

# مطالعه تجربی اثر پیش گرم و رقیق سازی اکسیژن بر شعله نفوذی پروپان و گاز طبیعی

بابک کشیر<sup>۱</sup>، امیر مردانی<sup>۲</sup>، صادق تابع جماعت<sup>۳</sup>

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

## چکیده

در پژوهش حاضر به مطالعه شعله نفوذی در محدوده جریان آرام و در شرایط پیش گرم اکسیدکننده اکسیژن تا 480 K و رقیق سازی همزمان آن با گازهای نیتروژن یا دی اکسیدکربن پرداخته شده و نتایج با حالت بدون پیش گرم مقایسه شده است. سوخت مورد استفاده گاز طبیعی در شهر تهران و پروپان خالص میباشد. پیش گرم سبب پایداری بیشتر شعله در برابر فرآیند رقیق سازی اکسیژن میشود و شعله های رقیق شده با نیتروژن پایدارتر از شعله های رقیق شده با دی اکسیدکربن میباشند. به علت بالا رفتن دمای احتراق در پیش گرم، این شعله ها نسبت به حالت بدون پیش گرم درخشندگی بیشتری دارند.

واژه های کلیدی: مطالعه تجربی - شعله نفوذی - پیش گرم - رقیق سازی

## 1- مقدمه

بیشتر سیستم های عملی احتراق در مقوله ای قرار میگیرند که در آنها عامل کنترل کننده احتراق، نرخ اختلاط است و از آنها بعنوان شعله نفوذی یاد میکنند. در این شعله ها سوخت و اکسیدکننده بواسطه دیفیوژن توربولنت و مولکولی در منطقه واکنش در کنار یکدیگر قرار میگیرند.

یکی از مباحثی که در شعله پس اختلاط مورد توجه قرار گرفته، پیش گرم کردن و رقیق سازی اکسید کننده میباشد. پیش گرم کردن اکسیدکننده باعث ایجاد شعله پایدار در محدوده بزرگتر نسبت های اختلاط میشود و نیز سبب میشود که توزیع دما یکنواخت تر و منطقه واکنش وسیعتر شود؛ لذا راندمان احتراقی بالاتر خواهد رفت. البته پیش گرم کردن یکی از مکانیزمهای پایدار کردن شعله است که بویژه در راه اندازی سرد کوره ها و سایر عملکردهای گذرای سیستم های احتراقی اهمیت پیدا میکند. در درجه حرارتهای پیش گرم پایین (پایینتر از 800 سلسیوس) با رژیمی از احتراق هستیم که در آن هر چند پیش گرم کردن، موجب افزایش دمای محصولات احتراق و در نتیجه افزایش تولید NOx حرارتی میشود. [1] ولی این اثر با رقیق سازی اکسیدکننده با نیتروژن یا دی اکسیدکربن جبران میشود 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.

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا

2- دانشجوی دکترا مهندسی هوافضا

3- دانشیار دانشکده مهندسی هوافضا

محمد قادری یگانه [2] در دانشگاه مرینند اثر پیش گرم هوا در احتراق پس اختلاط آرام و در شرایط خلاء 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 C2 را بصورت برش های عرضی و نمایش سه بعدی بدست آورده است. ایشان همچنین روی طول شعله در دماهای مختلف پیش گرم نیز کار کرده اند. Gupta و همکاران [3] هم در دانشگاه مرینند اثر پیش گرم و رقیق سازی هوا را با N2 برای شعله های نفوذی متان، پروپان، استیلن و هیدروژن محور پژوهش قرار داده اند. Christo و همکاران [4] و Medwell و همکاران [5] احتراق جت سوخت دیفیوژن جریان محوری همراه با محصولات احتراق یک مشعل ثانویه و هوای محیط، را مورد بررسی قرار داده اند. Konsur و همکاران [6] اثر پیش گرم و رقیق سازی سوخت استیلن روی ساختار میدان دوده در شعله دیفیوژن آرام گازی و در شرایط خلاء و جاذبه معمولی را مورد پژوهش قرار داده اند. Seitzman و همکاران [7] در دانشگاه صنعتی جورجیا، سرعت شعله آرام مخلوط سوخت (H2/CO/CO2) روی گستره وسیعی از ترکیب سوخت و با پیش گرم واکنش دهنده تا 700 K را مورد بررسی قرار داده اند. Moore و همکاران [8] اثر پیش گرم مواد واکنش دهنده را در شعله دیفیوژن متان-اکسیژن بررسی کرده اند. در مقاله حاضر اثر پیش گرم اکسید کننده اکسیژن تا دمای 480 K همراه با رقیق سازی آن با N2 و CO2 مورد پژوهش قرار گرفته است. نتایج در نهایت با حالت بدون پیش گرم مقایسه شده است. سوخت مورد استفاده گاز طبیعی در شهر تهران و پروپان خالص میباشد. دمای جریان سوخت برابر دمای محیط یعنی 298 K میباشد.

