



دانشگاه صنعتی امیر کبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده: مهندسی هوافضا

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته تحصیلی: مهندسی هوافضا (جلوبرندگی)

عنوان

توسعه آزمایشگاه سوخت و احتراق و مطالعه احتراق شعله نفوذی

استاد راهنما

صادق تابع جماعت

دانشجو

امیر مردانی

بسمه تعالی

شماره: .....

تاریخ: .....

معاونت پژوهشی  
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

فرم اطلاعات پایان نامه  
کارشناسی ارشد و دکترا



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

مشخصات دانشجو

نام و نام خانوادگی: امیر مردانی

شماره دانشجویی: ۸۲۱۲۹۵۴۷

رشته تحصیلی: مهندسی هوافضا (جلوبرندگی)

آزاد  بورسیه  معادل

دانشکده مهندسی هوافضا

نام و نام خانوادگی استاد راهنما: صادق تابع جماعت

عنوان به فارسی: توسعه آزمایشگاه سوخت و احتراق و مطالعه احتراق شعله نفوذی

Development of Fuel and Combustion Laboratory and Study  
on Combustion of Diffusion Flame

عنوان به انگلیسی:

نوع پروژه  
کارشناسی ارشد ×  
دکترا

کاربردی  بنیادی  توسعه‌ای  نظری

تعداد واحد: ۶

تاریخ خاتمه: ۸۴/۱۱/۳

تاریخ شروع: ۸۳/۳/۲۵

سازمان تأمین کننده اعتبار:

واژه‌های کلیدی به فارسی: احتراق-شعله نفوذی-گاز طبیعی-تجربی - آرام

Combustion – Diffusion Flame –

واژه‌های کلیدی به انگلیسی:

Experimental-laminar-Natural gas

نظرها و پیشنهادهای به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه:

استاد راهنما: صادق تابع جماعت

دانشجو: امیر مردانی

تاریخ:

امضاء استاد راهنما:

نسخه ۱: معاونت پژوهشی

نسخه ۲: کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان نامه به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

## چکیده:

یکی از انواع شعله، بگونه ایست است که در آن بر خلاف شعله های پیش مخلوط، سوخت و اکسید کننده قبل از رسیدن به محفظه احتراق، مخلوط نمی شوند و بعبارت دیگر اختلاط سوخت و اکسیدکننده در مقایسه با شدت واکنشها کند می باشد. لذا اختلاط، شدت سوختن را کنترل می کند. اغلب سیستم های عملی احتراق در این طبقه بندی قرار می گیرند و اصطلاحاً شعله نفوذی نامیده می شوند. چرا که سوخت و اکسید کننده در یک منطقه واکنش از طریق نفوذ مولکولی و تلاطمی به هم می رسند. این نوع شعله بدلیل کاربردهای صنعتی آن از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و بسیاری از کوره های صنعتی و تجهیزات حرارتی از نوعی شعله نفوذی بهره می گیرند. لذا کنترل پارامترهای شعله نفوذی نظیر میزان تولید  $NO_x$ ، طول شعله، پایداری آن، حد Blow Out شعله، میزان برخاستگی آن و ... مهم و مورد توجه می باشد. در همین راستا از اهمیتهای مختلفی نظیر سرعت جریان، رقیق سازی، پیش گرم کردن، هندسه مشعل، فشار و گرانش می توان جهت کنترل شعله بهره جست. از پرکاربردترین این موارد رقیق سازی و پیش گرم کردن می باشد. پیش گرم کردن اکسید کننده موجب ایجاد شعله پایدار در محدوده نسبت اختلاط های مختلف شده و در شعله حاصل توزیع دما یکنواختتر، منطقه واکنش وسیعتر و لذا راندمان احتراقی بالاتر است. هر چند پیش گرم کردن خود به تنهایی موجب افزایش دمای محصولات احتراق و در نتیجه افزایش تولید  $NO_x$  حرارتی و مشکلات اجرایی در کوره ها خواهد شد ولی این اثر توسط رقیق سازی جبران می شود و در نهایت با پیش گرم کردن و رقیق سازی همزمان هوا به نتایج مطلوبی بدست خواهد آمد.

لذا با توجه به اهمیت و کاربرد گسترده شعله نفوذی و اهمیتی که سوخت گاز طبیعی دارد، در تحقیق جاری با راه اندازی یک مناسب بررسی شعله نفوذی coflow گاز طبیعی مورد توجه قرار گرفته است و با انجام آزمایشات گوناگون اثرات سرعت خروجی سوخت و هوا، رقیق سازی هوا و اکسیژن با  $CO_2$  و  $N_2$  و اثرات پیش گرم کردن اکسید کننده بر شعله در حالات مختلف سرعت و رقیق سازی مطالعه و به مقایسه نتایج در حالات مختلف پرداخته شده است. همچنین توسط نرم افزار fluent مدل سازی عددی آزمایشات صورت گرفته و نتایج تجربی و عددی مقایسه شده است. در طول آزمایشات پدیده های جالبی از جمله تغییر رژیمهایی در شعله مشاهده شد که روند تحقیقات را بسمت خود معطوف نمود.

## ۱-۱- مقدمه

احتراق عبارت است از ترکیب شیمیایی سوخت و اکسید کننده و تشکیل محصولات و بسته به نحوه اختلاط و بهم رسیدن سوخت و اکسید کننده، شعله تشکیل شده را می توان به دو نوع:

- شعله پیش مخلوط

- نفوذی (دیفیوژن)

تقسیم نمود .

در شعله های پیش مخلوط، سوخت و اکسید کننده قبل از رسیدن به محفظه احتراق، مخلوط می شوند یا اینکه اختلاط در مقایسه با واکنش های شیمیایی با سرعت زیادی صورت می گیرد. این نوع واکنش ها را می توان بر حسب تحول های همگن تحلیل نمود. اما سیستم هایی نیز وجود دارند که در آنها اختلاط در مقایسه با شدت واکنش ها کند می باشد لذا اختلاط، شدت سوختن را کنترل می کند. اغلب سیستم های عملی احتراق در این طبقه بندی قرار می گیرند و اصطلاحاً

شعله نفوذی نامیده می شوند. چرا که سوخت و اکسید کننده در یک منطقه واکنش از طریق نفوذ مولکولی و تلاطمی به هم می رسند.

