

مطالعه‌ی تجربی اثر پیشگرم سازی و رقیق سازی در شعله پیچشی کروسین

امیر مردانی^{۱*}، صادق آرازی کلات^۲، امیرحسین عظیمی^۳

۱- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، amardani@sharif.edu

۲- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، sadegh.arazi@sharif.edu

۳- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، amirhossein.azimi@alum.sharif.edu

* نویسنده مخاطب

چکیده

در این پژوهش به مطالعه اثرات استفاده از پیچش هوای جانبی بر احتراق سوخت سنگین کروسین در شرایط پیش گرم سازی و رقیق سازی هوای جانبی پرداخته شده است. بررسی عوامل تاثیرگذار بر ساختار شعله هم چون دمای پیش گرم سازی، میزان رقیق سازی، عدد پیچش، دبی هوای جانبی و نیز نوع افشانه مورد استفاده، در آزمونگر احتراق مایلد دانشگاه شریف ارتقاء یافته مطالعه گردید. این آزمونگر به شکل متقارن محوری بوده و امکان تامین هوای جانبی با دما، میزان پیچش و میزان رقیق سازی مورد نظر را برای یک مشعل اسپری سوخت مایع فراهم می سازد. در مطالعه صورت گرفته به وسیله عکس برداری مستقیم و نیز بررسی نورتایی شیمیایی ساختار شعله بررسی گردید. پنج ساختار شعله برای حالت بدون رقیق سازی ارائه مشاهده شد. نتایج حاکی از آن است که با پیچش هوا محدود شده پایداری بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می یابد. همچنین در میزان رقیق سازی ۱۵ درصد محتوا اکسیژن و میزان پیش گرم سازی تا ۲۵۰ درجه سانتی گراد و عدد چرخش ۰.۸ ناحیه احتراقی مشابهت‌های بسیاری با شرایط احتراق در رژیم احتراقی مایلد را داشته که از این رو به نظر می رسد به رژیم احتراقی مایلد دست یافته باشیم.

کلمات کلیدی: پیچش هوای جانبی، احتراق اسپری، پیشگرم سازی، رقیق سازی، احتراق مایلد.

مقدمه

در استفاده از سیستم‌های احتراقی یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای افزایش راندمان احتراق و نیز استخراج بهینه‌تر انرژی نهفته در سوخت استفاده از پیش گرم سازی هوای جانبی منتهی به محفظه احتراق می باشد. از روش‌های مختلفی میتوان برای ایجاد پیش گرم سازی استفاده نمود. یک نمونه از روش‌های موجود استفاده از یک منبع حرارتی در مسیر هوای جانبی به محفظه احتراق به منظور پیش گرم سازی هوای جانبی می باشد. روش دیگر برای ایجاد پیش گرم سازی بازگرداندن بخشی هوای خروجی محفظه احتراق به ورودی آن می باشد و یا به شکلی دیگر می توان با استفاده از مبدل حرارتی حرارت محصولات احتراق را به هوای ورودی به محفظه منتقل نمود. در بین روش‌های نامبرده شده در صورت بهره‌گیری از حرارت موجود در محصولات احتراق و بازیابی آنها روش استفاده شده مقرون به صرفه‌تر نیز می باشد.

از دیگر مزایای ایجاد پیش گرم سازی در سامانه‌های احتراقی کاهش انتشار هیدروکربنهای نسوخته است [۱]. استفاده از این روش می تواند تا حد زیادی سبب صرفه جویی در مصرف سوخت گردد که به عنوان مثال در یکی از منابع از تاثیر پیش گرم سازی بر مصرف سوخت، صرفه جویی تا ۵۰ درصد در مصرف سوخت گزارش شده. همچنین از دیگر مزایای پیش گرم سازی جریان هوا کاهش تاخیر در اشتعال سوخت می باشد [۲].

با استفاده از پیش گرم سازی هوای جانبی تولید گونه‌های آلاینده کاهش می یابد. تغییرات غلظت این گونه‌ها با تغییر میزان پیش گرم سازی برای غلظت‌های متفاوت اکسیژن هوای توسط گوپتا و همکاران [۲] برای یک کوره آزمایشگاهی گزارش شده است. با افزایش پیش گرم سازی بالاتر از

دمای خود اشتعالی سوخت نیز با اعمال شرایط مناسب دیگر که در ادامه بررسی خواهد شد می توان به رژیم‌های احتراقی جدیدی همچون رژیم احتراقی مایلد دست یافت.