## 2- تجهیزات و روش آزمایش

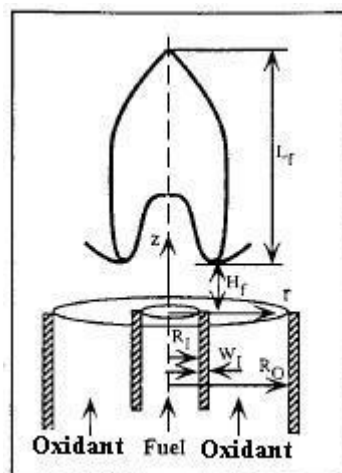
برای بررسی شعله نفوذی پروپان و گاز طبیعی از یک مشعل هم محور (co-flow) استفاده شده است. شکل (1) تصاویری از این مشعل را نشان میدهد. در این مشعل نازل سوخت دارای قطر داخلی 4.8 میلیمتر میباشد که در مرکز یک لوله پیرکس با قطر داخلی 11.14 سانتیمتر بصورت عمودی قرار گرفته است. ضخامت نازل سوخت 0.35 میلیمتر میباشد. 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.



شکل 1- دو تصویر از مشعل مورد استفاده

برای پیش گرم اکسیدکننده از یک هیتر الکتریکی استفاده شده که در داخل آن دو المنت حرارتی هر یک با توان 3000 وات قرار داده شده است. برای جلوگیری از اتلاف حرارتی از پشم سرامیک و پشم شیشه برای عایق کاری کل سیستم استفاده شده است.

در این آزمایشات، 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  $fs/2$  کنترل میشود. سپس از شعله توسط دوربین عکاسی دیجیتالی 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 2- شماتیک مشعل بدون شیشه پیرکس

در انجام آزمایشات پارامتری به نام  $Z$  تعریف شد که بصورت میزان مول ماده رقیق کننده تقسیم بر مجموع میزان مول ماده رقیق کننده و اکسیدکننده ضرب در 100 میباشد و بصورت کلی درصد رقیق سازی را نشان میدهد.

### 3- نتایج حاصل

در این پژوهش برای هر سوخت یعنی گاز طبیعی و پروپان دو آزمایش زیر انجام شده است.

- اثر پیش گرم بر رقیق سازی اکسیژن با  $N_2$

- اثر پیش گرم بر رقیق سازی اکسیژن با  $CO_2$

در طی فرآیند آزمایشات، سرعت سوخت همواره ثابت و برابر  $6 \text{ cm/s}$  میباشد. سرعت اکسیدکننده هم ثابت و برابر با سرعت سوخت انتخاب شده است. دمای جریان اکسیدکننده هم در هنگام اختلاط با جریان سوخت همواره برابر  $480 \text{ K}$  میباشد. دمای جریان سوخت هم برابر با دمای محیط یعنی  $298 \text{ K}$  است.