مشخصه بارز شعله نفوذی در این است که شدت سوختن توسط شدتی که در آن سوخت و اکسید کننده با نسبت های مناسبی برای واکنش بهم دیگر می رسند، تعیین می گردد و ممکن است سوخت به صورت جت سوخت گاز یا فاز کندانسه شده (مایع یا جامد) باشد.

بررسی فراگیر شعله های نفوذی بسیار دشوار است زیرا در آنها مانند شعله های پیش آمیخته، پارامترهایی مانند سرعت شعله که به آسانی قابل اندازه گیری هستند، وجود ندارد. حتی مفاهیمی چون قدرت مخلوط چندان معنایی علمی ندارد. با این وجود این شعله ها هم از دید پژوهشی و هم از لحاظ کاربردی و تجاری حائز اهمیت می باشند.

شعله های دیفیوژن را می توان بسته به حالت سوخت به دو صورت:

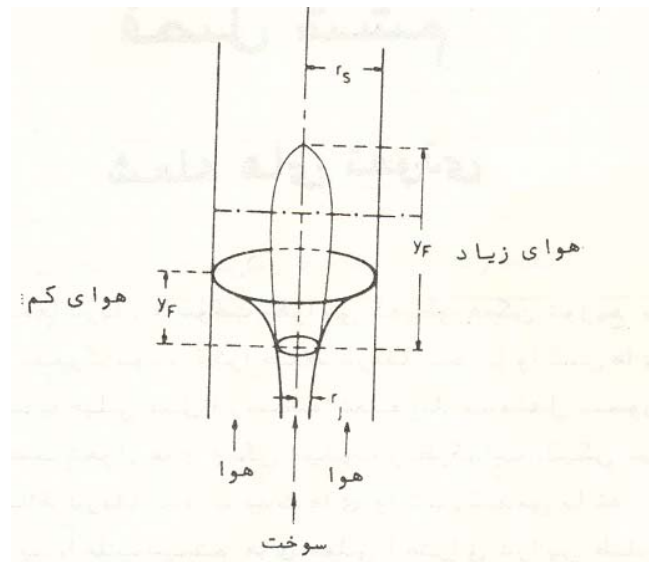
- سوختن جت گاز

- سوختن فاز کندانسه

تقسیم کرد، که در این تحقیق به بررسی سوختن جت گاز پرداخته شده است.

### سوختن جت گاز

اگر جت سوخت گازی را به درون اکسید کننده مثلاً هوا بیاشیم، بسته به میزان اکسید کننده در دسترس، شکل ظاهری شعله متفاوت خواهد شد، اگر اکسید کننده اضافی در دسترس باشد، (مثلاً اگر سوخت به داخل حجم بزرگی از هوای ساکن وارد شود یا وقتی که دو جت هم محور مورد استفاده قرار می گیرند و جت داخلی شامل سوخت و جت بیرونی دارای اکسید کننده باشد) در این حالت، شعله دارای شکل بسته و درازی خواهد بود و در صورتی که میزان اکسید کننده کافی در دسترس نباشد، شعله شکل پروانه ای به خود خواهد گرفت. شکل (۱)



شکل (۱) - شکل ظاهری شعله های جت سوخت گازی

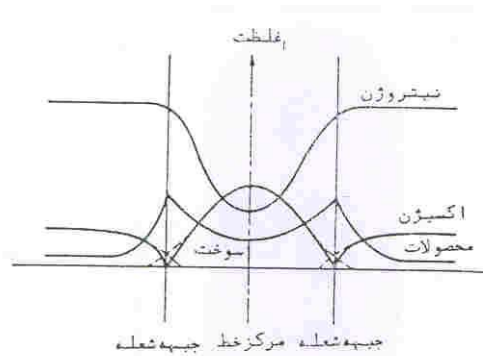
در شعله نفوذی برخلاف شعله های پیش آمیخته، منطقه واکنش به سطح مرزی بین دو گاز محدود می شود و لذا حتی در سرعت های بسیار کم نیز شعله ای پایدار و برگشت ناپذیر خواهیم داشت، اگر چه در این جا نیز مثل حالت شعله پیش مخلوط، نواحی پایداری متفاوتی را می توان تعریف کرد، ولی نقش مشعل در پایداری شعله بسیار کم رنگ می باشد و لذا شعله های متنوعی را می توان روی مشعل پایدار ساخت.

در منطقه واکنش، ترکیب گازها تغییرات زیادی دارد که ناشی از اثر نفوذ بین واکنش دهنده ها و محصولات می باشد. نحوه تغییرات و توزیع گونه ها، توسط هاتل<sup>۱</sup> و هاوثرنز<sup>۲</sup> (۱۹۴۹) مورد بررسی قرار گرفته است. [1]

ایشان توزیع شعاعی گونه ها را در داخل شعله نفوذی بسته هیدروژن- هوا اندازه گیری کردند که نتایج در نمودار شکل (۲) آورده شده است. در جبهه شعله غلظت سوخت و اکسید کننده مینیمم بوده و در حالیکه غلظت محصولات احتراق ماکزیمم می باشد. این شرایط در اثر نفوذ به وجود می آید.

<sup>1</sup> Hottel

<sup>2</sup> Hawthornes



شکل (۲) - تغییر گونه ها در یک شعله نفوذی در ارتفاع ثابتی در بالای لوله جت سوخت

درک این مطلب خیلی مهم است که نفوذ، سرعت متوسط جرمی<sup>۱</sup> در جهت (X یا r) برقرار می کند. به طرف بیرون از جبهه شعله، محصولات احتراق به سمت خارج جریان پیدا کرده و اکسیژن و مقدار کمی گاز ازت بداخل آن جریان می یابند. معمولاً در حالت دائمی جرم کلی محصولات بزرگتر از مجموع جرم های دوتای دیگر می باشد.

