

## مطالعه‌ی تجربی شعله نفوذی پروپان / اکسیژن و گاز طبیعی / اکسیژن در شرایط رقیق‌سازی و پیش‌گرم

بابک کشیر\*، صادق تابع جماعت\*\* و امیر مردانی\*\*\*

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۱۳۸۶/۷/۲۹، پذیرش: ۱۳۸۷/۷/۲۰)

در پژوهش حاضر به مطالعه‌ی شعله نفوذی پروپان و گاز طبیعی به همراه اکسیژن در محدوده‌ی جریان آرام و در دو مرحله پرداخته شده است. در مرحله اول اثر رقیق‌سازی اکسیدکننده اکسیژن با گازهای نیتروژن و دی‌اکسیدکربن مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت پایداری و تغییر شکل شعله در برابر فرایند رقیق‌سازی محور مطالعه قرار گرفته است. در مرحله دوم پیش‌گرم اکسیژن تا  $480\text{ K}$  و رقیق‌سازی همزمان آن با گازهای نیتروژن یا دی‌اکسیدکربن مورد پژوهش قرار گرفته و نتایج با حالت بدون پیش‌گرم مقایسه شده است. پیش‌گرم سبب پایداری بیشتر شعله در برابر فرایند رقیق‌سازی می‌شود و به علت بالا رفتن دمای محصولات احتراق در پیش‌گرم، این شعله‌ها نسبت به حالت بدون پیش‌گرم درخشندگی بیشتری دارند.

واژگان کلیدی: مطالعه‌ی تجربی، شعله نفوذی، پروپان، گاز طبیعی، اکسیژن، رقیق‌سازی، پیش‌گرم

### مقدمه

در شعله نفوذی بر خلاف شعله‌های 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 به صورت کمی توسط بورک و شومان [۱] بررسی شد. در این مورد سوخت و اکسیدکننده با سرعت یکسان در لوله‌های استوانه‌ای هم‌محور جریان می‌یابند.

در شعله‌های نفوذی، نرخ اختلاط در قیاس با شدت واکنش سوخت و اکسیدکننده کند است؛ لذا اختلاط شدت سوختن را کنترل می‌کند. در این شعله‌ها، سوخت و اکسیدکننده در اثر نفوذ مولکولی و حرکت توده‌ای در منطقه واکنش در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. سوخت ممکن است به شکل جت سوخت گازی و یا محیط چگال شده (جامد یا مایع) باشد. اکسیدکننده ممکن است یک جریان جاری گاز و یا هوای ساکن باشد. مشخصه مجزا کننده شعله نفوذی این است که نرخ سوزش (یا مصرف سوخت) توسط نرخ تعریف می‌شود که در آن سوخت و اکسیدکننده با نسبت‌های مناسب برای واکنش به هم می‌رسند [۲].

تحقیقات گسترده‌ای روی رقیق‌سازی سوخت و اکسیدکننده در شعله نفوذی انجام شده است. تاثیر رقیق‌سازی 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 حائز اهمیت است و می‌توان از آن به عنوان ابزار قدرتمندی در جهت کنترل شعله استفاده کرد.

روان و همکاران [۳] اثر رقیق‌سازی اکسیژن را با  $\text{CO}_2$  و  $\text{N}_2$  در شعله آرام متان به صورت عددی و تجربی مطالعه کردند و نشان دادند که اثر  $\text{CO}_2$  روی ساختار و پایداری شعله بیشتر از  $\text{N}_2$  است؛ زیرا دی‌اکسیدکربن ظرفیت گرمایی بالاتر و نرخ انتقال پایین‌تری نسبت به نیتروژن دارد. ایشان علی‌رغم بررسی ساختار شعله نفوذی متان برای درصدهای اکسیژن مختلف، اثر

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

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

\*\*\* دانشجوی دکترا (ایمیل: amir79\_mardani@yahoo.com)

پیش گرم جریان های واکنش دهنده را مطالعه نکرده اند. جودو و همکاران [۴] در دانشگاه سیدنی اثر تغلیظ هوا با اکسیژن را در شعله نفوذی جریان متقاطع آرام متان بررسی کرده و دریافته اند که دمای بیشینه و جزء جرمی محصولات احتراق به خاطر کاهش میزان نیتروژن در مخلوط به شدت افزایش می یابد. همچنین با افزایش اکسیژن منطقه واکنش گسترش یافته و تشکیل  $NO_x$  به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد که علت آن افزایش میزان دمای بیشینه است و مقادیر بیشین روی قسمت استوکیومتریک مخلوط اتفاق می افتد. تنها در حالت اکسیژن خالص است که به علت نبودن نیتروژن، سطح تشکیل  $NO_x$  به صفر می رسد. قوزال و همکاران [۵] به صورت تحلیلی جدایش (lift-off) و فرار در نتیجه آن (blowout) را در شعله نفوذی آرام مطالعه کرده اند. این تحقیق علی رغم ارائه حل تحلیلی برای ارتفاع برخاستگی شعله نفوذی، به علت ثابت فرض کردن نرخ نفوذی اجزا، در شرایط رقیق سازی جریان های سوخت و اکسیدکننده نتایج معتبری ارائه نمی دهد. بلتریم و همکاران [۶] در دانشگاه شیکاگو تشکیل  $NO_x$  و دوده در شعله های نفوذی جریان متقاطع، همراه با تغلیظ هوا با اکسیژن را مطالعه کرده اند. این تحقیق هم تنها ساختار شعله نفوذی متان را در شرایط افزایش غلظت اکسیژن مطالعه کرده که سبب افزایش  $NO_x$  گرمایی می شود. والش و همکاران [۷] اثر جاذبه و رقیق سازی سوخت با نیتروژن را در شعله نفوذی آرام و جریان محوری متان- هوا به صورت تجربی و عددی مطالعه کرده اند. ایشان از غلظت سوخت برابر با ۱۰۰ درصد متان شروع کرده و به مرور با افزایش درصد مولی نیتروژن به وضعیت ۶۵ درصد مولی متان و ۴۵ درصد مولی نیتروژن رسیده اند. آن ها در قسمت تجربی هم به کمک یک دوربین مجهز به فیلترینگ طیفی، توزیع رادیکال های OH و CH را روی شعله به دست آوردند. آن ها جدایش را به صورت ارتفاعی در بالای مشعل تعریف کردند که در آن رادیکال بیشینه OH را داریم. ایشان دریافته اند که شعله های همراه با جاذبه معمولی جدایش بیشتری نسبت به حالت خلا دارند و علت را هم در اثر چگالی می دانند. مکنالی و همکاران [۸] شعله پس اختلاط متان- هوا را در شرایط برخاستگی (lift-off) به صورت عددی و تجربی بررسی کرده اند. ایشان علی رغم مطالعه ساختار شعله نفوذی متان و به دست آوردن نیمرخ های دما، مباحث جدید همچون رقیق سازی را بررسی نکرده اند. جیمز یوزویکز [۹] هم به صورت تجربی روی طول شعله نفوذی اتیلن کار کرده است. ایشان طول ناحیه مرئی را به عنوان طول شعله نفوذی اتیلن در نظر گرفته است. در پژوهش دیگری که توسط سولیوان و همکاران [۱۰] صورت گرفته است، شعله نفوذی آرام متان- هوا در نظر گرفته شده است. آنها متان را با آمونیاک ( $NH_3$ ) رقیق و مشاهده کردند که میزان  $NO_2$  تولیدی تا ۵۰ درصد در حالت استفاده محدود از آمونیاک و تا ۳۰ درصد در حالت استفاده زیاد از آمونیاک کاهش می یابد.

یکی دیگر از مباحثی که در شعله پس اختلاط مورد توجه قرار گرفته، پیش گرم کردن جریان های واکنش دهنده است. پیش گرم کردن اکسیدکننده باعث ایجاد شعله پایدار در محدوده بزرگتر نسبت های اختلاط می شود و نیز سبب می شود که توزیع دما یکنواخت تر و منطقه واکنش وسیع تر شود؛ لذا راندمان احتراقی بالاتر خواهد رفت. البته پیش گرم کردن یکی از سازوکارهای پایدار کردن شعله است که به ویژه در راه اندازی سرد کوره ها و سایر عملکردهای گذرای سیستم های احتراقی اهمیت پیدا می کند. در دماهای پیش گرم پایین (پایین تر از ۸۰۰ سلسیوس) با رژیم از احتراق مواجه ایم که در آن هر چند پیش گرم کردن، موجب افزایش دمای محصولات احتراق و در نتیجه افزایش تولید  $NO_x$  گرمایی می شود [۱۱]، ولی این اثر با رقیق سازی اکسیدکننده با نیتروژن یا دی اکسید کربن جبران می شود و در نهایت با پیش گرم و رقیق سازی همزمان اکسیدکننده به نتایج مطلوبی خواهیم رسید. در این زمینه تحقیقات متعددی توسط پژوهشگران صورت گرفته است.