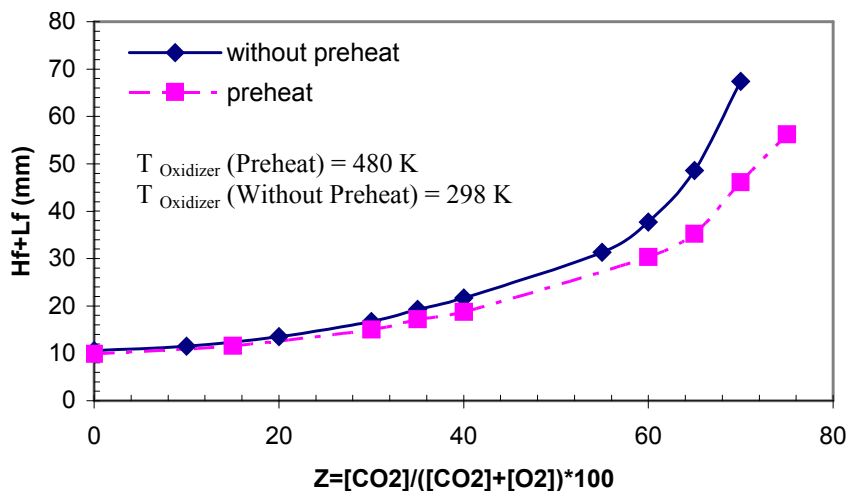
#### 1-3- پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با سوخت پروپان

در شکل (3) تصاویر مستقیم گرفته شده از شعله نفوذی پروپان همراه با رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با دی اکسید کربن نشان داده شده است. دمای مخلوط ( $CO_2+O_2$ ) در هنگام اختلاط با جریان سوخت برابر  $480 \text{ K}$  میباشد. سرعت جریان های سوخت و اکسیدکننده هم ثابت و برابر با  $6 \text{ cm/s}$  میباشد. همانطور که در شکل دیده میشود رقیق سازی اکسیژن با دی

اکسید کربن سبب میشود که میزان درخشندگی شعله کاهش یابد و سرانجام با افزایش درصد رقیق سازی، برخاستگی و فرار شعله اتفاق می افتد. در طی فرآیند رقیق سازی طول شعله افزایش می یابد. در این آزمایش فرار شعله در 77 درصد مولی CO<sub>2</sub> رخ داد. در شعله پروپان بعلت اینکه یک پیوند کربن بیشتر از شعله گاز طبیعی شکسته میشود؛ لذا حرارت بیشتری آزاد میشود و در نتیجه شعله پیش گرم پروپان نسبت به شعله پیش گرم گاز طبیعی ماکزیمم درجه حرارت بالاتری خواهد داشت که سبب درخشندگی بیشتر آن نسبت به گاز طبیعی میشود. البته چون پیش گرم اکسیدکننده سبب بالا رفتن دمای محصولات احتراق میشود؛ لذا شعله پیش گرم پروپان نسبت به حالت بدون پیش گرم نیز درخشندگی بیشتری دارد. پیش گرم اکسیدکننده بعلت بالابردن میزان واکنش پذیری رادیکال های اکسیژن نسبت به حالت بدون پیش گرم، زمان برخاستگی را افزایش میدهد یعنی برخاستگی در درصدهای بالاتر رقیق سازی صورت میگیرد ولی میزان برخاستگی کاهش می یابد.



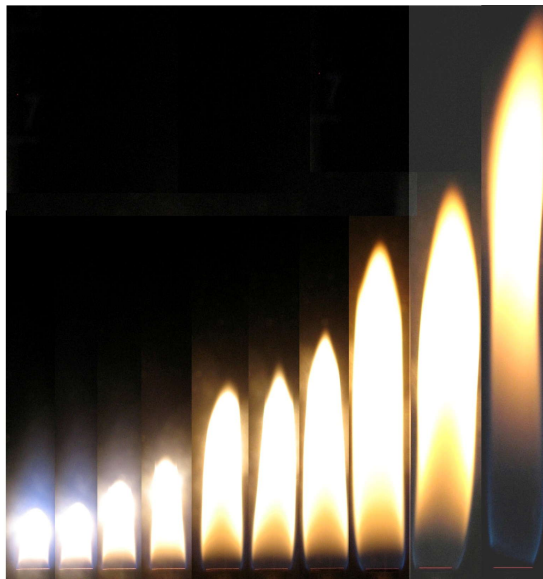
شکل 3- اثر پیش گرم بر رقیق سازی اکسیژن با CO<sub>2</sub> همراه با سوخت پروپان



شکل 4- مقایسه رقیق سازی اکسیژن با دی اکسید کربن و با سوخت پروپان در دو حالت پیش گرم اکسیدکننده و بدون پیش گرم