بنابراین سرعت متوسط جرمی که شخص آنرا مشاهده می نماید از جبهه شعله به سمت بیرون حرکت می کند. در این صورت سرعت اکسیژن که از نفوذ ناشی می شود و گرادیان غلظت اکسیژن بین جریان بیرونی و جبهه شعله در جهت مقابل سرعت متوسط جرمی قرار می گیرند. البته بین خط مرکز و جبهه شعله، سرعت متوسط جرمی باید از خط مرکز به بیرون جریان پیدا بکند. در خط مرکز چاه وجود ندارد. در حالت دائمی در خط مرکزی، غلظت محصولات، به یک مقدار حالت دائمی می رسد. این مقدار در نتیجه نفوذ محصولات بداخل و مقداریکه در اثر سرعت متوسط جرمی به بیرون انتقال داده می شود برقرار می گردد.

چون از بین رفتن کلی سوخت در جبهه شعله می تواند شدت های واکنش بی نهایتی را نشان می دهد، بنابراین به احتمال زیاد نمایی از توزیع شعاعی بایستی مانند خطوط خط چین نشان داده شده در شکل (۲) باشد. این خطوط ضخامت شعله را زیادتر از حد معمول نشان می دهند. البته حتی با شدت های معینی، منطقه شعله باریک می باشد. نتایج تجربی هاتل<sup>۲</sup> وهاوثرن<sup>۳</sup>

<sup>1</sup> bulk velocity

<sup>2</sup> Hottel

<sup>3</sup> Hawthornes

و سایرین نشان می دهند که در شعله های نفوذی سوخت و اکسید کننده بسوی یکدیگر با شدتهائی که متناسب با نسبت استوکیومتریک می باشد نفوذ پیدا می کنند. چون جبهه شعله چاهی برای سوخت و اکسید کننده می باشد لذا شخص باید چنین مشاهده پراهمیتی را انتظار داشته و درک نماید.

مشخصه شعله های نفوذی، به چگونگی جریان گاز بستگی دارد که بیشتر با عدد رینولدز نشان داده می شود. در مورد جریانهای آشفته یک نکته دیدنی به چشم می خورد. عدد رینولدز با وارونه گرانروی جنبشی<sup>۱</sup> متناسب است و در ناحیه احتراق، اندازه این پارامتر، افزایش هنگفتی می یابد. پس، جریان آشفته درون لوله مشعل، که عدد رینولدز بالایی دارد، در روی سطح شعله، به یک جریان لایه ای تبدیل می شود و یک شعله دراز و استوانه ای با جریان لایه ای پدید می آید. از این رو آمیختگی گازها بیشتر از راه پخش مولکولی صورت می پذیرد تا در اثر مکش آشفته؛ بنابراین باید معیار را بر اساس چگونگی جریان در جایی در نظر گرفت که مرز شعله پدید می آید.

### ۱-۲- تجزیه و تحلیل پدیده ای احتراق جت سوخت

در حقیقت با بکار بردن استدلال پدیده ای ساده و در مورد سوختن جت آزاد سوخت ، اطلاعات زیادی را می توان جمع آوری کرد. فرض اساسی که بعمل آمده، این است که تحول احتراق، تاثیری در شدت اختلاط بین جت سوخت و اکسید کننده اطراف آن ندارد و به محض اینکه اکسیدکننده با سوخت مخلوط می شود در آن واکنش صورت می گیرد لذا در مختصات استوانه ای به محض اینکه اکسید کننده از لبه جت به خط مرکز نفوذ پیدا کرد بایستی سوخت بطور کامل سوخته شده باشد. بعبارت دیگر، در این نقطه شعله خاتمه یافته و ارتفاع آن معلوم می شود.

<sup>1</sup> Kinematic viscosity



در این صورت مساله بطور ساده مربوط به اختلاط ورقه ای جتی میشود که بخودی خود می توان با استفاده از روش پدیده ای به آن پرداخت. تئوری سینتیک ساده پیش بینی می کند که در نفوذ مولکولی، تغییر مکان متوسط یک مولکول با رابطه زیر داده می شود:

$$\frac{1}{2} d\bar{X}^2 / dt = D$$

که در آن  $D$  ضریب نفوذ و  $\bar{X}^2$  میانگین مربع تغییر مکان ذرات در یک جهت مشخص در زمان  $t$  می باشد. بنابراین برای برآورد طول شعله، پیشنهاد شده است که این معادله از تئوری سینتیک، بصورت انتگرالی مورد استفاده قرار بگیرد.

$$\xi^2 = 2Dt$$

که در آن  $\xi^2$  مقدار متوسط مربعات تغییر مکان مولکول ها را از نقاطی که در نتیجه نفوذ در زمان  $t$  صورت می گیرد مشخص می نماید، فرض می شود که طول شعله مربوط به حالتی است که در نقطه ای از محور جریان که در آن احتراق کامل است، عمق متوسط رسوخ هوا بداخل سوخت بایستی تقریباً برابر با شعاع ( دقیق تر متناسب با شعاع) لوله مشعل باشد.

بعنوان یک تقریب،  $\xi$  با عمق متوسط رسوخ مشخص می شود، سرعت گاز  $u$  ثابت در نظر گرفته شده لذا زمان  $t$ ، زمان لازم برای تکمیل تحول نفوذ مولکولی زمانی است که در آن المانی از گاز از دهانه مشعل تا نوک شعله جریان پیدا می کند و با رابطه زیر داده می شود:

$$t = y_F / u$$

چون  $\xi = r_j$  است پس

$$y_{F.L} = r_j^2 u / 2D = Q / 2\pi D \quad (1-1)$$

که در آن  $Q$  دبی حجمی می باشد. این نتیجه مهم است زیرا نه تنها پیش بینی می کند که در شعله نفوذی آرام، ارتفاع فقط متناسب با دبی حجمی است، بلکه بهترین جواب را در مورد مساله خیلی مهم جت های متلاطم سوختی ارائه می دهد.