قادری یگانه [۱۲] در دانشگاه مریلند اثر پیش گرم هوا در احتراق پس اختلاط آرام و در شرایط خلا و جاذبه معمولی را مورد مطالعه قرار داده است. سوخت مورد استفاده توسط ایشان گاز پروپان بوده که با استفاده از روش های طیف سنجی و تصویربرداری مستقیم از شعله، پروفیل شدت توزیع رادیکال CH و رادیکال  $C_2$  را به صورت برش های عرضی و نمایش سه بعدی به دست آورده است. ایشان همچنین روی طول شعله در دماهای مختلف پیش گرم نیز کار کرده اند. ایشان دریافته اند که ۴۰۰ درجه افزایش دمای هوای پیش گرم سبب کاهش ۳۷/۱ درصدی طول شعله می شود و همچنین پیش گرم هوا سبب می شود تا ناحیه درخشان رادیکال که جبهه شعله استوکیومتریکی را نشان می دهد به سمت مرکز حجم شعله نزدیک تر شود. ایشان نشان دادند که افزایشی به میزان ۴۰۰ درجه روی دمای هوای پیش گرم شده سبب افزایش غلظت رادیکال CH به میزان ۸۳/۳ درصد

می‌شود، زیرا افزایش دمای هوای پیش‌گرم شده سبب افزایش نرخ واکنش‌های شیمیایی و کاهش حجم شعله می‌شود. مقایسه شدت‌های رادیکال CH به عنوان شاخصی از ناحیه آزاد شدن گرما نشان می‌دهد که شعله‌های با هوای گرم‌تر، شدت‌های گسیل CH بالاتری دارند. افزایش شدت توزیع CH نشان می‌دهد که هوای پیش‌گرم شده، نرخ واکنش‌های شیمیایی را افزایش می‌دهد. گوپتا و همکاران [۱۳] هم در دانشگاه مریلند اثر پیش‌گرم و رقیق‌سازی هوا را با  $N_2$  برای شعله‌های نفوذی متان، پروپان، استیلن و هیدروژن محور پژوهش قرار داده‌اند. ایشان در تحقیق خود از یک کوره صنعتی استفاده و پیش‌گرم‌های بالاتر از  $K 1100$  را بررسی کرده‌اند. کریستو و همکاران [۱۴] و مدول و همکاران [۱۵] احتراق جت سوخت نفوذی جریان محوری همراه با محصولات احتراق یک مشعل ثانویه و هوای محیط، را مورد بررسی قرار داده‌اند. ایشان دریافتند که با کاهش درصد مولی اکسیژن در جریان اکسیدکننده از ۹ درصد در هوای معمولی به ۳ درصد، دمای بیشین محصولات احتراق حدود ۱۳ درصد کاهش می‌یابد.

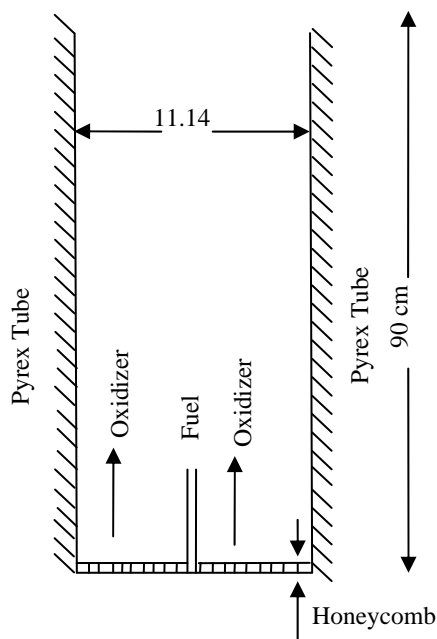
میشرا و همکاران [۱۶] اثر افزودن  $H_2$  را روی طول شعله نفوذی آرام، دمای محصولات احتراق و سطح گسیل  $NO_x$  در جت سوخت ترکیبی  $LPG-H_2$  بررسی کرده‌اند. پژوهش برای وضعیت‌های بدون پیش‌گرم و پیش‌گرم تا  $K 470$  انجام شده است. ایشان دریافتند که افزودن  $H_2$  منجر به کاهش طول شعله می‌شود. کاهش در سطح گسیل  $NO_x$  نیز با افزودن  $H_2$  به جریان سوخت مشاهده شده است. بر عکس سطح گسیل  $NO_x$  به طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش دمای مواد واکنش‌دهنده افزایش یافته است؛ که می‌توان آن را به افزایش  $NO_x$  گرمایی به واسطه سازوکار زلداویچ [۱۸] نسبت داد. ایشان مشاهده کردند که با پیش‌گرم هوای ورودی همراه با افزودن هیدروژن به جریان سوخت طول شعله نسبت به حالت بدون رقیق‌سازی بیشتر کاهش یافته است. هنگامی که درصد مولی هیدروژن در جریان سوخت از ۰ تا ۴۰ درصد تغییر می‌کند؛ طول شعله حدود ۱۰ درصد کاهش یافته است. این تغییر در طول شعله به افزایش نفوذ مولکولی مخلوط‌های گازی با افزودن هیدروژن، نسبت داده می‌شود. علاوه بر این، با هوای پیش‌گرم شده، طول شعله در قیاس با حالت پیش‌گرم نشده بیشتر کاهش می‌یابد. برای  $LPG$  خالص ( $X_{H_2}=0$ ) تغییر کلی در طول شعله ناشی از پیش‌گرم هوا در حدود ۲۱ درصد است. افزایش دمای بیشین محصولات احتراق با هوای پیش‌گرم شده حدود ۴۶ درصد است.

مور و همکاران [۱۷] اثر پیش‌گرم مواد واکنش‌دهنده را در شعله نفوذی متان-اکسیژن بررسی کرده‌اند. آن‌ها دمای مواد واکنش‌دهنده را در گستره  $K 298-398$  تغییر داده‌اند. برای هر دبی آزمایش شده، طول برخاستگی و مرز لحظه‌ای شعله را اندازه‌گیری و ثبت کرده‌اند و نمودارهای متعددی از پایداری شعله به دست آورده‌اند. نسبت اندازه حرکت اکسیدکننده به سوخت، اعداد رینولدز سوخت و اکسیدکننده و نسبت جرم اکسیدکننده به سوخت متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده توسط ایشان بوده است. در نتایجی که ارائه کرده‌اند؛ مشاهده شد که در یک نسبت اکسیدکننده به سوخت ثابت، با افزایش دما سرعت افزایش می‌یابد و چون زمان اقامت کاهش می‌یابد؛ لذا مخلوط استوکیومتری در ارتفاع بالاتری تشکیل خواهد شد و میزان برخاستگی افزایش می‌یابد.

مرور تحقیقات ذکر شده آشکار می‌کند که آثار افزودن نیتروژن و دی اکسیدکربن روی ساختار شعله گاز طبیعی و پروپان در شعله‌های نفوذی جریان محوری به اندازه کافی بررسی نشده است. علاوه بر این، مورد افزودن دی اکسیدکربن همراه با پیش‌گرم جریان اکسیدکننده برای غلظت‌های گوناگون اکسیژن بررسی نشده است. چون احتراق همراه با رقیق‌سازی و واکنش دهنده‌های پیش‌گرم شده به عنوان یک فناوری برای کاهش سطح گسیل  $NO_x$  و افزایش راندمان احتراق پدیدار شده است و می‌تواند در کوره‌های صنعتی و سیستم‌های احتراقی بازیابی به کار رود؛ آثار پیش‌گرم جریان اکسیدکننده روی ساختار شعله نفوذی پروپان و گاز طبیعی اهمیت پیدا می‌کند. از این رو مطالعه حاضر قصد دارد تا آثار افزودن نیتروژن یا دی اکسیدکربن همراه با پیش‌گرم جریان اکسیدکننده را روی طول شعله مرئی و ساختار شعله در شعله‌های نفوذی آرام گاز طبیعی و پروپان بررسی کند.

## تجهیزات و روش آزمایش

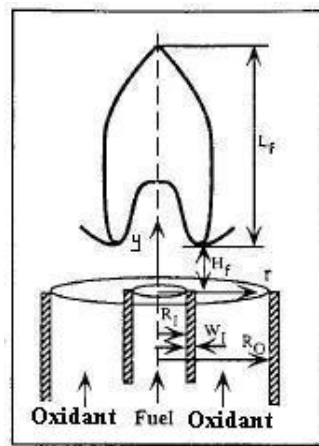
برای بررسی شعله نفوذی پروپان و گاز طبیعی از یک مشعل هم محور (Co-flow) استفاده شده است. شکل (۱) شماتیکی از این مشعل را نشان می‌دهد. در این مشعل نازل سوخت دارای قطر داخلی ۴/۸ میلی‌متر است که در مرکز یک لوله پیرکس با قطر داخلی ۱۱/۱۴ سانتیمتر به صورت عمودی قرار گرفته است. ضخامت نازل سوخت ۰/۳۵ میلی‌متر است. جریان اکسیدکننده از فضای بین نازل سوخت و لوله پیرکس وارد مشعل شده و با سوخت خروجی از نازل مخلوط می‌شود. وجود لوله پیرکس سبب می‌شود که هوای ساکن محیط نقشی در احتراق نداشته باشد.