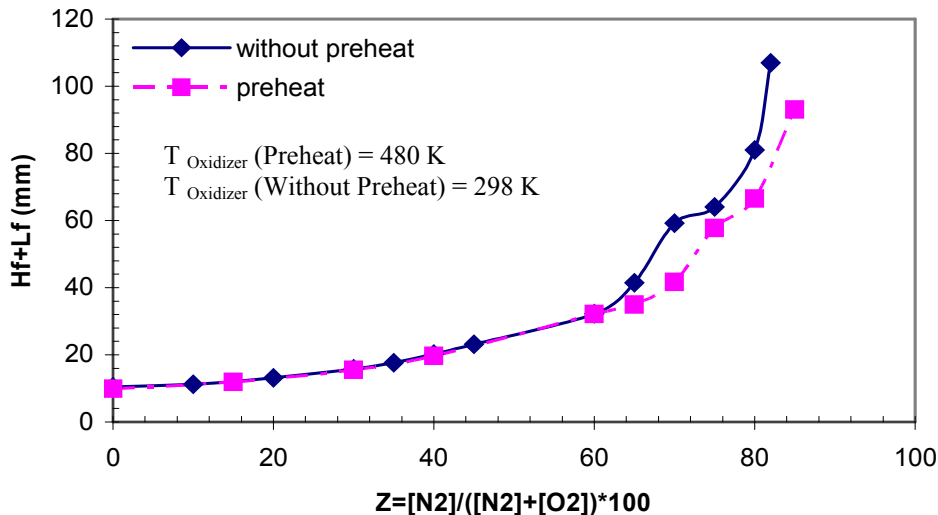
در ادامه و در شکل (4) تغییرات مجموع طول و برخاستگی شعله در برابر درصد رقیق سازی اکسیژن با CO<sub>2</sub> و در دو حالت پیش گرم اکسیدکننده و بدون پیش گرم آورده شده است. همانطور که مشاهده میشود با پیش گرم اکسیدکننده، طول ناحیه مرئی (visible) کاهش می یابد. البته این کاهش در درصدهای پایینتر رقیق سازی، نسبت به طول شعله ناچیز است و با افزایش درصد رقیق سازی این اختلاف بیشتر میشود. همچنین پیش گرم اکسیدکننده سبب پایداری بیشتر شعله نسبت به فرایند رقیق سازی میشود و فرار شعله در درصد های بالاتر رقیق سازی صورت میگیرد. زیرا با افزایش انتالپی مواد اولیه، در محدوده وسیعتری از نسبتهای اختلاط اکسیژن با رقیق کننده احتراق خواهیم داشت. در این مورد فرار شعله در حالت بدون پیش گرم در 75 درصد مولی رقیق سازی و در حالت با پیش گرم در 77 درصد مولی صورت میگیرد.

در شکل (5) تصاویر مستقیم گرفته شده از شعله نفوذی پروپان همراه با رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با  $N_2$  نشان داده شده است. در این آزمایش هم همانند سایر موارد در این مقاله، دمای مخلوط ( $N_2+O_2$ ) در هنگام اختلاط با جریان سوخت برابر  $480\text{ K}$  میباشد. همانطور که در شکل زیر مشاهده میشود، افزایش درصد مولی  $N_2$  در اکسیژن سبب بزرگتر شدن طول شعله میشود و سرانجام سبب برخاستگی و فرار شعله میشود. در حین رقیق سازی از شدت درخشندگی شعله نیز کاسته میشود. علت آن کاهش درجه حرارت ماکزیمم شعله در اثر کاهش میزان اکسیژن در دسترس است. در این آزمایش فرار شعله در 87 درصد مولی نیتروژن روی میدهد. البته به علت پیش گرم اکسیدکننده و بالاتر رفتن دمای محصولات احتراق، این شعله نسبت به حالت بدون پیش گرم درخشندگی بیشتری دارد. پیش گرم زمان برخاستگی را هم طولانی تر میکند ولی میزان برخاستگی را نسبت به حالت بدون پیش گرم کاهش میدهد.