در سیستم‌های احتراقی معمول از هوای اتمسفر به عنوان ترکیب شامل اکسیدکننده استفاده می شود. ترکیبات موجود در هوای اتمسفر شامل ۷۸ درصد گاز نیتروژن و ۲۱ درصد اکسیژن می باشد. که در این صورت محتوای ۲۱ درصد اکسیژن ترکیبات ورودی وارد واکنش با سوخت می گردد. در شرایط خاص می توان با استفاده از یک مشعل مجزا پیش از مشعل اصلی و یا با استفاده از بازگرداندن محصولات احتراق به ورودی هوای محفظه که طبیعتاً دارای اکسیژن کمتری می باشد غلظت اکسیژن را کاهش داد. کاهش میزان اکسیژن به روش‌های گفته شده به دلیل داغی محصولات احتراق معمولاً همراه با پیش گرم سازی هوای ورودی نیز می باشد. روش دیگر مورد استفاده برای کاهش غلظت اکسیژن تزریق گازهای دیگر از طریق مخزن‌های فشرده و ترکیب با هوا بوده و یا اینکه فقط از ترکیب خروجی مخازن اکسیژن با گاز نیتروژن و منواکسید کربن و یا امثال آن استفاده می گردد.

تغییر در میزان اکسیژن تاثیر زیادی در مولفه‌های احتراق از جمله تولید آلاینده‌ها، ابعاد شعله، رنگ شعله و ... می گذارد [۲]. همچنین افزایش میزان تاخیر در اشتعال با کاهش غلظت اکسیژن مشاهده شده است. کاهش غلظت اکسیژن سبب تغییرات در میزان تولید آلاینده‌ها نیز می گردد.

رژیم احتراقی مایلد از رژیم‌های نوین احتراقی می باشد که به سبب مزایای قابل توجه آن از جمله احتراق پایدار، پربازده و با میزان کم تولید آلاینده‌ها مورد توجه محققان و صنایع قرار گرفته و می تواند در آینده به صورت گسترده مورد استفاده قرار گیرد. در شرایط بدون پیش گرم سازی جریان هوای جانبی در صورت رقیق سازی اکسیژن در محفظه احتراق با عبور از سطح مشخصی از رقیق سازی اکسیژن شعله موجود خاموش خواهد شد. در صورتی که پیش گرم سازی هوای ورودی در محدوده بالاتر از حد خود اشتعالی سوخت صورت بگیرد مشاهده می شود که فعل انفعالات شیمیایی ادامه پیدا کرده و احتراق در محدوده رقیق سازی بالا البته با شرایط احتراقی متفاوت از حالت عادی ادامه پیدا می کند. به احتراق در این شرایط رژیم احتراقی مایلد گفته می شود [۳].

تابش بسیار کم شعله از ویژگی‌های احتراق در رژیم مایلد می باشد. تابش شعله در برخی موارد بسیار ناچیز بوده و شعله ای شفاف تشکیل می گردد که از این منظر به این رژیم احتراق بدون رنگ^۱ نیز گفته می شود. با مقایسه تصاویر مربوط به احتراق در شرایط عادی با احتراق در رژیم مایلد مشاهده می گردد تابش شعله در ناحیه مرئی بسیار ناچیز بوده اما با وجود عدم رویت شعله کماکان فرایندهای احتراقی صورت گرفته و سوخت و اکسیدایز با یکدیگر واکنش داده و انرژی سوخت استخراج می گردد [۳]. از دیگر

اکسید کربن و پیش‌گرم سازی بر ساختار شعله، پایداری آن، بازده احتراق و آلاینده‌های خروجی انجام داده‌اند. ایشان با استفاده از سوخت اتانول و با بهره‌گیری از یک آزمونگر متقارن محوری در محیط باز اقدام به مطالعات آزمایشگاهی حول موضوعات گفته شده نموده است.