اگر روش بوروک<sup>۱</sup> و اسشومن<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گیرند، روشن می گردد که اجزاء نتیجه پدیده ای نشان داده شده بوسیله معادله (۱) در واقع در نتایج بوروک<sup>۱</sup> و اسشومن<sup>۲</sup> نیز وجود دارند. [2]

در حالت متلاطم استدلال مشابهی می تواند مورد استفاده قرار بگیرد با این تفاوت که بجای نفوذپذیری مولکولی از نفوذ پذیری گردسیال متلاطم  $\varepsilon$  استفاده گردیده و تناسبی شبیه معادله (۱)- بدست می آید.

$$y_{F,T} \sim \pi r_j^2 u / 2\pi\varepsilon \sim r_j^2 u \setminus \varepsilon \quad (1-2)$$

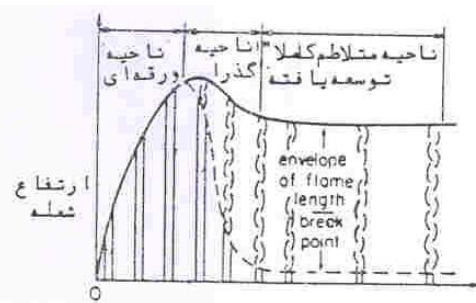
اما  $\varepsilon \sim lu'$  بوده که در آن  $l$  مقیاس تلاطم و متناسب با قطر لوله (یا شعاع لوله) است و  $u'$  شدت تلاطم بوده که تقریباً با میانگین سرعت جریان در محور متناسب است، لذا

$$\varepsilon \sim r_j u \quad (1-3)$$

از ترکیب دو معادله آخری، رابطه زیر بدست می آید:

$$y_{F,T} \sim r_j^2 / r_j \sim r_j \quad (1-4)$$

عبارت فوق نشان می دهد که ارتفاع شعله نفوذی فقط متناسب با شعاع دهانه (یا قطر) است این یک نتیجه گیری عملی مهمی است که به طرق مختلف محرز گردیده است. شکل (۳) تغییرات شکل شعله را بر حسب سرعت جت هم چنانکه بوسیله هاتل<sup>۳</sup> و هاوثرنز<sup>۴</sup> (۱۹۴۹) مشخص شده نشان می دهد. [1]



شکل (۳) - تغییر ویژگی شعله بر حسب تابعی از سرعت جت (Hottel & Hawthorne 1949)

<sup>1</sup> Burke

<sup>2</sup> Schumann

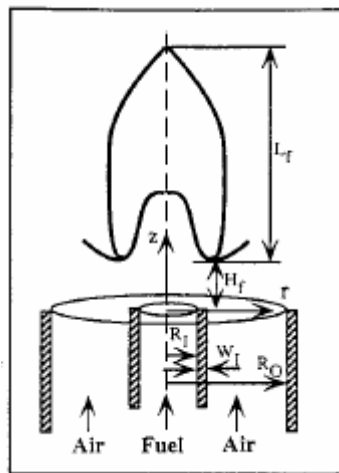
<sup>3</sup> Hottel

<sup>4</sup> Hawthornes

با افزایش سرعت گاز در شیپوره، شعله لایه ای به صورت خطی بلندتر می شود تا اینکه آمیختگی آشفته فرا رسد. این گونه آمیختگی، نخست در نوک شعله پدیدار می شود و با افزایش سرعت گاز پیوسته پایین می آید در این مرحله درازای شعله نیز کاهش می یابد و سطح نمایان آن گسترده تر می شود. سرانجام مرحله ای فرا می رسد که هم بلندی شعله و هم موضع گذار در شعله، که نقطه شکست نام دارد، ثابت می ماند و با افزایش بیشتر سرعت گاز، تغییر نمی کنند. در شکل (۳) این مراحل گوناگون نمایش داده شده اند.

ویکزورک<sup>۱</sup> [3] نیز در مقاله ای در سال ۲۰۰۴ روشی را جهت اندازه گیری طول شعله در مواردی که امکان عکس برداری وجود ندارد، ارائه نموده که جالب است ولی به علت فقدان گزارشات آزمایشگاهی حرفه ای چندان معمول نیست.

پدیده جالب دیگر، در شعله های نفوذی میزان برخاستگی<sup>۲</sup> شعله می باشد که در شکل (۴) با پارامتر  $H_f$  نمایش داده شده است.