شکل ۱- شماتیکی از هندسه مشعل مورد استفاده

برای پیش‌گرم جریان اکسیدکننده از یک گرم‌کن الکتریکی استفاده شده که داخل آن دو المنت گرمایی هر یک با توان ۳۰۰۰ وات قرار داده شده است. برای جلوگیری از اتلاف گرمایی از پشم سرامیک و پشم شیشه برای عایق‌کاری کل سیستم استفاده شده است. در این آزمایشات از غلظت اکسیدکننده برابر ۱۰۰ درصد اکسیژن خالص شروع کرده و به مرور با کاهش درصد مولی اکسیژن، نیتروژن یا دی‌اکسیدکربن وارد جریان اکسیدکننده می‌شود (فرایند رقیق‌سازی). جریان سوخت و اکسیژن و گازهای رقیق‌کننده توسط شیرهای حساس نیوماتیکی و رواترهایی با دقت  $\pm 0.2\%$  درصد از مقیاس کامل<sup>۱</sup> کنترل می‌شود. سپس از شعله توسط دوربین عکاسی دیجیتال Power Shot G6 که دارای کیفیت ۷/۱ مگاپیکسل است، به صورت مستقیم عکسبرداری و تصاویر حاصل توسط نرم‌افزار فتوشاپ به صورت هندسی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این پژوهش طول ناحیه مرئی به عنوان طول شعله در نظر گرفته شده است و دقت محاسبات طول شعله در حد ۰/۱ میلی‌متر است. برای اطمینان از داده‌های گزارش شده، تکرارپذیری آزمایشات هم مد نظر قرار گرفته است. پارامترهای به کار رفته در شکل‌ها برای مشخص کردن طول شعله ( $L_f$ ) و برخاستگی شعله ( $H_f$ ) در شکل زیر نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Full scale



شکل ۲- شماتیک مشعل بدون شیشه پیرکس همراه با شعله دارای برخاستگی

در انجام آزمایشات پارامتری 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  $100$  است و به صورت کلی درصد رقیق سازی را نشان می دهد. بلند شدن شعله از روی نازل به عنوان برخاستگی شعله در نظر گرفته شده است و از خاموشی شعله در نتیجه افزایش درصد رقیق سازی که پس از برخاستگی روی می دهد؛ به عنوان حد فرار شعله یاد شده است. بر مبنای تعاریف مختلف از مراجع معتبر مفهوم پایداری شعله نفوذی آرام به صورت وضعیتی که سرعت انتشار شعله نسبت به سوخت/ اکسیدکننده ساکن برابر با سرعت جریان در خط استوکیومتریک باشد، در می آید. در این حالت شعله پایدار است و در راستای محوری حرکت نمی کند [۵].

## بحث و بررسی نتایج

در این پژوهش ابتدا به منظور بررسی صحت روند انجام آزمایشات، اثر افزایش سرعت جریان سوخت در شرایط سرعت اکسیدکننده ثابت مطالعه شده و در ادامه برای هر سوخت یعنی گاز طبیعی و پروپان چهار آزمایش زیر انجام شده است.

- اثر رقیق سازی اکسیژن با  $N_2$
- اثر رقیق سازی اکسیژن با  $CO_2$
- اثر پیش گرم و رقیق سازی اکسیژن با  $N_2$
- اثر پیش گرم و رقیق سازی اکسیژن با  $CO_2$

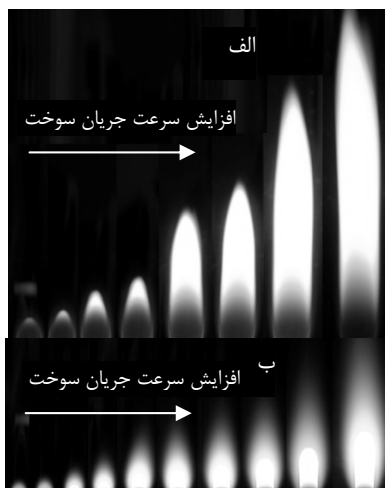
در طی فرایند آزمایشات رقیق سازی، سرعت سوخت همواره ثابت و برابر  $6 \text{ cm/s}$  است. سرعت اکسیدکننده هم ثابت و برابر با سرعت سوخت انتخاب شده است. دمای جریان اکسیدکننده در حالت پیش گرم و در هنگام اختلاط با جریان سوخت همواره برابر  $480 \text{ K}$  و در حالت بدون پیش گرم برابر  $298 \text{ K}$  است. دمای جریان سوخت هم برابر با دمای محیط یعنی  $298 \text{ K}$  است.

## اثر سرعت جریان سوخت

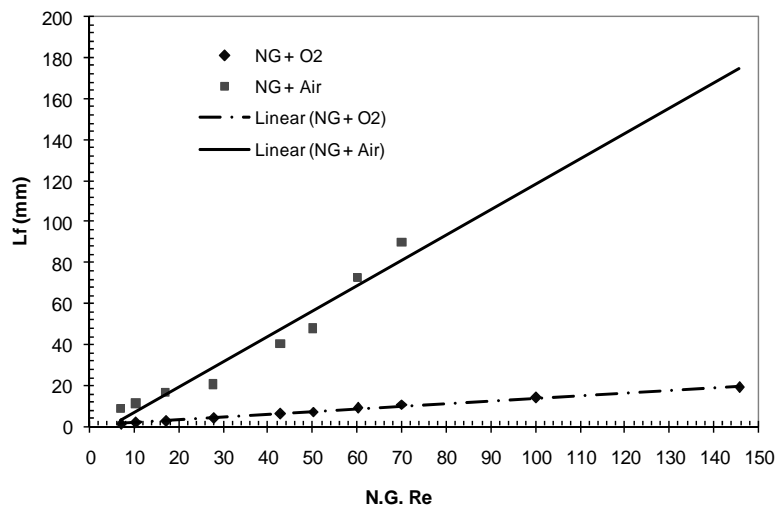
در این قسمت به منظور بررسی اثر سرعت جریان سوخت در شرایط سرعت اکسیدکننده ثابت، برای هر سوخت دو آزمایش جداگانه انجام شده است. در یک آزمایش از هوا و در آزمایش دیگر از اکسیژن به عنوان اکسیدکننده استفاده شده است. در هر دو آزمایش سرعت جریان اکسیدکننده ثابت و برابر  $6 \text{ cm/s}$  و دمای ورودی سوخت و اکسیدکننده برابر  $300 \text{ K}$  است. 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 می کند. در ادامه ابتدا نتایج مربوط به گاز طبیعی و سپس نتایج مربوط به پروپان آورده شده است.

### اثر سرعت جریان سوخت گاز طبیعی

همان‌طور که در دو شکل (۳) و (۴) ملاحظه می‌شود؛ طول شعله در حالت اکسیژن خالص کمتر است. این به خاطر افزایش غلظت اکسیژن در منطقه اختلاط و بالاتر رفتن نرخ اختلاط اکسیژن با سوخت است که سبب کاهش ارتفاع شعله می‌شود. در حالت اکسیدکننده هوا، کمتر بودن میزان اکسیژن در منطقه اختلاط سبب می‌شود که شعله طول بیشتری داشته باشد. ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت سوخت اختلاف طول دو شعله تشدید می‌شود که این بخاطر افزایش میزان سوخت در شرایط میزان اکسیدکننده ثابت و قابل پیش‌بینی است.



شکل ۳- شعله گاز طبیعی با الف: هوا ب: اکسیژن، سرعت جریان سوخت برای هر دو حالت از حدود ۲ cm/s شروع شده و تا ۱۹ cm/s افزایش یافته است. سرعت جریان اکسیدکننده ثابت و برابر ۶ cm/s است. شعله‌ها با نقاط روی شکل (۴) متناظرند.



شکل ۴- تغییرات طول شعله گاز طبیعی با افزایش سرعت جریان سوخت برای هوا و اکسیژن

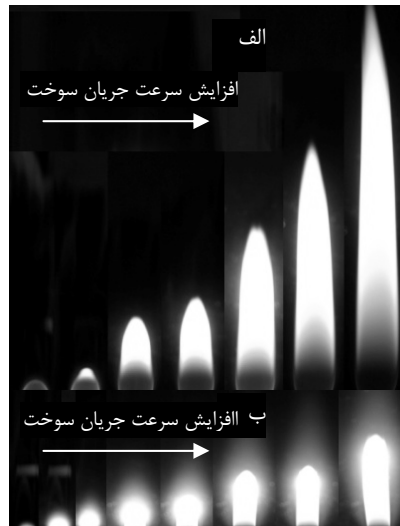
همان‌طور که از شکل (۴) پیداست، تغییرات برای هر دو نوع اکسیدکننده حالت خطی دارد. لازم به ذکر است که بر اساس رابطه (۱) طول شعله نفوذی آرام با سرعت جریان سوخت نسبت مستقیم و با نرخ اختلاط نسبت معکوس دارد [۱۸]. تطابق نتایج اثر سرعت جریان سوخت با معادلات نظری نشان دهنده صحت انجام آزمایشات است.

$$Z_{f,L} \propto \frac{\bar{V}(\pi r_j)^2}{2\pi D} \quad (1)$$

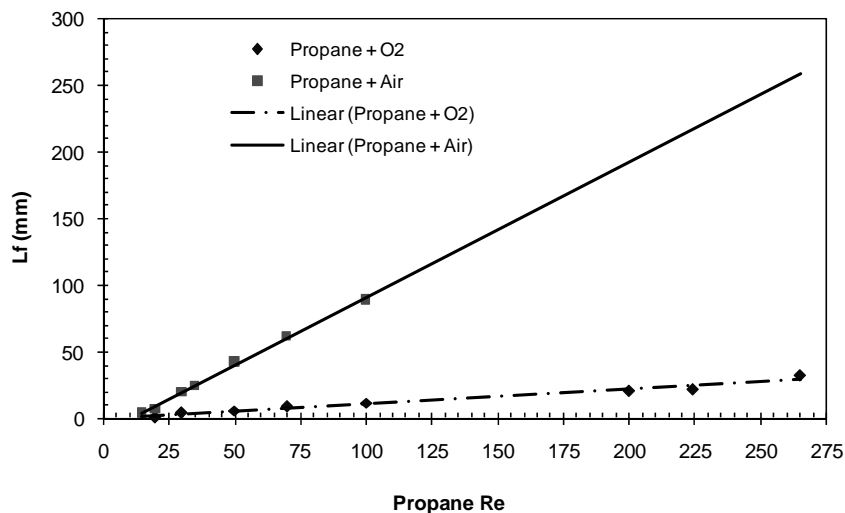
$Z_{f,L}$  طول شعله نفوذی آرام،  $\bar{V}$  سرعت جریان سوخت،  $r_j$  شعاع نازل سوخت و  $D$  نرخ نفوذ است.