گروه H. C. Rodrigues و همکاران نیز به صورت همزمان با گروه cleon اقدام به انجام مطالعات تجربی در خصوص احتراق اسپری در شرایط معمولی و شرایط پیش‌گرم سازی و رقیق‌سازی هوای جانبی در مقیاس آزمایشگاهی نموده‌اند. آزمونگر مورد استفاده گروه Rodrigues به صورت متقارن محوری و بدون محدود سازی محیط احتراق بوده است. گروه Rodrigues در مطالعات خود اطلاعات ارزشمندی در مورد فیزیک اسپری سوخت مایع و چگونگی ساختار افشانه، مکانیزم آن و نحوه‌ی تبخیر قطرات سوخت در شرایط محیط دارای پیش‌گرم سازی و رقیق‌سازی بدست آوردند [۲۰-۲۲].

مردانی و همکاران به مطالعه احتراق سوخت کروسین در شرایط پیش‌گرم سازی و رقیق‌سازی بالا پرداخته‌اند [۲۳]. به منظور این تحقیقات آزمونگر احتراق مایلد دانشگاه شریف به منظور ایجاد پیش‌گرم سازی و رقیق‌سازی در هوای جانبی منتهی به یک مشعل اسپری مایع طراحی و ساخته شده است. از اهداف ساخت این آزمونگر دستیابی به احتراق در رژیم احتراقی مایلد برای سوخت‌های سنگین و چند مولفه ای همچون کروسین می‌باشد. در پژوهش جاری سعی شده با ایجاد همزمان رقیق‌سازی، پیش‌گرم‌سازی و ایجاد پیچش در هوای جانبی به احتراق در رژیم مایلد در آزمونگر احتراق مایلد دانشگاه صنعتی شریف با سوخت کروسین حاصل شود. مطالعات پارامتریک و بررسی ساختار شعله با استفاده از تحلیل نورتالی شیمیایی و تحلیل هندسی شعله انجام شده است.

آزمونگر و روش انجام پژوهش

به منظور مطالعه بر احتراق سوخت‌های مایع در شرایط پیش‌گرم سازی شده و رقیق‌سازی شده و در نهایت دستیابی به رژیم احتراقی مایلد در آزمایشگاه احتراق پیشرفته دانشگاه صنعتی شریف، در سال ۱۳۹۷ اقدام به طراحی و ساخت یک آزمونگر متناسب با محقق سازی شرایط گفته شده گردیده است. آزمونگر ساخته شده SMSTR^۱ نامگذاری گردید که بیانگر آزمونگر (اسپری) احتراق مایلد دانشگاه شریف می‌باشد. این آزمونگر خود شامل تعدادی زیرسامانه‌های مختلف از جمله سامانه تامین هوا، سامانه پیش احتراقی (به منظور رقیق‌سازی و پیش‌گرم‌سازی)، سیستم پاشش سوخت مایع، سیستم اشتعال، سیستم داده برداری و نیز سیستم خنک کاری می‌باشد.

در تحقیقات جاری به منظور بررسی اثرات مجزای پیش‌گرم سازی هوای جانبی در احتراق اسپری سوخت مایع کروسین از ۴ المنت حرارتی میله ای با توان ۱۵۰۰ وات (توان بیشینه ۶۰۰۰) وات درسیستم به منظور پیش‌گرم سازی هوای جانبی تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده گردیده همچنین از یک مشعل گازی نیز به منظور پیش‌گرم سازی و رقیق‌سازی محتوای اکسیژن به صورت همزمان استفاده شده است. المنت‌های حرارتی در قسمت انتهایی مجرای منتهی به محفظه احتراق نصب گردیده

ویژگی‌های رژیم احتراقی مایلد می‌توان به ایجاد میدان دمایی همگن در محیط احتراق اشاره نمود. با ورود به رژیم احتراقی مایلد حجم ناحیه واکنشی افزایش یافته و همزمان بی‌شبه دما کاهش یافته است که حاصل آن میدان دمایی همگن‌تر می‌باشد. با توجه به موارد گفته شده به دلیل یکنواختی ناحیه واکنشی حتی با افزایش حجم ناحیه واکنشی حجم محفظه احتراق تقلیل می‌یابد [۴].

گروه R. Weber و همکاران تحقیقات فراوانی بر امکان ایجاد احتراق در رژیم احتراقی مایلد با استفاده از سوخت‌های متفاوت گازی، مایع و جامد در شرایط آزمایشگاهی و یا به صورت نیمه صنعتی نموده‌اند [۵]. در نتایج بدست آمده از تحقیقات این گروه مشاهده می‌گردد هنگام استفاده از سوخت‌های سبک شعله مرئی تقریباً ناپدید شده است و میدان همگن‌تر تابش در ناحیه مرئی مشاهده می‌گردد.