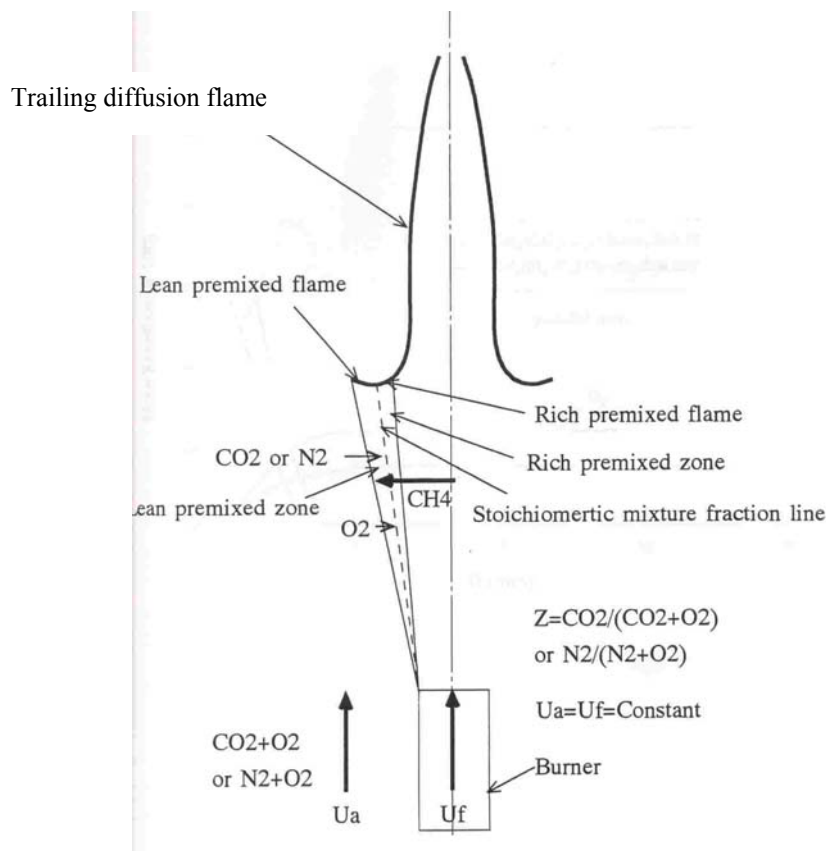
شکل (۴) - برخاستگی شعله

بلند شدن شعله از روی مشعل از تاخیر در به وجود آمدن مخلوط استوکیومتری ناشی می شود. این تأخیر نیز به دو صورت ممکن است بوجود آید:

<sup>1</sup> Wieczork  
<sup>2</sup> lift

۱- افزایش  $Re$  جریانهای ورودی سوخت و اکسید کننده: در این حالت زمان حضور گاز<sup>۱</sup> کاهش می یابد و در نتیجه زمان نفوذ جرم کم شده و زمان لازم برای کامل شدن اختلاط افزایش می یابد در نتیجه در ارتفاع بالاتری مخلوط استوکیومتری تشکیل می شود.

۲- رقیق سازی اکسید کننده یا سوخت: رقیق سازی موجب می شود میزان تمرکز مولکولی<sup>۲</sup> اکسیژن یا سوخت پایین آید و لذا برای ایجاد مخلوط استوکیومتری به زمان بیشتری نیاز خواهد بود و در نتیجه، مخلوط استوکیومتری در ارتفاع بالاتری تشکیل می شود. در شکل (۵) این پدیده مشهود است.



شکل (۵) - نحوه اثر رقیق سازی در برخاستگی

<sup>1</sup> residence time

<sup>2</sup> Concentration

### ۱-۳- پارامترهای موثر در شعله دیفیوژن

تاکنون شعله دیفیوژن از دیدگاههای متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته است. بعنوان مثال میشل<sup>۱</sup> و همکارانش [4] در سال ۱۹۷۸ شعله دیفیوژن متان و هوا را بمنظور بدست آوردن توزیع دما و سرعت در شعله و مشاهده اثرات پیش گرم کردن و قطر نازل ورودی سوخت بصورت تجربی و عددی مطالعه نمودند. با نگرش به برخی از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، اثر برخی از پارامترهایی که جالب به نظر می رسیده در شعله دیفیوژن بررسی شده است. برخی از این پارامترها عبارتند از:

- ترکیب مواد اولیه و رقیق سازی

- دمای اولیه گازهای ورودی

- فشار

- اثر جاذبه

- شکل محفظه و اثرات سرعت

که در ادامه به بررسی این پارامترها پرداخته شده است.

### ۱-۳-۱- ترکیب مواد اولیه و رقیق سازی

تأثیر رقیق سازی سوخت و یا اکسید کننده و تغییر نسبت سوخت به اکسید کننده بر شعله غیر قابل اغماض و در دمای شعله، شکل و میزان برخاستگی<sup>۲</sup> و در نتیجه میزان آلاینده‌گی و پایداری آن، حائز اهمیت می باشد و می توان به عنوان ابزار قدرتمندی در جهت کنترل دلخواه شعله مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه به ارائه نتایج برخی از تحقیقات انجام شده خواهیم پرداخت. طی بررسی که جیانگ مینگ<sup>۳</sup> و همکارانش [5] روی شعله Co-flow آرام متان انجام داده اند مشاهده

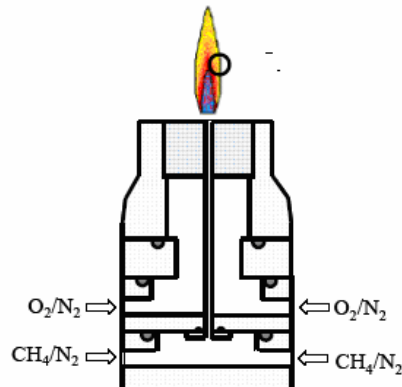
<sup>1</sup> Mitchell

<sup>2</sup> lift

<sup>3</sup> jiongming

شد که در صورتی که اکسیژن ورودی را با  $N_2$  یا  $CO_2$  رقیق کنیم، شعله در حدود  $N_2$  ۸۳٪ و یا  $CO_2$  ۷۲٪ برخاستگی<sup>۱</sup> پیدا می کند و در حدود  $N_2$  ۸۶٪ و یا  $CO_2$  ۷۸٪، فرار شعله<sup>۱</sup> را خواهیم داشت، همچنین با رقیق سازی بیشتر، طول شعله کاهش و میزان برخاستگی<sup>۱</sup> افزایش می یابد و اثر  $CO_2$  روی پایداری و ساختار شعله بیشتر از  $N_2$  است چون  $CO_2$  ظرفیت گرمایی و نرخ انتقال<sup>۲</sup> بالاتری نسبت به  $N_2$  دارد.

آقایان پیتز<sup>۳</sup> و اسموکه<sup>۴</sup> و همکارانشان [6] سه نمونه رقیق سازی را مورد مطالعه قرار دادند. در شکل (۶) مشعل مورد استفاده و در شکل (۷) نمونه های آزمایش آورده شده است.