### اثر سرعت جریان سوخت گاز پروپان

همان‌طور که در دو شکل (۵) و (۶) مشهود است؛ طول شعله پروپان در حالت اکسیژن خالص کمتر از هواست. علت امر هم همان‌طور که در مورد گاز طبیعی شرح داده شد، دسترسی بیشتر سوخت به اکسیژن و در نتیجه بالارفتن نرخ اختلاط است. شعله پروپان نسبت به شعله گاز طبیعی در شرایط اکسیدکننده یکسان، طول بیشتری دارد که علت آن هم سنگین 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 ۵- شعله گاز پروپان با الف: هوا ب: اکسیژن، سرعت جریان سوخت برای هر دو حالت از حدود ۱ cm/s شروع شده و تا ۱۹ cm/s افزایش یافته است. سرعت جریان اکسیدکننده ثابت و برابر ۶ cm/s است. شعله‌ها با نقاط روی شکل ۶ متناظر هستند.



شکل ۶- تغییرات طول شعله گاز پروپان با افزایش سرعت جریان سوخت برای هوا و اکسیژن

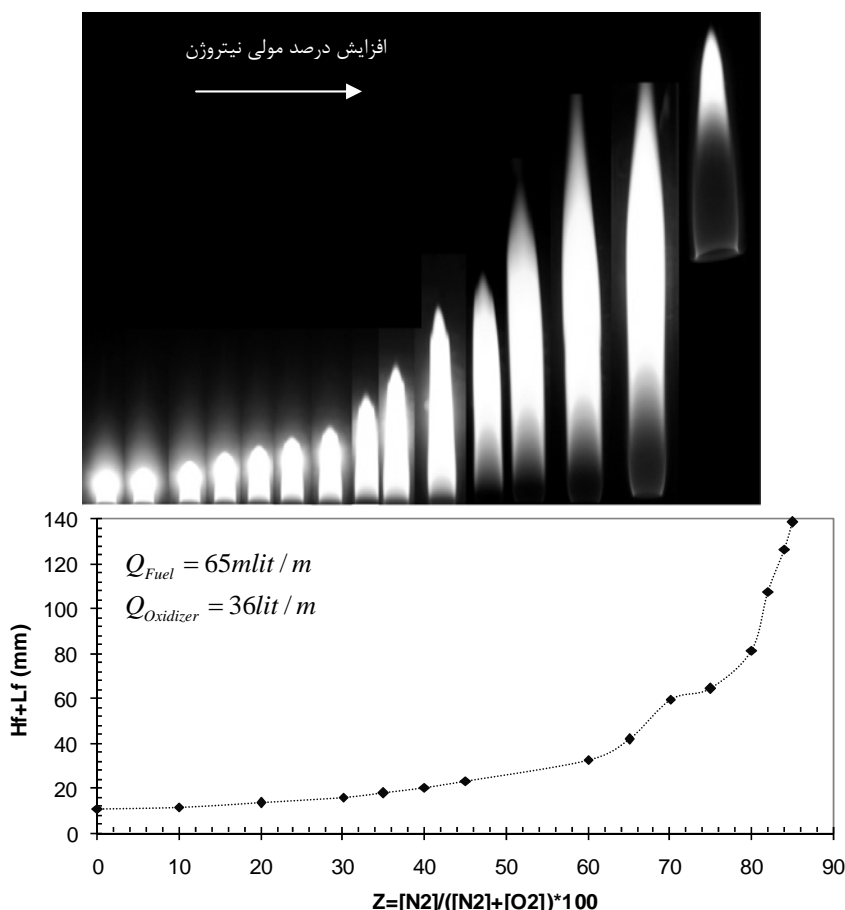
شعله پروپان نسبت به گاز طبیعی درخشندگی بیشتری دارد. این به خاطر شکسته شدن تعداد بیشتر پیوندهای کربن در احتراق پروپان است که سبب می‌شود گرمای بیشتری در طی احتراق آزاد شود و شعله پروپان دمای بیشین بالاتری نسبت به گاز طبیعی داشته باشد و این امر سبب تابش بیشتر رادیکال‌های کربن می‌شود. نتایج به دست آمده در این قسمت هم با رابطه طول شعله نفوذی آرام (بیان شده در بخش قبل) همخوانی دارد و درستی انجام آزمایشات را تایید می‌کند.

### اثر رقیق سازی اکسیژن با گازهای نیتروژن و دی اکسیدکربن

در این مرحله از آزمایشات اثر رقیق سازی اکسیدکننده (اکسیژن خالص) با گازهای نیتروژن و دی اکسیدکربن مورد بررسی قرار گرفته است. نرخ جریان اکسیدکننده برابر ۳۶ l/min در نظر گرفته شد تا در طی آزمایشات سرعت اکسیدکننده مقدار ثابت ۶ cm/s را داشته باشد. سرعت جریان سوخت هم برابر با سرعت جریان اکسیدکننده است.

### رقیق سازی با سوخت پروپان

همان طور که در شکل (۷) دیده می شود؛ با افزایش درصد  $N_2$  در اکسیژن، به تدریج طول شعله افزایش می یابد. علت آن هم کم تر شدن میزان اکسیژن در دسترس برای رادیکال های سوخت است که سبب می شود آن ها برای اختلاط کامل و رسیدن به اکسیژن مورد نیاز مسافت بیشتری را طی کنند. در طی فرایند رقیق سازی با افزایش درصد  $N_2$  از میزان درخشندگی شعله کاسته می شود. این پدیده به علت کاهش دمای شعله و در نتیجه کاهش میزان تابش رادیکال های 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 می کند. حد فرار شعله در رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن و با سوخت پروپان در ۸۵ درصد مولی  $N_2$  است.

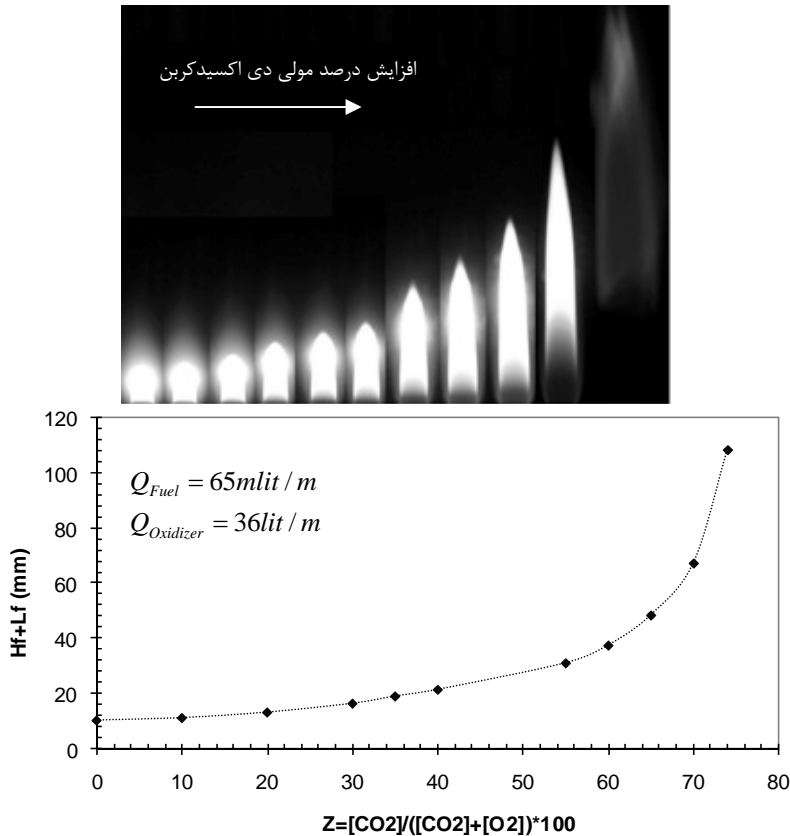


شکل ۷- اثر رقیق سازی اکسیژن با  $N_2$  همراه با سوخت پروپان. هر یک از نقاط نمودار به ترتیب از چپ به راست با یکی از شعله ها متناظر است. همانطور که در تصویر مستقیم مشخص است، برخاستگی از ۸۴ درصد مولی  $N_2$  آغاز شده است.

