Faeth, G.M., and Sunderland, P.B., "Shapes of nonbuoyant round hydrocarbon-fueled laminar-jet diffusion flames in still air," Combustion and Flame, Vol. 142, pp. 1-16, 2005.
- 6- Gulder, O.L., Thomson, K.A., Weckman, E.J., Frasar, R.A., and Smallwood, G.J., "Soot concentration and temperature measurements in co-annular, nonpremixed CH_4 /air laminar flames at pressures up to 4 MPa," Combustion and Flame, Vol. 140, pp. 222-232, 2005.
- 7- Meier, W., Barlow, R.S., Chen, Y.L., and Chen, J.Y., "Raman/Rayleigh/LIF measurements in a turbulent $CH_4/H_2/N_2$ jet diffusion flame: Experimental Techniques and Turbulence-Chemistry Interaction," Combustion and Flame, Vol. 123, pp. 326-343, 2000.
- 8- Ghosal, S., and Vervisch, L., "Stability diagram for lift-off and blowout of a round jet laminar diffusion flame," Combustion and Flame, Vol. 123, pp. 646-655, 2001.
- 9- Beltrame, A., Porshnev, P., Merchan, A., Saveliev, A., Fridman, A., and Kennedy, L.A., "Soot formation and NO formation in methane-oxygen enriched diffusion flames," Combustion and flame, Vol. 124, pp. 295-310, 2001.
- 10- Walsh, K.T., Long, M.B., and Smooke, M.D., "The effects of buoyancy and dilution on the structure and lift-off of co-flow laminar diffusion flames," Yale university, department of mechanical engineering.
- 11- Mcenally, C.S., Pfefferle, L.D., Schaffer, A.M., Long, M.B., Mohammed, R.K., and Smooke, M.D., "Characterization of a coflowing methane/air non-premixed flame with computer modelling, Rayleigh-Raman imaging, and on-line mass spectrometry," Proceedings of the combustion institute, Vol. 28, pp. 2063-2070, 2000.
- 12- Usowicz, J.E., "An experimental study of flame lengths and emissions of fully-modulated diffusion flames," Msc Thesis in mechanical engineering, Worcester polytechnic institute, 2001.
- 13- Kumar, S., Maruta, K., and Minaev, S., "Experimental investigations on the combustion behavior of methane-air mixtures in a micro-scale radial combustor configuration," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.17, pp. 900-908, 2007.
- 14- Gulder, O.L., Thomson, K.A., and Bento, D.S., "Soot formation and temperature field structure in laminar propane-air diffusion flames at elevated pressures," Combustion and Flame, Vol. 145, pp. 765-778, 2006.
- 15- Kuo, Kenneth Kuan-yun., Principles of combustion, John Wiley & Sons, 1986.