B. B. Dally و همکاران تحقیقات فراوانی در زمینه‌ی احتراق در رژیم احتراقی مایلد با استفاده از سوخت‌های گازی، مایع از پیش تبخیر شده و جامد انجام داده‌اند [۴، ۶-۸]. Dally و همکاران به بررسی رژیم احتراقی مایلد به صورت آزمایشگاهی و عددی پرداخته است. بررسی نتایج تحقیقات تجربی گروه Dally نشان داده است استفاده از رژیم احتراقی مایلد برای سوخت‌های سبک سبب پایداری بسیار مناسب، میدان احتراقی همگن و نیز کاهش آلاینده‌هایی همچون اکسیدهای نیتروژن می‌گردد.

گروه Jingjing Ye به همراه گروه E. Varea به مطالعه در خصوص سوخت‌های مایع گوناگونی همچون اتانول، استون و هپتان که به صورت تبخیر شده مورد استفاده قرار گرفته‌اند به صورت تجربی و عددی پرداخته است. ایشان به بررسی پایداری شعله و آلاینده‌های خروجی همچون منواکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن را با تغییر در پارامترهایی همچون نوع سوخت، نسبت تعادلی، فشار کارکرد محفظه، سرعت جریان و اثرات فاز گازی مورد بررسی قرار داده‌اند [۹-۱۱]. دستیابی به احتراق در رژیم احتراقی مایلد برای سوخت‌های مایع از پیش تبخیر شده در این پژوهش همخوانی مناسبی با هدف دستیابی به رژیم احتراقی مایلد برای سوخت مایع کروسین در این پژوهش دارا می‌باشد.

دکتر مردانی و دکتر تابع جماعت تحقیقات فراوانی راجع به رژیم احتراقی مایلد برای سوخت‌های گازی به انجام رسانده‌اند. ایشان در شرایط پیش‌گرم‌سازی و رقیق‌سازی بالا و همچنین اکسی-مایلد به بررسی عددی احتراق مخلوط‌های گوناگون متان و هیدروژن پرداخته و ویژگی‌های ارزشمندی را برای رژیم احتراقی مایلد که در این پژوهش مورد توجه بوده را مورد مطالعه قرار داده و گزارش کرده‌اند [۱۲-۱۸].

گروه M. Sommerfeld و همکارانشان به مطالعه در زمینه‌ی احتراق اسپری آشفته با هدف ایجاد یک بانک اطلاعات تجربی مناسب برای مدلسازی عددی، در رابطه با تبخیر قطرات افشانه در محیط آشفته پرداخته است.

گروه V. M. Reddy و همکاران به مطالعه مشخصات کلی شعله افشانه‌ی کروسین (نفت سفید) با تغییر میزان هوای همراه و فشار تزریق سوخت اقدام کرده‌اند. ایشان با استفاده از افشانه فشاری-پیچشی به بررسی اثرات پیش‌گرم‌سازی هوای جانبی تا ۴۲۳ درجه کلون و رقیق‌سازی اکسیژن تا ۱۷ درصد حجمی بر محدوده پایداری شعله، نوسانات شعله و میزان برخاست شعله پرداخته است [۱۹].

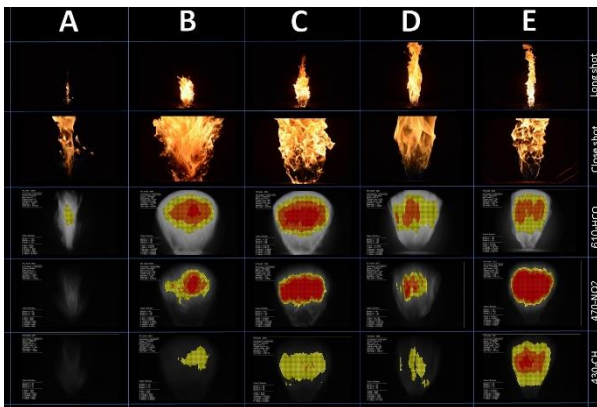
گروه G. Cleon و همکارانشان در سال ۲۰۱۵ میلادی به منظور مطالعه بر روی رژیم Oxy-Fuel مطالعاتی آزمایشگاهی بر اثر رقیق‌سازی با دی