بلند شدن شعله از روی نازل از تاخیر در پدید آمدن مخلوط استوکیومتریک ناشی می شود. زیرا رقیق سازی سبب می شود 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 می شود. رقیق سازی سبب کاهش دمای بیشین شعله نیز می شود.



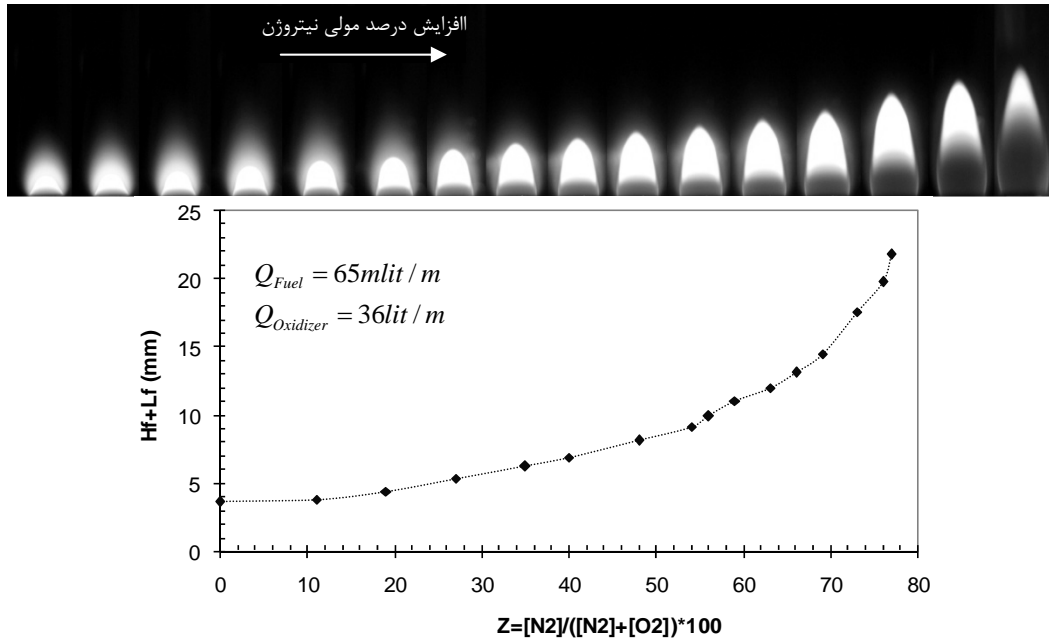
در شکل (۸) تصاویر گرفته شده توسط دوربین از فرایند رقیق‌سازی اکسیژن با CO<sub>2</sub> مربوط به سوخت پروپان دیده می‌شود. در این حالت حد فرار شعله در ۷۵ درصد مولی CO<sub>2</sub> است. با افزایش درصد CO<sub>2</sub> در اکسیژن باز هم کاهش درخشندگی شعله قابل مشاهده است، همان‌طور که در مورد رقیق‌سازی با N<sub>2</sub> توضیح داده شد؛ این در اثر کاهش میزان تابش رادیکال‌های کربن به خاطر کاهش میزان دمای بیشین شعله است. در رقیق‌سازی با دی‌اکسیدکربن، فرار در درصد کمتری از رقیق‌سازی صورت می‌گیرد. علت آن هم این است که CO<sub>2</sub> ظرفیت گرمایی بالاتری نسبت به N<sub>2</sub> دارد و لذا موجب کاهش بیشتر دمای شعله و عدم پایداری آن می‌شود. در نتیجه شعله رقیق شده با CO<sub>2</sub> زودتر از N<sub>2</sub> فرار می‌کند.



شکل ۸- اثر رقیق‌سازی اکسیژن با CO<sub>2</sub> همراه با سوخت پروپان. هر یک از نقاط نمودار به ترتیب از چپ به راست با یکی از شعله‌ها متناظرند. همان‌طور که در تصویر مستقیم مشخص است، برخاستگی در ۷۴ درصد مولی CO<sub>2</sub> آغاز شده و پس از آن شعله فرار می‌کند.

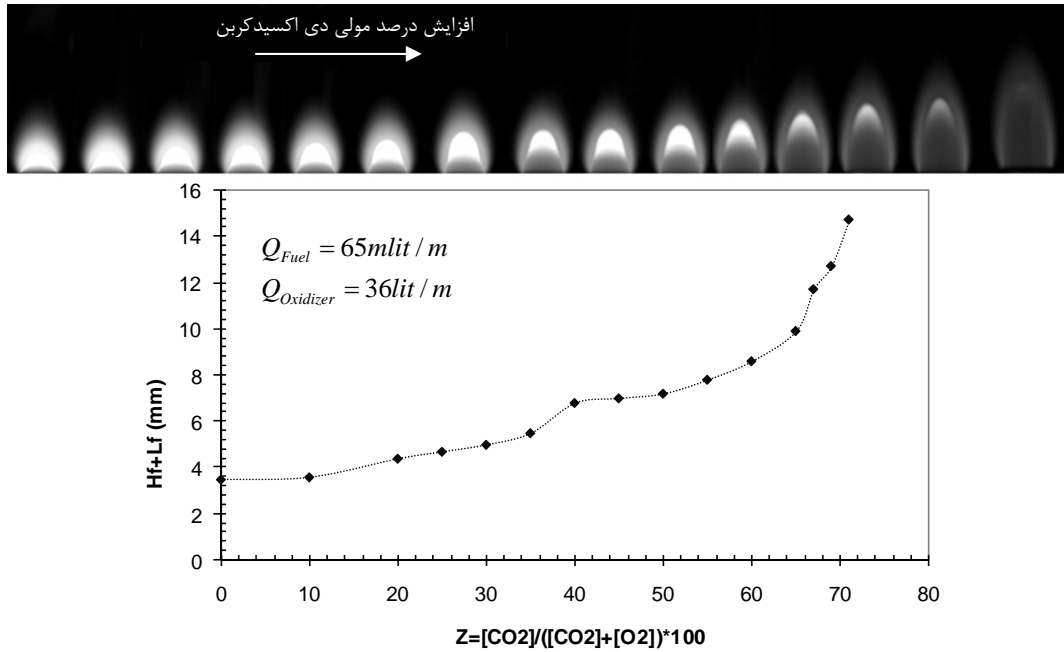
### رقیق‌سازی با سوخت گاز طبیعی

در شکل (۹) رقیق‌سازی اکسیژن با N<sub>2</sub> برای سوخت گاز طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. در رقیق‌سازی اکسیژن با N<sub>2</sub> برای سوخت گاز طبیعی حد فرار شعله در ۷۹ درصد مولی نیتروژن است. در این حالت هم، ابتدا در درصدهای پایین رقیق‌سازی شاهد یک منطقه درخشان خواهیم بود که با افزایش درصد رقیق‌سازی به تدریج این ناحیه کوچک می‌شود. در درصدهای رقیق‌سازی 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. به خاطر پایین‌تر بودن دمای بیشین در شعله‌های گاز طبیعی نسبت به پروپان، درخشندگی آن‌ها نسبت به شعله پروپان کمتر است. میزان برخاستگی نیز در شعله گاز طبیعی نسبت به پروپان کم‌تر است.



شکل ۹- اثر رقیق‌سازی اکسیژن با  $N_2$  همراه با سوخت گاز طبیعی. هر یک از نقاط نمودار به ترتیب از چپ به راست با یکی از شعله‌ها متناظر است.

در ادامه، در شکل (۱۰) اثر رقیق‌سازی اکسیژن با دی‌اکسیدکربن برای سوخت گاز طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش همانند سایر آزمایشات رقیق‌سازی در این مقاله، رقیق‌سازی سبب کاهش میزان درخشندگی شعله، افزایش طول و در نهایت برخاستگی و فرار شعله می‌شود. حد فرار شعله در این آزمایش در ۷۳ درصد مولی  $CO_2$  است.



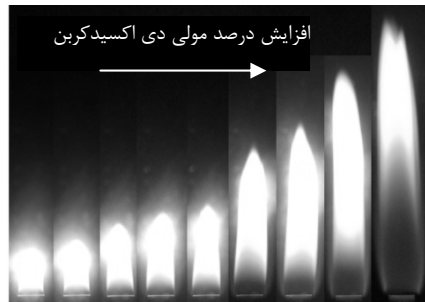
شکل ۱۰- اثر رقیق‌سازی اکسیژن با  $CO_2$  همراه با سوخت گاز طبیعی. هر یک از نقاط نمودار به ترتیب از چپ به راست با یکی از شعله‌ها متناظر است.