شکل 5- اثر پیش گرم بر رقیق سازی اکسیژن با  $N_2$  همراه با سوخت پروپان

در شکل (6) هم به مقایسه حالت رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن و با سوخت پروپان در دو وضعیت پیش گرم اکسیدکننده و بدون پیش گرم پرداخته شده است. همانطور که در شکل مشاهده میشود و نیز انتظار میرود پیش گرم سبب کاهش طول شعله و نیز پایداری بیشتر آن نسبت به فرآیند رقیق سازی میشود. البته این کاهش طول، در درصدهای پایینتر رقیق سازی نسبت به طول شعله بسیار ناچیز است. فرار شعله در حالت بدون پیش گرم در 85 درصد مولی  $N_2$  و با پیش گرم اکسیدکننده در 87 درصد مولی  $N_2$  روی میدهد. همانطور که مشاهده میشود، پیش گرم اکسیدکننده یکی از مکانیزم های پایدارتر کردن شعله نسبت به فرآیند رقیق سازی میباشد.



شکل 6- مقایسه رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن و با سوخت پروپان در دو حالت پیش گرم اکسیدکننده و بدون پیش گرم

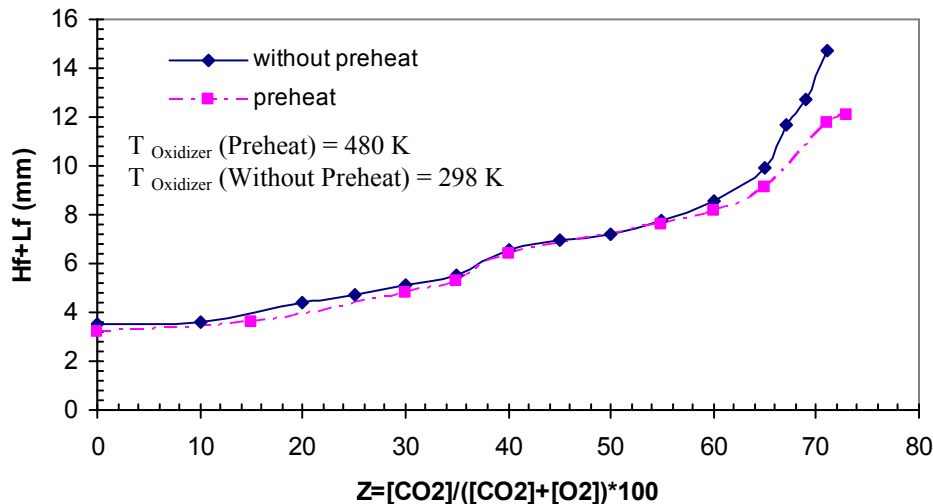
### 2-3- پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با سوخت گاز طبیعی

در شکل (7) تصاویر مستقیم حاصل از رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با دی اکسیدکربن و با سوخت گاز طبیعی نشان داده شده است. همانند سایر حالت‌های پیش گرم در این مقاله، دمای مخلوط ( $CO_2+O_2$ ) در هنگام اختلاط با جریان سوخت برابر 480 K می‌باشد. در طی فرآیند رقیق سازی نیز همانطور که انتظار می‌رود طول شعله افزایش می‌یابد و بتدریج از میزان درخشندگی شعله کاسته می‌شود که این بخاطر کاهش دمای ماکزیمم شعله در اثر کاهش میزان اکسیژن در دسترس است. سرانجام رنگ شعله بصورت کاملاً آبی درآمده و در نهایت برخاستگی و فرار رخ می‌دهد. حد فرار شعله در این حالت برابر 75 درصد مولی  $CO_2$  است. پیش گرم اکسیدکننده اکسیژن، میزان برخاستگی شعله را کاهش می‌دهد ولی برخاستگی در درصدهای بالاتر رقیق سازی صورت می‌گیرد؛ که این به علت بالاتر رفتن میزان واکنش پذیری رادیکال‌های اکسیژن در اثر پیش گرم اکسیدکننده است.