¹ Sharif MILD Spray Test Rig

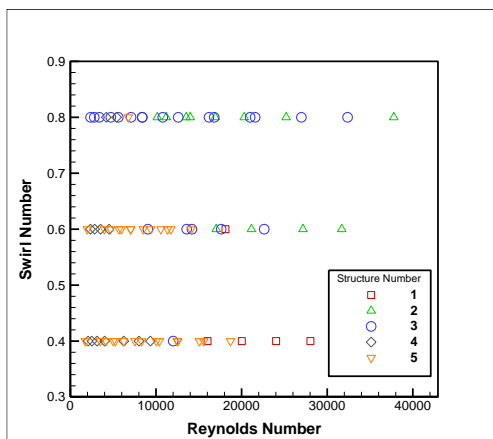
از دمای گفته شده منحرف شده باشد. شرایط مربوط به تست‌های صورت گرفته با محوریت غلظت اکسیژن هوای جانبی در شرایط متفاوت مطابق جدول ۱ می‌باشد.

تحلیل و بررسی نتایج ساختار شعله

در طول این پژوهش عوامل مختلف تاثیر گذار بر کیفیت احتراق همچون عدد پیچش، دبی هوای جانبی، دمای هوای جانبی، نوع افشانه سوخت و تاثیرات متقابل آنها برای شعله‌های گوناگون مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. در طول این آزمایشات ساختارها و رفتارهای متفاوتی از شعله‌های تشکیل شده مشاهده گردید. به همین منظور در ادامه کار دسته بندی این ساختارهای متفاوت در دستور کار قرار گرفت که منجر به معرفی ۵ ساختار پایه برای شعله‌های موجود بدون اعمال رقیق سازی گردید که در شکل ۲ نشان داده شده اند. همچنین محدوده عدد چرخش و رینولدز این شعله ها نیز در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۲: ساختارهای شناسایی شده برای شعله های بدون رقیق سازی



شکل ۳: محدوده عدد پیچش و عدد رینولدز برای ساختارهای شعله معرفی شده

در ادامه مختصراً سعی شده ساختار و شرایط هر کلاس از شعله معرفی شده و شرایط ایجاد و مولفه‌های تشخیص آن مورد بررسی قرار گیرد.

ساختار A

در ساختار A شعله از دو قسمت ایبی رنگ مثلثی شکل و زرد رنگ لوله ای تشکیل شده که کاملاً درون مخروط پیچش هوا قرار می‌گیرند. طول و

اند. تصاویر مربوط به المنت های حرارتی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: تصاویر مربوط به المنت های حرارتی و نحوه قرار گیری آنها بر روی آزمونگر

در این آزمونگر دما و فشار سوخت، آب خنک‌کار و هوا در نقاط مختلف آزمونگر توسط ترموکوپل‌های نوع K و نیز فشارسنج‌های بردن سنجیده شده است. به وسیله یک دستگاه آنالیز گاز تستوست ۳۲۷ ترکیبات هوای جانبی اندازه گیری شده و همچنین با استفاده از دستگاه سیم داغ (مدل YK-2004AH) سرعت محوری هوای جانبی در طول شعاع خروجی هوا در شرایط غیر چرخشی اندازه گیری شده است. به منظور تهیه تصاویر شعله از یک دستگاه دوربین دیجیتال نیکون مدل D7100 استفاده شده است. بر روی دوربین مذکور از لنز "AF-S DX NIKKOR 18-140mm f/3.5-5.6G ED VR" استفاده شده که به فیلتر UV نیز تجهیز شده است، با بهره‌گیری از فیلترهای گذر محدود^۲ (در ناحیه‌ی طیف مرئی) توزیع اجزا شیمیایی در ناحیه‌ی واکنشی به صورت کیفی مشخص شده است.

آزمایشات صورت گرفته

در آزمایشات صورت گرفته برای بررسی اثرات تغییر دمای هوای جانبی اقدام به انجام تست در دماهای مختلف هوای جانبی شامل موارد دارای رقیق سازی و بدون رقیق سازی گردیده است. شرایط مربوط به تست‌های انجام شده با محوریت پیش گرم سازی در جدول ۱ تشریح شده است.