### اثر پیش گرم و رقیق سازی اکسیژن با گازهای نیتروژن و دی اکسیدکربن

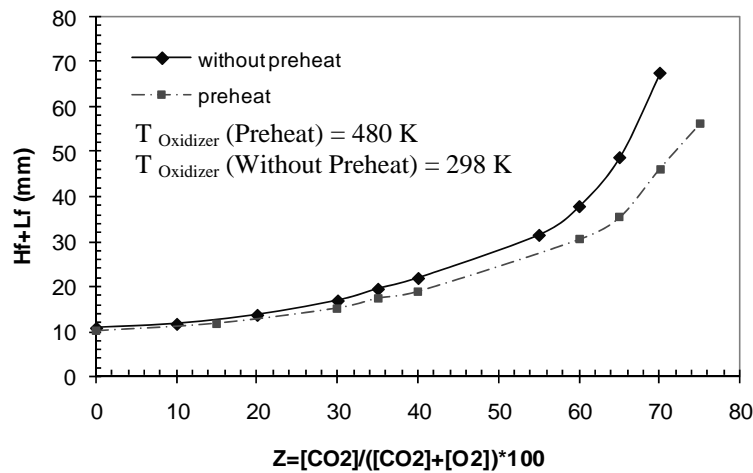
در این مرحله از آزمایشات اثر پیش گرم و رقیق سازی همزمان اکسیدکننده اکسیژن مورد بررسی قرار گرفته است. دمای جریان اکسیدکننده در هنگام اختلاط با جریان سوخت برابر  $480\text{ K}$  است. برای رقیق سازی جریان اکسیژن، همانند حالت بدون پیش گرم از گازهای نیتروژن و دی اکسیدکربن استفاده می شود. دمای جریان سوخت هم برابر دمای محیط یعنی  $298\text{ K}$  است. در این قسمت طول شعله در حالت پیش گرم با حالت بدون پیش گرم مقایسه شده است.

### پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با سوخت پروپان

در شکل (۱۱) تصاویر گرفته شده از شعله نفوذی پروپان همراه با پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده با دی اکسیدکربن نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۱۱) دیده می شود؛ رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن سبب می شود که میزان درخشندگی شعله کاهش یابد و سرانجام با افزایش درصد رقیق سازی، برخاستگی و فرار شعله اتفاق می افتد. در طی فرایند رقیق سازی طول شعله افزایش می یابد. در این آزمایش فرار شعله در  $77\%$  درصد مولی  $\text{CO}_2$  رخ می دهد. شعله پیش گرم پروپان نسبت به شعله پیش گرم گاز طبیعی، دمای بیشین بالاتری خواهد داشت که سبب درخشندگی بیشتر آن نسبت به گاز طبیعی می شود. البته چون پیش گرم اکسیدکننده سبب بالا رفتن دمای محصولات احتراق می شود؛ لذا شعله پیش گرم پروپان نسبت به حالت بدون پیش گرم نیز درخشندگی بیشتری دارد. پیش گرم اکسیدکننده به علت بالابردن میزان واکنش پذیری رادیکال های اکسیژن نسبت به حالت بدون پیش گرم، زمان برخاستگی را افزایش می دهد یعنی برخاستگی در درصدهای بالاتر رقیق سازی صورت می گیرد ولی میزان برخاستگی کاهش می یابد.



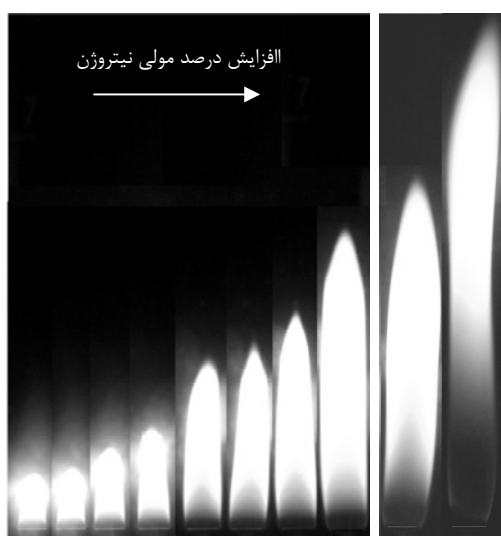
شکل ۱۱- اثر پیش گرم بر رقیق سازی اکسیژن با  $\text{CO}_2$  همراه با سوخت پروپان



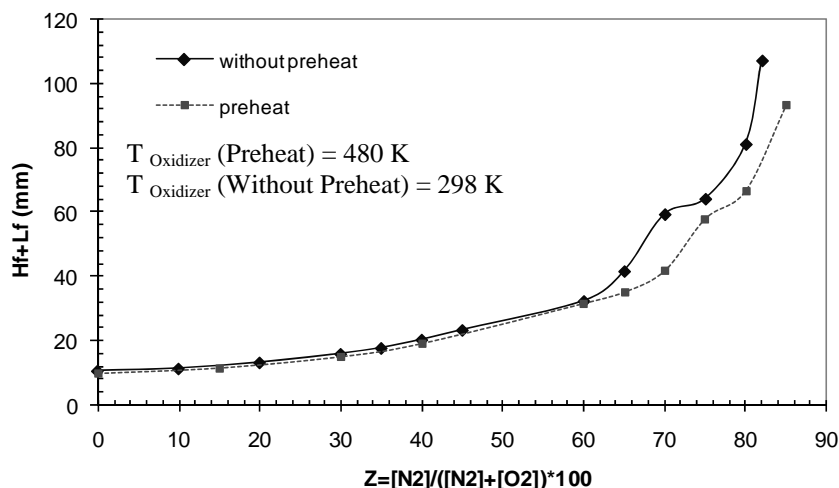
شکل ۱۲- مقایسه مجموع طول و برخاستگی شعله با درصد رقیق سازی در رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن و با سوخت پروپان در دو حالت پیش گرم اکسیدکننده و بدون پیش گرم. هر یک از شعله های شکل (۱۱) به ترتیب از چپ به راست با نقاط مربوط به حالت پیش گرم متناظرند.

در ادامه، در شکل (۱۲) تغییرات مجموع طول و برخاستگی شعله در برابر درصد رقیق‌سازی اکسیژن با  $\text{CO}_2$  و در دو حالت پیش‌گرم اکسیدکننده و بدون پیش‌گرم آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با پیش‌گرم اکسیدکننده طول ناحیه مرئی کاهش می‌یابد. میزان کاهش طول شعله از حدود ۵ درصد برای اکسیژن خالص ( $X_{\text{CO}_2}=0$ ) تا ۳۰ درصد برای ۷۰ درصد رقیق‌سازی ( $X_{\text{CO}_2}=0.7$ ) افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۳) تصاویر مستقیم گرفته شده از شعله نفوذی پروپان همراه با پیش‌گرم و رقیق‌سازی اکسیژن با  $\text{N}_2$  نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، افزایش درصد مولی  $\text{N}_2$  در اکسیژن سبب بزرگ‌تر شدن طول شعله شده و سرانجام سبب برخاستگی و فرار شعله می‌شود. در حین رقیق‌سازی از شدت درخشندگی شعله نیز کاسته می‌شود. در این آزمایش فرار شعله در ۸۷ درصد مولی نیتروژن روی می‌دهد. البته به علت پیش‌گرم اکسیدکننده و بالاتر رفتن دمای محصولات احتراق، این شعله نسبت به حالت بدون پیش‌گرم درخشندگی بیشتری دارد.



شکل ۱۳- اثر پیش‌گرم بر رقیق‌سازی اکسیژن با  $\text{N}_2$  همراه با سوخت پروپان

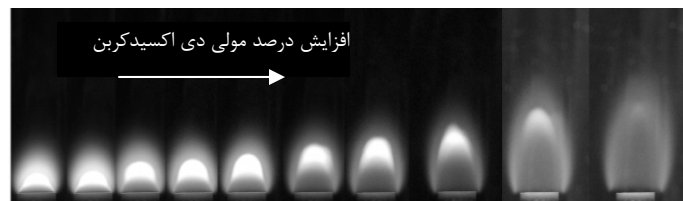


شکل ۱۴- مقایسه مجموع طول و برخاستگی شعله با درصد رقیق‌سازی در رقیق‌سازی اکسیژن با نیتروژن و با سوخت پروپان در دو حالت پیش‌گرم اکسیدکننده و بدون پیش‌گرم. شعله‌های شکل (۱۳) به ترتیب از چپ به راست با نقاط مربوط به حالت پیش‌گرم متناظرند.