شکل (۶) - مشعل مورد استفاده در آزمایش پیتز

Flame	Jet	$r$ (cm)	Composition	Velocity (cm/s)
A	Fuel	0.2	65% $CH_4$ / 35% $N_2$	$V_{max}=76.0$
	Oxidizer	2.5	21% $O_2$ / 79% $N_2$	$V_{avg}=35.6$
B	Fuel	0.2	20% $CH_4$ / 80% $N_2$	$V_{max}=144.8$
	Oxidizer	2.5	100% $O_2$	$V_{avg}=50.1$
C	Fuel	0.2	65% $CH_4$ / 35% $N_2$	$V_{max}=140.9$
	Oxidizer	2.5	100% $O_2$	$V_{avg}=50.1$

شکل (۷) - نمونه های مورد آزمایش پیتز و همکارانش

مشاهده شده، شعله های C(2900k), B(2400k) بسیار کوتاهند و نورانی تر و قوی تر از شعله A می باشند. در شعله A برخاستگی<sup>۱</sup> هم مشاهده شد و تولید NO در نمونه C, B بالاتر می باشد همچنین میزان تشعشع حرارتی در نمونه های C, B بسیار بالاتر از نمونه A می باشد.

<sup>1</sup> blow out

<sup>2</sup> Transport Rate

<sup>3</sup> Pitz

<sup>4</sup> Smooke

در آزمایش دیگری که توسط نیل سالیوان<sup>۲</sup> و همکارانش [7] در دانشگاه برکلی صورت گرفت شعله دیفیوژن Coflow آرام متان و هوا، در نظر گرفته شد و سپس متان را با آمونیاک ( $NH_3$ ) رقیق نموده و مشاهده شد که میزان  $NO_2$  تولیدی تا ۵۰٪ در حالت استفاده محدود از آمونیاک و تا ۳۰٪ در حالت استفاده زیاد از ( $NH_3$ ) کاهش می یابد.

اثر رقیق سازی سوخت در پایداری شعله توسط پرساد<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۱ بررسی شد، [8]. نتایج حاکی از این است که در جریان coflow با دمای پائین هوا، افزایش غلظت نیتروژن جهت رقیق سازی هوا باعث کاهش طول جدایش شعله می گردد.

### ۱-۳-۲-دمای اولیه گازهای ورودی

یکی دیگر از روشهایی که جهت کنترل شعله مورد توجه قرار گرفته است، بحث پیش گرم کردن گازهای ورودی می باشد. بسته به دمای گازهای ورودی، تأثیر افزایش دما تحت دو عنوان پیش گرم جریانهای گازی ورودی یا HTAC<sup>۴</sup> بررسی می شود. همانگونه که در شکل (۸) مشاهده می شود، [9]. پیش گرم کردن هوا موجب می شود در محدوده نسبت اختلاط های مختلف شعله پایدار داشته باشیم. با پیش گرم کردن اکسیدکننده با پدیده جدیدی از احتراق روبرو خواهیم شد و شعله ای خواهیم داشت که در آن توزیع دما یکنواختتر، منطقه واکنش وسیعتر و لذا راندمان احتراقی بالاتر است.

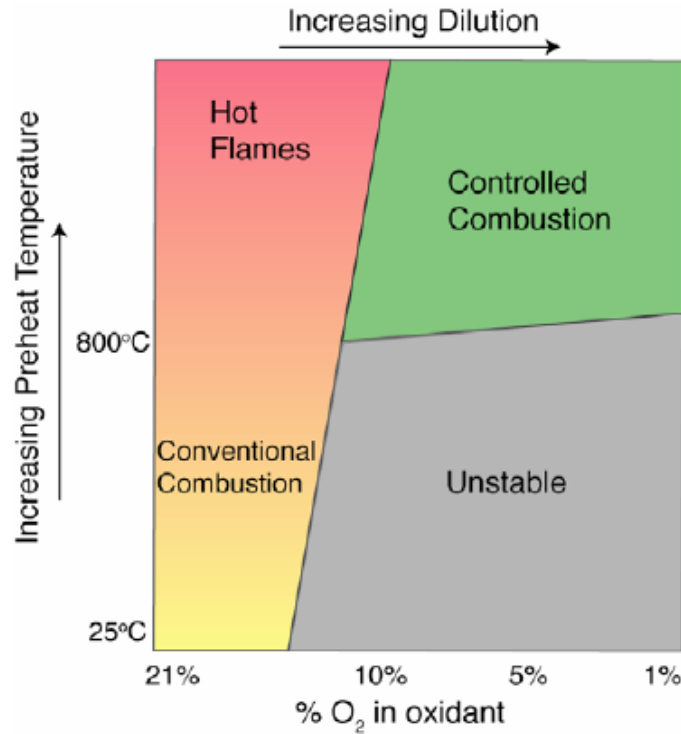
هر چند پیش گرم کردن خود به تنهایی موجب افزایش دمای محصولات احتراق و در نتیجه افزایش تولید  $NO_x$  حرارتی و مشکلات اجرایی در کوره ها خواهد شد ولی این اثر توسط رقیق سازی جبران می شود و در نهایت با پیش گرم کردن و رقیق سازی همزمان هوا به نتایج مطلوبی خواهیم رسید. در همین زمینه تحقیقات زیادی توسط پژوهشگران صورت گرفته است.

<sup>1</sup> lift

<sup>2</sup> Neal Sullivan

<sup>3</sup> Prasad

<sup>4</sup> High Temperature Air Combustion



شکل (۸) - رژیمهای احتراقی گاز طبیعی با تغییر اکسیژن و دمای پیش گرم

در حالت پیش گرم: دمای گازها تا حدود  $400 - 500$  k بالاتر برده می شود. و در حالت

HTAC<sup>۱</sup> دما را در حدود  $1000$  k و بیشتر بالا می برند.

در نتایجی که مور<sup>۲</sup> و همکارانش [10] ارائه نموده اند مشاهده شد که در یک نسبت (اکسیدکننده/سوخت)<sup>۳</sup> ثابت با افزایش دما، سرعت افزایش و در نتیجه اختلاط سخت تر صورت می گیرد و برخاستگی<sup>۴</sup> افزایش می یابد. در شکل‌های (۹)، (۱۰)، (۱۱)، (۱۲) نتایج ایشان آورده شده است.