جدول ۱: مقدار دما هوای جانبی مورد آزمایش در شرایط مختلف آزمون و افشانه‌های متفاوت

شرایط تست	درصد رقیق سازی	نوع افشانه	پیچاننده هوا	دمای هوای جانبی مورد آزمایش (درجه سلسیوس)
جریان بدون رقیق سازی	بدون	30SS	۰,۴-۰,۶-۰,۸	۵۰-۱۰۰-۱۵۰-۲۰۰-۲۵۰
	رقیق سازی	30B 60SS	۰,۴-۰,۶-۰,۸	۵۰
جریان با رقیق سازی	۱۵-۱۷-۱۸-۱۹	30SS	۰,۶-۰,۸	۲۵۰ ≅

در این پژوهش اقدام به بررسی اثرات تغییر در غلظت اکسیژن هوای جانبی با درصدهای مختلف غلظت اکسیژن گردیده است. لازم به ذکر است در موارد بررسی شده به دلیل ماهیت همزمانی ایجاد رقیق سازی و پیش گرم سازی تمامی شعله‌های دارای رقیق سازی، دارای پیش گرم سازی هوای جانبی با دمای حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد نیز می‌باشند که با توجه به مختلف رقیق سازی میزان دمای هوای جانبی می‌تواند تا حداکثر ۵۰ درجه

² Bandpass Optical Filters

¹ Testo

سوخت پاش و شعله وجود ندارد. تصاویر مربوط به فیلترها که نشان دهنده چند ناحیه شدید جدا از هم و دارای لبه‌های تیز می‌باشد در تصاویر مربوط به این ساختار مشاهده می‌گردد. این شعله بیشتر در دی‌های پایین و پیش‌های متوسط و کم تشکیل می‌گردد. می‌توان از نسبت منطقی حدود ۵ برای این کلاس به عنوان یک مشخصه تعیین کننده کلاس بهره‌برد. مشاهده می‌گردد در شعه مربوط به ساختار D در بازه عدد رینولدز هوای ورودی از عدد حدود ۱۸۰۰ تا ۸۰۰۰ مشاهده می‌گردد اما می‌توان گفت اکثریت موارد رویت این ساختار شعله در بازه عدد رینولدز ۱۸۰۰ تا ۴۰۰۰ قرار گرفته است که نشان نشان از این بوده که رژیم جریان در ورودی هوای محفظه در هنگام تشکیل این شعله در ناحیه گذار و ابتدای ناحیه رژیم مغشوش جریان مشاهده می‌گردد.

ساختر E

این نوع شعله دارای طول و تابش زیاد و عرض کم می‌باشد. نیمه ابتدایی آن به صورت چین خورده و نیمه انتهایی آن بیشتر به صورت لوله ای شکل می‌باشد. تصاویر مربوط به فیلترها نشان دهنده ناحیه واکنشی قوی و گسترده در این کلاس می‌باشند. این شعله از سوخت پاش فاصله مناسبی داشته و با آن تماس مستقیم ندارد. در این شعله می‌توان چین خوردگی‌های زیادی را بر سطح شعله مشاهده نمود. این شعله به طور معمول برای دماهای بالای هوای جانبی و در دی‌های متوسط و زیاد، و اعداد پیش‌متوسط و کم تشکیل می‌شود. با توجه به طول زیاد و عرض کم در این شعله می‌توان این کلاس را با شاخصه نسبت منطقی حدود ۷ شناسایی نمود.

مشاهده می‌گردد این ساختار از شعله در بازه عدد رینولدز هوای ورودی از عدد حدود ۱۸۰۰ مشاهده می‌گردد اما می‌توان گفت اکثریت موارد رویت این ساختار شعله در بازه عدد رینولدز ۲۵۰۰ تا ۱۴۰۰۰ قرار گرفته است که نشان دهنده رژیم مغشوش جریان در ورودی محفظه احتراق می‌باشد.

اثرات تغییر دمای هوای جانبی

در آزمایشات صورت گرفته برای بررسی اثرات تغییر دمای هوای جانبی اقدام به انجام تست در دماهای مختلف هوای جانبی شامل موارد دارای رقیق سازی و بدون رقیق سازی گردیده است. در ادامه به تفسیر اطلاعات بدست آمده از شرایط پیش‌گرم سازی بدون رقیق سازی پرداخته شده است.