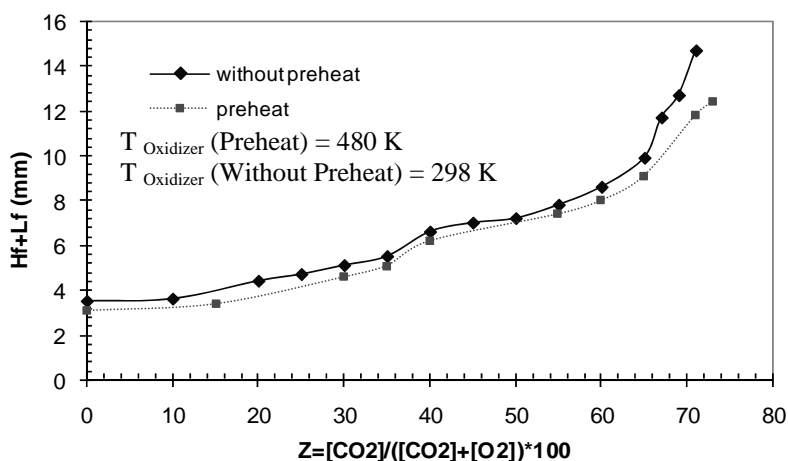
در شکل (۱۴) به مقایسه حالت رقیق‌سازی اکسیژن با نیتروژن و با سوخت پروپان در دو وضعیت پیش‌گرم اکسیدکننده و بدون پیش‌گرم پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود و نیز انتظار می‌رود پیش‌گرم سبب کاهش طول شعله و نیز پایداری بیشتر آن نسبت به فرایند رقیق‌سازی می‌شود. البته این کاهش طول، در درصدهای پایین‌تر رقیق‌سازی نسبت به طول شعله بسیار ناچیز است. فرار شعله در حالت بدون پیش‌گرم در ۸۵ درصد مولی  $N_2$  و با پیش‌گرم اکسیدکننده در ۸۷ درصد مولی  $N_2$  روی می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیش‌گرم اکسیدکننده یکی از سازوکارهای پایدارتر کردن شعله نسبت به فرایند رقیق‌سازی است. میزان کاهش طول شعله برای فرایند همراه با پیش‌گرم جریان اکسیدکننده نسبت به وضعیت بدون پیش‌گرم از حدود ۳ درصد برای اکسیژن خالص ( $X_{N_2}=0$ ) تا ۲۰ درصد برای ۸۰ درصد رقیق‌سازی ( $X_{N_2}=0.8$ ) افزایش می‌یابد.

### پیش‌گرم و رقیق‌سازی اکسیدکننده اکسیژن با سوخت گاز طبیعی

در شکل (۱۵) تصاویر حاصل از پیش‌گرم و رقیق‌سازی اکسیدکننده اکسیژن با دی‌اکسیدکربن و با سوخت گاز طبیعی نشان داده شده است. همانند سایر حالت‌های پیش‌گرم، دمای مخلوط ( $CO_2+O_2$ ) در هنگام اختلاط با جریان سوخت برابر  $480\text{ K}$  است. در طی فرایند رقیق‌سازی نیز همان‌طور که انتظار می‌رود طول شعله افزایش می‌یابد و به تدریج از میزان درخشندگی شعله کاسته می‌شود که این به خاطر کاهش دمای بیشین شعله در اثر کاهش میزان اکسیژن در دسترس است. سرانجام رنگ شعله به صورت کاملاً آبی درآمده و در نهایت برخاستگی و فرار رخ می‌دهد. حد فرار شعله در این حالت برابر ۷۵ درصد مولی  $CO_2$  است. پیش‌گرم اکسیدکننده، میزان برخاستگی شعله را کاهش می‌دهد ولی برخاستگی در درصدهای بالاتر رقیق‌سازی صورت می‌گیرد؛ که این به علت بالاتر رفتن میزان واکنش‌پذیری رادیکال‌های اکسیژن است.



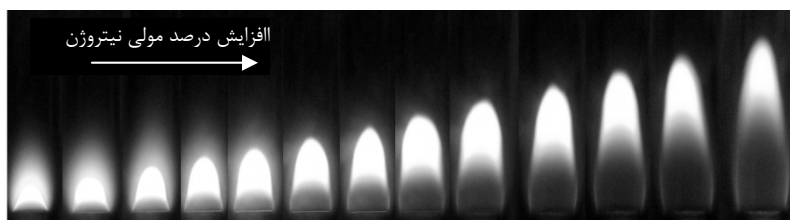
شکل ۱۵- اثر پیش‌گرم بر رقیق‌سازی اکسیژن با  $CO_2$  همراه با سوخت گاز طبیعی



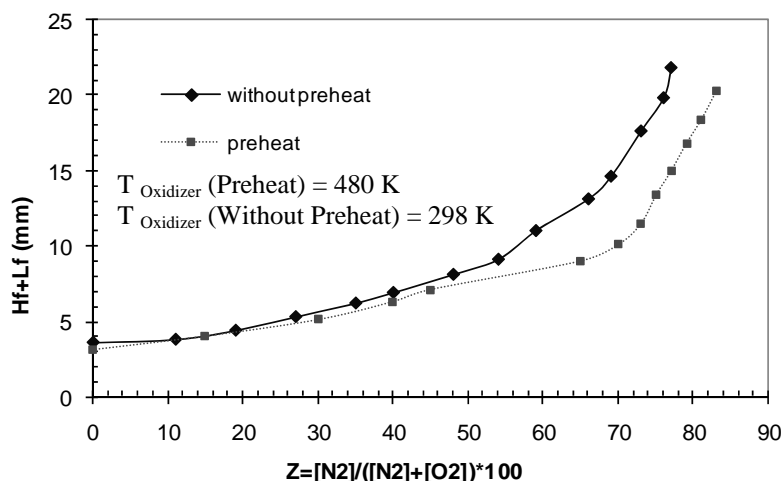
شکل ۱۶- مقایسه مجموع طول و برخاستگی شعله با درصد رقیق‌سازی در رقیق‌سازی اکسیژن با دی‌اکسیدکربن و با سوخت گاز طبیعی در دو حالت پیش‌گرم اکسیدکننده و بدون پیش‌گرم. هر یک از شعله‌های شکل (۱۵) به ترتیب از چپ به راست با نقاط مربوط به حالت پیش‌گرم متناظرند.

در شکل (۱۶) اثر رقیق‌سازی اکسیدکننده با دی اکسیدکربن و با سوخت گاز طبیعی در دو وضعیت پیش‌گرم اکسیدکننده و بدون پیش‌گرم نشان داده شده است. نتایج کلی در مورد سوخت گاز طبیعی همانند پروپان است یعنی با پیش‌گرم کردن، فرار شعله در درصدهای بالاتر رقیق‌سازی صورت می‌گیرد و نیز پیش‌گرم سبب کوچک‌تر شدن ناحیه مرئی می‌شود. در حالت پیش‌گرم فرار در ۷۵ درصد مولی  $CO_2$  و در وضعیت بدون پیش‌گرم در ۷۳ درصد مولی صورت می‌پذیرد. میزان کاهش طول شعله برای فرایند همراه با پیش‌گرم جریان اکسیدکننده نسبت به وضعیت بدون پیش‌گرم از حدود ۵ درصد برای اکسیژن خالص ( $X_{CO_2}=0$ ) تا حدود ۲۰ درصد برای ۷۱ درصد رقیق‌سازی ( $X_{CO_2}=0.71$ ) افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۷) تصاویر مستقیم گرفته شده در شرایط پیش‌گرم و رقیق‌سازی اکسیژن با  $N_2$  برای سوخت گاز طبیعی نشان داده شده است. دمای مخلوط ( $N_2+O_2$ ) در هنگام اختلاط با جریان سوخت برابر  $480\text{ K}$  است. در این حالت نیز رقیق‌سازی سبب افزایش طول شعله، کاهش میزان درخشندگی و در نهایت برخاستگی و فرار شعله می‌شود. در حین فرایند رقیق‌سازی نیز به تدریج ناحیه آبی رنگ گسترده تر می‌شود. فرار شعله در ۸۴ درصد مولی نیتروژن روی می‌دهد. در این حالت نیز پیش‌گرم به شدت میزان برخاستگی را کاهش می‌دهد ولی زمان آن را به عقب می‌اندازد؛ یعنی برخاستگی در درصدهای بالاتر رقیق‌سازی صورت می‌گیرد.



شکل ۱۷- اثر پیش‌گرم بر رقیق‌سازی اکسیژن با  $N_2$  همراه با سوخت گاز طبیعی

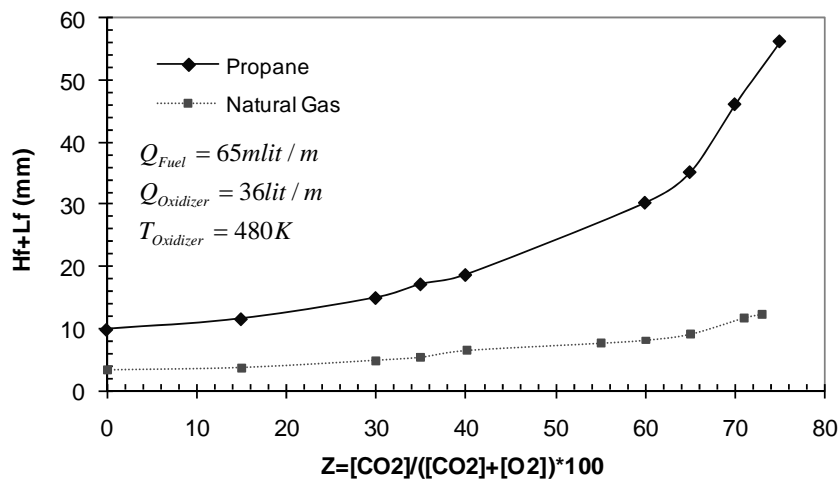


شکل ۱۸- مقایسه مجموع طول و برخاستگی شعله با درصد رقیق‌سازی در رقیق‌سازی اکسیژن با نیتروژن برای سوخت گاز طبیعی در دو حالت پیش‌گرم اکسیدکننده و بدون پیش‌گرم. هر یک از شعله‌های شکل (۱۷) به ترتیب از چپ به راست با نقاط مربوط به حالت پیش‌گرم متناظرند.