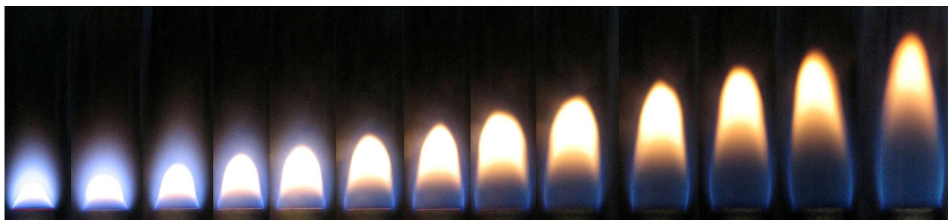
شکل 7- اثر پیش گرم بر رقیق سازی اکسیژن با  $CO_2$  همراه با سوخت گاز طبیعی

در شکل (8) اثر رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با دی اکسیدکربن و با سوخت گاز طبیعی در دو وضعیت پیش گرم اکسیدکننده و بدون پیش گرم نشان داده شده است. نتایج کلی در مورد سوخت گاز طبیعی همانند پروپان است یعنی با پیش گرم کردن، فرار شعله در درصدهای بالاتر رقیق سازی صورت می‌گیرد و نیز پیش گرم سبب کوچکتر شدن ناحیه مرئی (visible) می‌شود. در حالت پیش گرم فرار در 75 درصد مولی  $CO_2$  و در وضعیت بدون پیش گرم در 73 درصد مولی صورت می‌پذیرد.



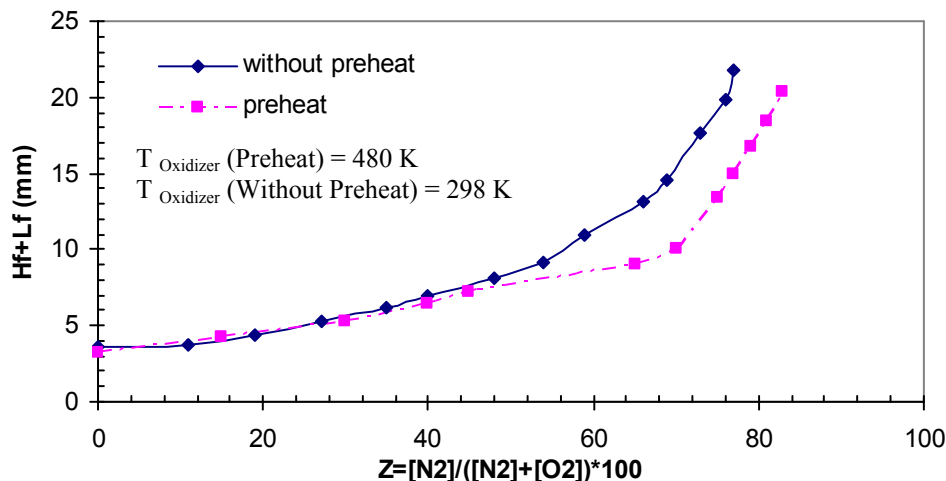
شکل 8- رقیق سازی اکسیژن با دی اکسیدکربن و با سوخت گاز طبیعی در دو حالت پیش گرم اکسیدکننده و بدون پیش گرم

در شکل (9) تصاویر مستقیم گرفته شده از رقیق سازی اکسیژن با  $N_2$  و با سوخت گاز طبیعی نشان داده شده است. دمای مخلوط ( $N_2+O_2$ ) در هنگام اختلاط با جریان سوخت برابر  $480K$  میباشد. در این حالت نیز رقیق سازی سبب افزایش طول شعله، کاهش میزان درخشندگی و در نهایت برخاستگی و فرار شعله میشود. در حین فرآیند رقیق سازی نیز بتدریج ناحیه آبی رنگ گسترده تر میشود. فرار شعله در  $84$  درصد مولی نیتروژن روی میدهد. در این حالت نیز پیش گرم بشدت میزان برخاستگی را کاهش میدهد ولی زمان آن را به عقب می اندازد؛ یعنی برخاستگی در درصدهای بالاتر رقیق سازی صورت میگیرد.