مشخصات هندسی شعله

در این بخش به بررسی تغییرات ایجاد شده در ساختار شعله با تغییر دمای هوای جانبی پرداخته شده است. برای جریان‌های کم پیش‌های اعمال پیش‌گرم سازی در هوای جانبی سبب تغییرات چشم‌گیری در طول شعله نسبت به حالت بدون اعمال پیش‌گرم‌سازی می‌گردد که در نمودارهای شکل ۴ به خوبی قابل مشاهده می‌باشد. اما همین‌طور که مشاهده می‌گردد افزایش میزان پیش‌گرم سازی تغییر چندانی را در طول شعله ایجاد نمی‌کند و تقریباً میزان طول شعله پس از ایجاد پیش‌گرم سازی اولیه در دی‌های متفاوت مستقل از دمای پیش‌گرم سازی می‌باشد. در صورت رسم نمودار طول شعله برای دماهای متفاوت هوای جانبی بر اساس سرعت معادل جریان هوای ورودی اطلاعات بر روی نمودار همپوشانی بیشتری پیدا می‌کند که نشان دهنده این مفهوم می‌باشد که طول شعله بیش از آن که متاثر از دمای هوای جانبی باشد از تغییر سرعت به دلیل افزایش دما تاثیر می‌پذیرد. این مسئله را می‌توان به خوبی با مقایسه نمودارهای شکل ۴ دریافت.

تابش در این شعله مقدار بسیار کمی بوده و احتمال عبور سوخت به صورت نسوخته در آن قوی می‌باشد با توجه به طول کوتاه و عرض آن نسبت منطقی این شعله به نسبت سایر شعله‌ها دارای کمترین مقدار بوده (حدود ۱,۵) که این شعله را از سایرین متمایز می‌سازد. تصاویر فیلترها در این نوع شعله ناحیه واکنشی ضعیفی را نشان می‌دهد. این شعله در اعداد پیش‌های پایین و دی‌های جانبی بالا تشکیل می‌گردد. مشاهده می‌گردد ساختار شعله شماره ۱ در بازه عدد رینولدز هوای ورودی از عدد حدود ۱۴۰۰۰ تا عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ مشاهده می‌گردد که نشان می‌دهد رژیم جریان مغشوش در ورودی محفظه احتراق می‌باشد.

ساختر B

شعله با ساختار B یک شعله بسیار فشرده و با تراکم تابش بالا است که دارای طول کمی می‌باشد. در این شعله لبه‌های انتهایی شعله به صورت باز بوده و ضخامت نسبتاً بالایی دارد. چین خوردگی‌ها در این شعله بسیار ریز بوده و تقریباً حالت شاخه ای شدن شعله مشاهده می‌گردد. برخاستگی در این شعله تقریباً وجود نداشته و بیشترین تاثیر حرارتی و تشکیل دوده بر روی افشانه سوخت نسبت به ساختارهای دیگر اعمال می‌شود. این نوع شعله معمولاً در دی‌های بالا و اعداد پیش‌های بالا تشکیل می‌گردد. در تصاویر مربوط به فیلترها مشاهده می‌گردد تابش شدید در یک ناحیه منسجم با لبه‌های صاف تقریباً دایره ای شکل رخ می‌دهد. در این کلاس شعله حتی در قسمت بلافاصله بالای افشانه نیز تشکیل می‌گردد. این شعله را می‌توان با نسبت منطقی حدود ۲,۵ از سایر کلاس‌های شعله متمایز نمود.

با محاسبه عدد پیش‌های عدد رینولدز برای شعله‌های بررسی شده در مشاهده می‌گردد ساختار شعله شماره ۲ در بازه عدد رینولدز هوای ورودی از عدد حدود ۸۰۰۰ تا عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ مشاهده می‌گردد که نشان می‌دهد رژیم جریان در ورودی محفظه احتراق به صورت مغشوش می‌باشد.