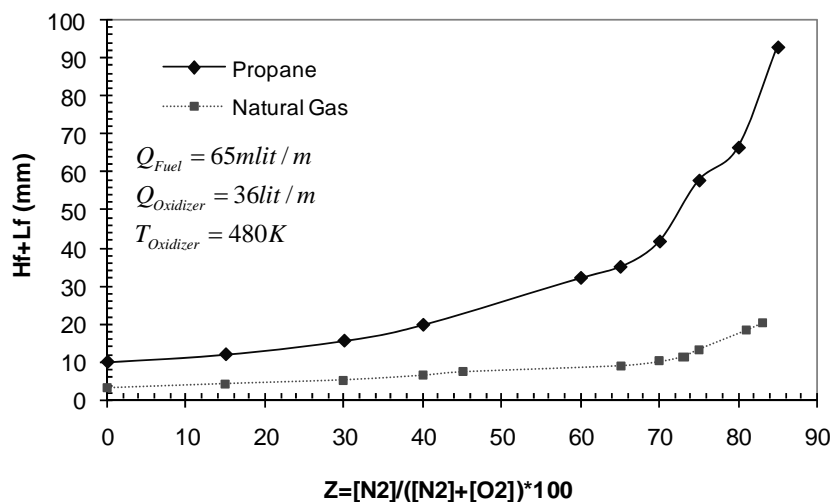
در شکل (۱۸) مقایسه اثر پیش‌گرم بر رقیق‌سازی اکسیژن با نیتروژن برای سوخت گاز طبیعی با حالت بدون پیش‌گرم نشان داده شده است. با پیش‌گرم فرار در ۸۴ درصد مولی نیتروژن و بدون پیش‌گرم فرار در ۷۹ درصد مولی صورت می‌پذیرد. میزان کاهش طول شعله برای فرایند همراه با پیش‌گرم جریان اکسیدکننده نسبت به وضعیت بدون پیش‌گرم از حدود ۳ درصد برای اکسیژن خالص ( $X_{N_2}=0$ ) تا ۳۳ درصد برای ۷۳ درصد رقیق‌سازی ( $X_{N_2}=0.73$ ) افزایش می‌یابد.

### اثر تغییر نوع سوخت روی پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن

در شکل (۱۹) مقایسه دو سوخت پروپان و گاز طبیعی در طی آزمایش پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با گاز دی اکسیدکربن نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود؛ شعله های سوخت پروپان بزرگ تر بوده و نیز پایدارترند یعنی فرار در درصد بالاتری از رقیق سازی صورت می گیرد. این به خاطر سنگین تر بودن سوخت پروپان نسبت به گاز طبیعی و بیشتر بودن تعداد رادیکال های کربن در طی فرایند احتراق است. همچنین با افزایش درصد رقیق سازی میزان تغییر طول برای شعله پروپان بیشتر از شعله گاز طبیعی است یعنی رقیق سازی اختلاف طول شعله پروپان و گاز طبیعی را زیادتیر می کند. در شکل (۲۰) هم مشابه شکل قبل بررسی اثر تغییر نوع سوخت روی پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با گاز نیتروژن نشان داده شده است. با دقت در شکل های (۱۹) و (۲۰) نتیجه می شود که شیب افزایش طول برای شعله های با سوخت پروپان بسیار بیشتر از شعله های با سوخت گاز طبیعی است.



شکل ۱۹- اثر تغییر نوع سوخت روی پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با دی اکسیدکربن



شکل ۲۰- اثر تغییر نوع سوخت روی پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با نیتروژن

### نتیجه گیری

در این تحقیق به مطالعه آثار رقیق سازی و نیز پیش گرم همراه با رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با گازهای نیتروژن و دی اکسیدکربن، بر سوخت های پروپان و گاز طبیعی پرداخته شده و نتایج زیر به دست آمده است.

- ۱- رقیق‌سازی اکسیدکننده اکسیژن با  $N_2$  و  $CO_2$  در نهایت سبب برخاستگی و فرار شعله می‌شود. البته در رقیق‌سازی اکسیژن با  $CO_2$  این برخاستگی در درصدهای کمتر رقیق‌سازی صورت می‌گیرد
- ۲- در رقیق‌سازی با سوخت پروپان برخاستگی و فرار شعله در درصدهای مولی بیشتری از  $CO_2$  و  $N_2$  نسبت به رقیق‌سازی با سوخت گاز طبیعی اتفاق می‌افتد.
- ۳- با افزایش درصد رقیق‌سازی، شیب افزایش طول برای شعله‌های پروپان بسیار بزرگ‌تر از شعله‌های گاز طبیعی است.
- ۴- پیش‌گرم سبب کاهش طول ناحیه مرئی می‌شود.
- ۵- پیش‌گرم اکسیدکننده سبب پایداری بیشتر نسبت به فرایند رقیق‌سازی می‌شود و فرار در درصدهای بالاتری از رقیق‌سازی صورت می‌پذیرد.
- ۶- طول شعله پروپان در شرایط سرعت سوخت و اکسیدکننده برابر و درصد رقیق‌سازی یکسان، بسیار بزرگ‌تر از طول شعله گاز طبیعی است.
- ۷- به علت بالاتر رفتن دمای محصولات احتراق در پیش‌گرم اکسیدکننده، این شعله‌ها نسبت به حالت بدون پیش‌گرم درخشندگی بیشتری دارند.
- ۸- پیش‌گرم اکسیدکننده میزان برخاستگی را به شدت کاهش می‌دهد ولی وقوع آن را عقب می‌اندازد؛ یعنی برخاستگی در درصد بالاتری از رقیق‌سازی صورت می‌پذیرد.

## مراجع

- 1- Burke, S. P., and Schumann, T. E. W., "Diffusion Flames" Industrial and Engineering Chemical Research, Vol. 20, No. 10, p. 998, 1928.
- 2- Glassman, I., Combustion, Academic Press, 1997.
- 3- 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.
- 4- Juddoo, M., Masri, A. R., and Bilger, R. W., "The Effects of Oxygen Enrichment on the Structure of Laminar Diffusion Flames of Methane," 6<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Combustion, May 2007.
- 5- 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.
- 6- 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.
- 7- 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, 2000.
- 8- 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.
- 9- 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.
- 10- Sullivan, N., Jensen, A., Glarborg, P., and Pope, C. J., "Ammonia Conversion and  $NO_x$  Formation in Laminar Coflowing Nonpremixed Methane- Air Flames," Combustion and Flame, Vol. 131, pp. 285-295, 2002.
- 11- Bowman, walters, K., and Bardos, Adela., "Controlled Combustion-an Approach for Reducing Irreversibilities in Energy Conversion," GCEP Technical Report 2005, <http://gcep.stanford.edu>.
- 12- Ghaderi yeganeh, M., "Effects of Preheated Combustion Air on Laminar Coflow Diffusion Flames under Normal and Microgravity Conditions," Phd Thesis in Mechanical Engineering, Maryland University, 2005.
- 13- Gupta, A., "Flame Characteristics and Challenges with High Temperature Air Combustion," Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference, July 2000.
- 14- Christo, F. C., and Dally, B. B., "Modelling Turbulent Reacting Jets Issuing Into a Hot and Diluted Coflow," Combustion and Flame, Vol. 142, pp. 117-129, 2005.
- 15- Medwell, P. R., Kalt, A. M., and Dally, B. B., "Simultaneous Imaging of OH, Formaldehyde, and Temperature of Turbulent Nonpremixed Jet Flames in a Heated and Diluted Coflow," Combustion and Flame, Vol. 148, pp. 48-61, 2006.
- 16- Mishra, D. P., and Kumar, P., "Experimental Investigation of Laminar LPG-  $H_2$  Jet Diffusion Flame with Preheated Reactants," Fuel, Vol. 78, pp. 3091-3095, 2008.
- 17- Moore, J. D., Risha, G. A., and Kuo, K. K., "Effect of Initial Gaseous Reactant Temperature on Fuel-Rich Coaxial Diffusion Flame Stability, Eastern States Section of the Combustion Institute, October 2003.
- 18- Kuo, K. K., Principles of Combustion, John Wiley & Sons, 1986.



## English Abstract

### An Experimental Study of Propane/Oxygen and City Gas/Oxygen Laminar Diffusion Flames in Diluted and Preheating Conditions

**B. Kashir, S. Tabejamaat and A. Mardani**

Department of Aerospace Engineering, Amir Kabir University of Technology

*In the present study, propane/ oxygen and city gas/ oxygen diffusion flames within a laminar regime have been investigated in two parts. First, the effect of oxygen dilution with nitrogen and carbon dioxide gases has been investigated. In this section, stability and flame structure variations against the dilution process are studied. In the second part, oxidant stream preheating up to 480 K, and contemporaneous diluting with nitrogen or carbon dioxide are investigated and the results are compared against non-preheating tests. Preheating causes more flame stability in comparison to the dilution process. Because of the temperature rise in the combustion of such products during preheating, these flames are more luminous in comparison with normal temperature flames.*

**Key Words:** Experimental study, Diffusion flame, Preheating, Diluting, Propane, City gas, Oxygen