شکل 9- اثر پیش گرم بر رقیق سازی اکسیژن با  $N_2$  همراه با سوخت گاز طبیعی

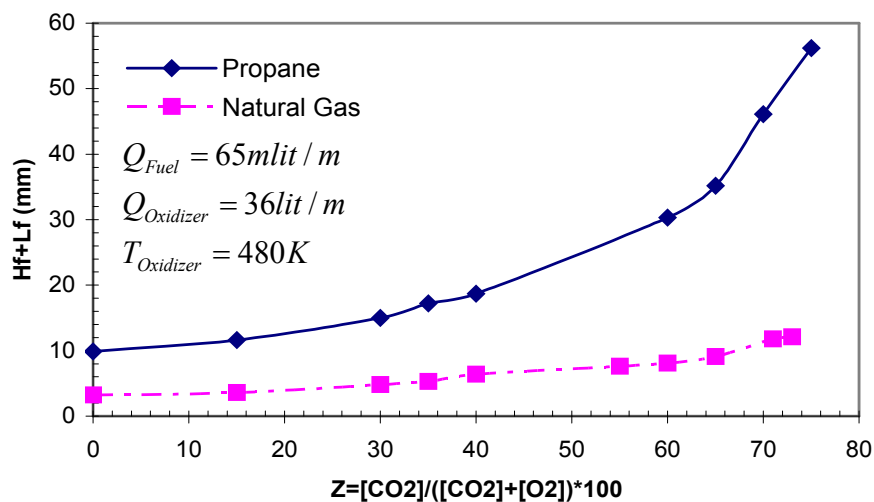
در شکل (10) نیز به مقایسه اثر پیش گرم بر رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن و با سوخت گاز طبیعی با حالت بدون پیش گرم پرداخته شده است. با پیش گرم فرار در  $84$  درصد مولی نیتروژن و بدون پیش گرم فرار در  $79$  درصد مولی صورت میپذیرد.



شکل 10- مقایسه رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن و با سوخت گاز طبیعی در دو حالت پیش گرم اکسیدکننده و بدون پیش گرم

### 3-3- اثر تغییر نوع سوخت روی پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن

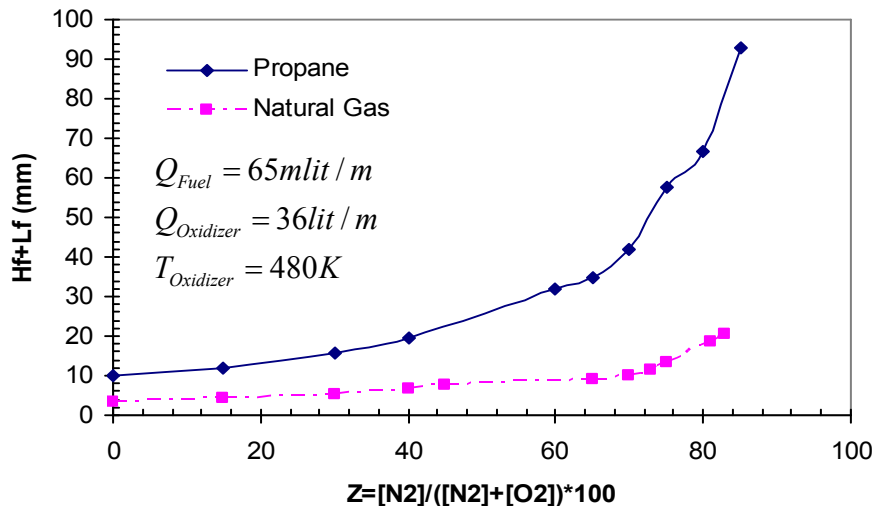
در شکل (11) به مقایسه دو سوخت پروپان و گاز طبیعی در طی آزمایش پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با گاز دی اکسیدکربن پرداخته شده است. همانطور که در شکل زیر دیده میشود؛ شعله های سوخت پروپان بزرگتر بوده و نیز پایدارترند یعنی فرار در درصد بالاتری از رقیق سازی صورت میگیرد. این بخاطر سنگین تر بودن سوخت پروپان نسبت به گاز طبیعی و بیشتر بودن تعداد رادیکالهای کربن در طی فرآیند احتراق است. و نیز 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 زیادتر میکند.