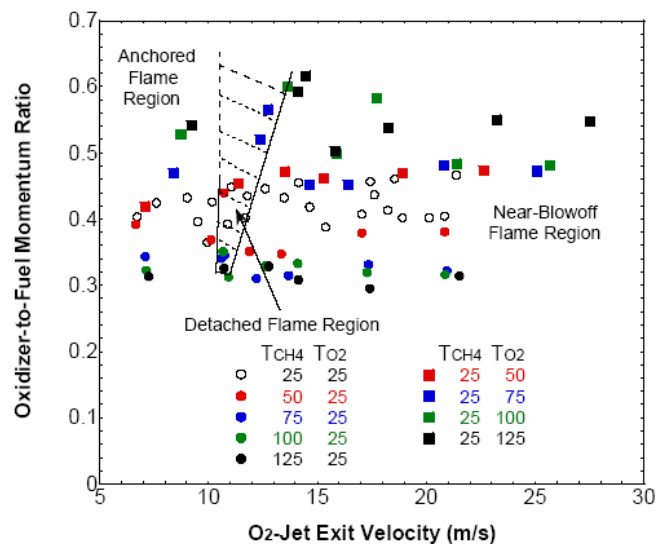
<sup>۱</sup> High Temperature Air Combustion

<sup>۲</sup> Moore

<sup>۳</sup> Fuel/Oxidizer

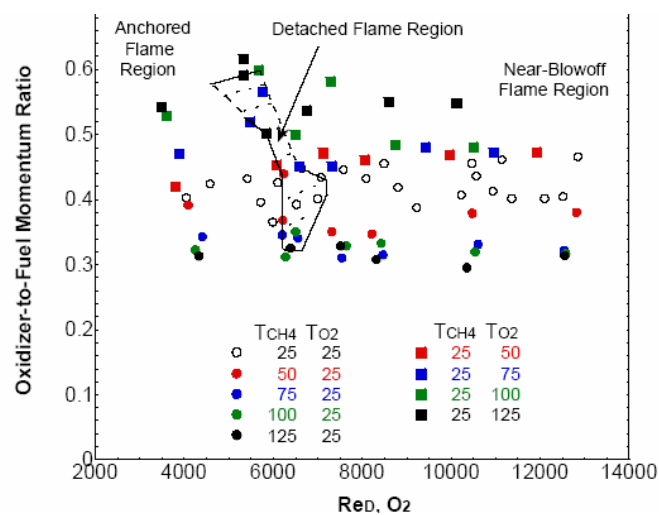
<sup>۴</sup> lift





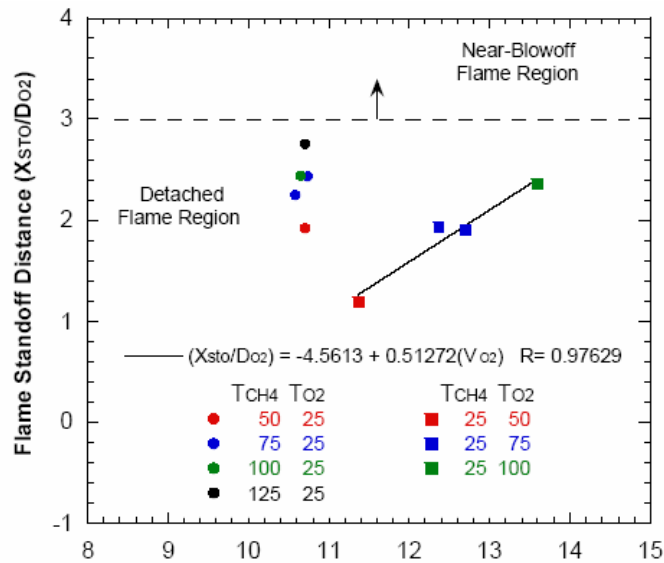
شکل (۹)- بررسی اثر دمای گازهای ورودی در تغییر نسبت مومنتوم سوخت به مومنتوم

اکسیدکننده در سرعت‌های مختلف اکسید کننده در نسبت جرمی O/f ثابت ۱,۳



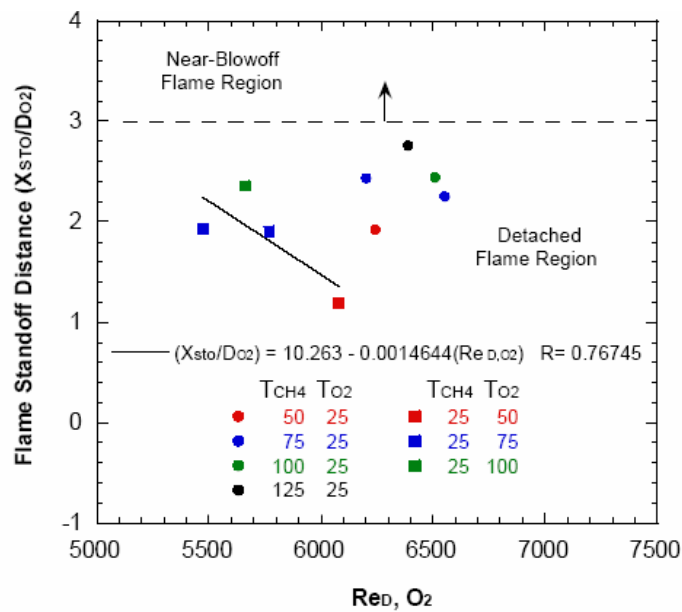
شکل (۱۰)- بررسی اثر دمای گازهای ورودی در تغییر نسبت مومنتوم سوخت به مومنتوم

اکسیدکننده در Re مختلف اکسید کننده در نسبت جرمی O/f ثابت ۱,۳



شکل (۱۱)- بررسی اثر دمای گازهای ورودی و سرعت اکسید کننده درمیزان برخاستگی شعله

(در نسبت جرمی O/f ثابت ۱,۳)



شکل (۱۲)- بررسی اثر دمای گازهای ورودی و Re اکسید کننده درمیزان برخاستگی شعله (در

نسبت جرمی O/f ثابت ۱,۳)

آترگا<sup>۱</sup> و همکارش [11] افزایش راندمان احتراق و کاهش تولید آلاینده‌ها را در کوره ذوب فلزات و شیشه بوسیلهٔ پیش گرم و تغلیظ هوا با اکسیژن را مطالعه نموده اند. بومن<sup>۲</sup> و همکارانش [9] نیز به بررسی راهکارهای کنترل احتراق از جمله پیش گرم کردن و رقیق سازی پرداخته اند.