شکل 11- اثر تغییر نوع سوخت روی پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با دی اکسیدکربن

در شکل (12) هم مشابه شکل قبل به بررسی اثر تغییر نوع سوخت روی پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با گاز نیتروژن پرداخته شده است. به علت این که پیش گرم اکسیدکننده روی شعله پروپان اثر بیشتری نسبت به شعله گاز طبیعی دارد. لذا سبب میشود که اختلاف طول شعله پروپان و گاز طبیعی کاهش یابد؛ یعنی اختلاف طول شعله پروپان با گاز طبیعی در حالت پیش گرم کمتر از حالت بدون پیش گرم است.





شکل 12- اثر تغییر نوع سوخت روی پیش گرم و رقیق سازی اکسیدکننده اکسیژن با نیتروژن

#### 4- نتیجه گیری

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

- 1- پیش گرم سبب کاهش طول ناحیه مرئی میشود یعنی واکنش پذیری رادیکالهای اکسیژن با رادیکالهای سوخت را افزایش میدهد، لذا رادیکالهای سوخت برای اختلاط کامل مسافت کمتری را طی میکنند و نتیجه کاهش طول شعله است.
- 2- پیش گرم اکسیدکننده سبب پایداری بیشتر نسبت به فرآیند رقیق سازی میشود و فرار در درصدهای بالاتری از رقیق سازی صورت میپذیرد.
- 3- طول شعله پروپان بسیار بزرگتر از طول شعله گاز طبیعی است. این بعلت سنگینتر بودن سوخت پروپان نسبت به گاز طبیعی است؛ که سبب میشود تعداد رادیکالهای کربن بیشتر باشد و این رادیکالها برای رسیدن به اکسیژن مورد نیاز مسافت بیشتری را طی میکنند و نتیجه طول بزرگتر شعله پروپان است.
- 4- شعله سوخت پروپان نسبت به شعله گاز طبیعی پایداری بیشتری نسبت به فرآیند رقیق سازی اکسیدکننده دارد.
- 5- بعلت آزاد شدن بیشتر حرارت در طی فرآیند احتراق پروپان، ماکزیمم درجه حرارت شعله پروپان نسبت به گاز طبیعی بیشتر است و سبب میشود تا شعله پروپان نسبت به گاز طبیعی درخشنده تر باشد.
- 6- به علت بالاتر رفتن دمای محصولات احتراق در پیش گرم اکسیدکننده، این شعله ها نسبت به حالت بدون پیش گرم درخشنده‌گی بیشتری دارند.
- 7- پیش گرم اکسیدکننده میزان برخاستگی را بشدت کاهش میدهد ولی زمان آن را به عقب می اندازد؛ یعنی برخاستگی در درصد بالاتری از رقیق سازی صورت میپذیرد.
- 8- پیش گرم اکسیدکننده اثر بیشتری روی پروپان نسبت به گاز طبیعی دارد؛ لذا سبب میشود اختلاف طول شعله های پروپان و گاز طبیعی کاهش یابد.

#### مراجع

- 1- Bowman, walters, K., and Bardos, Adela., "Controlled Combustion-an approach for reducing irreversibilities in energy conversion," GCEP Technical Report 2005, <http://gcep.stanford.edu>.
- 2- Ghaderi yeganeh, M., "Effects of preheated combustion air on lminar coflow diffusion flames under normal and microgravity conditions," Phd Thesis in mechanical engineering, Maryland university, 2005.

- 3- Gupta, A., "Flame characteristics and challenges with high temperature air combustion" Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference , July 2000.
- 4- 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.
- 5- Medwell, P.R., Kalt, A.M., 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.
- 6- Konsur, B., Megaridis, C.M., and Griffin, D.W., "Fuel preheat effects on soot-field structure in laminar gas diffusion flames burning in 0-g and 1-g," Combustion and Flame, Vol. 116, pp. 334-347, 1999.
- 7- Seitzman, J., Natarajan, J., and Lieuwen, T., "Laminar flame speeds of H<sub>2</sub>/CO mixtures : Effect of CO<sub>2</sub> dilution, preheat temperature, and pressure," Combustion and Flame, Vol. 151, pp.104-119, 2007.
- 8- 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.