<sup>1</sup> Atrega

<sup>2</sup> Bowman

یانگ<sup>۱</sup> و همکارانش [12] به بررسی عددی اثرات دمای جت سوخت پروپان و در تحقیقی دیگر یانگ<sup>۱</sup> و همکارانش [13] به مدلسازی تولید NO در پیش گرم زیاد پرداخته‌اند. کونسور<sup>۲</sup> و همکارانش [14] تاثیر پیش گرم سوخت در تولید دوده و اثرات رقیق سازی و جاذبه را مطالعه نموده‌اند. لازم است در رابطه با اهمیت احتراق با دمای بالای هوا ( HTAC ) و کارهائی که تاکنون صورت گرفته توضیح مختصری ارائه شود. سپس به بررسی نتایج حاصل از آزمایش Simon Lille و همکارانش [۶] پرداخته شده است.

راندمان احتراق دمای بالا ( HTAC ) به راندمان مبدل حرارتی و روشی که تحت آن سوخت با گازهای کوره مخلوط می شود بستگی دارد .

استفاده از HTAC در کوره های تجاری اولین بار توسط یاسودا<sup>۳</sup> و همکارانش ( ۲۰۰۰ ) گزارش شد . تحقیقات پایه در این روش احتراق همچنان در حال انجام است . آزمایشات بسیار مفیدی در ژاپن انجام شده که منجر به ایده های جدیدی در کاربرد HTAC شده است . [8]

برخی از پدیده ها ، مثلا کاهش NO<sub>x</sub> ، مسطح بودن پروفیل دمایی شعله ، درخشندگی کمتر شعله ، پایداری بالاتر شعله و حجم بزرگتر آن توسط هاسگوا<sup>۴</sup> در سال ( ۱۹۹۷-۲۰۰۰ ) ارائه شده است . [8],[15]

گوپتا<sup>۵</sup> در سال ۱۹۹۷ ساختار کاملاً متفاوتی از شعله پروپان بدست آورد . در این آزمایش هوا توسط یک گاز خنثی رقیق شده بود، [8]. و در تحقیقی دیگر گوپتا<sup>۵</sup> [16] اثر پیش گرم و رقیق سازی هوا برای شعله نفوذی متان ، پروپان ، هیدروژن و استیلن را مطالعه نموده است. کیشیموتو<sup>۶</sup> و همکارانش ( ۱۹۹۷ ) تاخیر در احتراق شعله گاز طبیعی را گزارش کردند . [8] نویسندگان این مقاله همچنین اثر کاهش طول جدایش شعله ضمن افزایش دمای هوای پیش گرم را بیان کردند.

---

<sup>1</sup> yang

<sup>2</sup> Kinsur

<sup>3</sup> Yasuda

<sup>4</sup> Hasegawa

<sup>5</sup> Gupta

<sup>6</sup> Kishimoto

بولز<sup>۱</sup> و گوپتا<sup>۲</sup> (۱۹۹۸) و در سال (۱۹۹۹) کاهش تاخیر در شعله وری سوخت با افزایش دمای گاز پیش گرم را به عنوان نتیجه تحقیقات خود گزارش دادند. [8]

کیتاگاو<sup>۳</sup> و همکارانش در سال (۱۹۹۸) بیان کرد که لرزش های شعله را می توان با استفاده از هوای گرم به عنوان اکسید کننده کاهش داد، [8]. نتایج مشابه توسط گروه کونیشا<sup>۴</sup> (۲۰۰۰) بدست آمد، [8]. فوجی موری<sup>۵</sup> در سال ۱۹۹۸ مشاهده کرد که در شعله متان طول جدایش شعله با دمای هوا و نسبت جرمی سوخت جت تغییر می کند. [8].

گروه لیل<sup>۶</sup> (۲۰۰۰) [8] از عکس برداری سریع، مستقیم و نمایش رنگی شیلیرین جهت برداشت تصاویر شعله HTAC پروپان در شرایط پایداری استفاده کرد. اندازه شعله، مرئی بودن آن، رنگ، فاصله جدایش و ساختار جریان توسط این گروه ارزیابی و اندازه گیری شده و هوای پیش گرم شده ای که با نیتروژن رقیق شده است به عنوان اکسید کننده مورد استفاده قرار گرفته است. اثر حضور متان رقیق شده با نیتروژن و اثر سرعت سوخت در مرئی بودن شعله و مقدار غلظت NO و CO در گازهای حاصل از احتراق توسط بلازیاک<sup>۷</sup> (۲۰۰۱) بررسی شد، [8]. متان رقیق شده با نیتروژن بصورت عمودی به جریان پیوسته هوای پیش گرم شده (۹۶۰ درجه سانتیگراد) که با نیتروژن رقیق گردیده، تزریق می گردد. اضافه کردن نیتروژن به متان و افزایش سرعت تزریق سوخت باعث کمتر شدن درخشندگی شعله، کاهش مرئی بودن آن و افزایش ارتفاع جدایش شعله می گردد. به ازای سرعت به قدر کافی بالا، سوختن شعله نا مرئی می گردد.

در یک سری آزمایشاتی که در KTH<sup>۸</sup> در کشور سوئد صورت گرفت از گاز Gasol که جنبه صنعتی دارد بجای متان استفاده شد. ترکیب گاز Gasol، ۹۵٪ پروپان و ۵٪ بوتان می باشد، [8].

---

<sup>1</sup> Bolz

<sup>2</sup> Gupta

<sup>3</sup> Kitagawa

<sup>4</sup> Konisha.et.al

<sup>5</sup> Fujimori

<sup>6</sup> Lille .et.al

<sup>7</sup> Blasiak

<sup>8</sup> Royal Institute of Technology