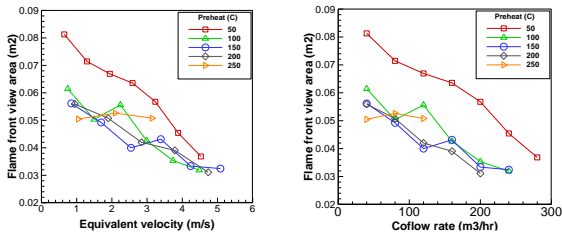
ساختر C

این نوع شعله دارای طول و ضخامت متوسطی بوده و میزان تابش آن نیز به نسبت بالا می‌باشد. این کلاس از شعله داری شکلی اشکی گون و دارای چین خوردگی‌های فراوان است. لبه‌های انتهایی این شعله به صورت بسته بوده و برخاستگی شعله ناچیز می‌باشد که سبب شده شعله با سوخت پاش تماس مستقیم داشته باشد. ناحیه شدید تابش در این ساختار به صورت یک ناحیه منسجم با لبه‌های دندان‌های شکل مشاهده می‌گردد. می‌توان با اعمال اعداد پیش‌های و شدت جریان متوسط به این شکل از شعله دست یافت. این شعله را می‌توان با نسبت منطقی حدود ۳,۵ از سایر کلاس‌های شعله تمیز داد.

می‌توان مشاهده نمود عدد رینولدز جریان ورودی به محفظه احتراق در بازه حدود ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ قرار گرفته اند. تعداد غالب موارد رخ داده در ساختار شعله شماره ۳ در بازه عدد رینولدز ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ قرار می‌گیرد که می‌توان گفت جریان هوای ورودی در این بازه از عدد رینولدز به صورت مغشوش می‌باشد.

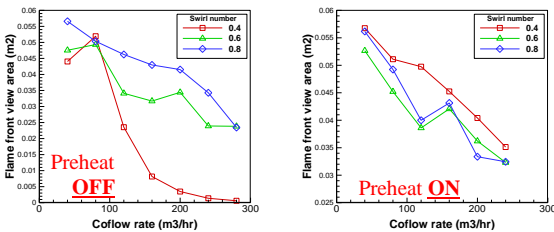
ساختر D

این ساختار شعله دارای طول و عرض زیادی بوده و میزان تابش آن متوسط می‌باشد. رگه‌های شعله در این مورد دارای چین خوردگی‌های کمی بوده و لبه‌های انتهایی شعله باز می‌باشد. این شعله دارای برخاستگی بیشتری در مقایسه با سایر ساختارها نسبت سوخت پاش بوده و تماس مستقیم بین



شکل ۶: نمودار مقادیر مختلف سطح مقطع دید از مقابل شعله برای دماهای پیش گرم سازی متفاوت و نسبت به دبی هوای جانبی (سمت راست) و سرعت معادل جریان (سمت چپ)

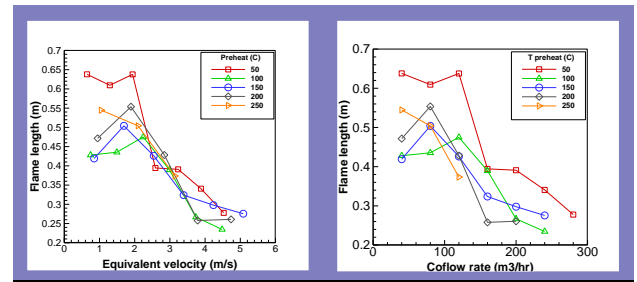
همچنین در شعله‌های همراه با پیش گرم سازی اختلاف مقطع دید از مقابل شعله بین شرایط با اعداد پیچش متفاوت تقریباً ناچیز بوده اما با این حال می‌توان گفت میزان مقطع دید از مقابل شعله در عدد پیچش ۰٫۴ که در حالت بدون پیشگرم سازی داری کمترین مقدار می‌باشد در حالت همراه با پیش گرم سازی دارای بیشترین میزان سطح مقطع دید از مقابل است. این مطالب از آن جهت حائز اهمیت است که در شرایط بدون پیش گرم شعله کم پیچش در دبی‌های بالای هوا دارای سطح کمی بود و احتراق ناقص و خاموشی موضعی احتمالاً در این بطور گسترده رخ می‌داد اما با اعمال پیش گرم سازی احتراق به طور قابل توجهی تقویت شده و احتمالاً سوخت نسوخته کمتری از میدان احتراق خارج خواهد شد. دیگر نکته قابل توجه در این بخش کاهش اختلاف بین سطح مقطع دید از مقابل برای اعداد پیچش مختلف با افزایش دمای پیش گرم سازی می‌باشد با ایجاد پیش گرم سازی همچنان در عدد پیچش ۰٫۶ سطح مقطع دید از مقابل شعله از عدد پیچش ۰٫۸ کمتر بوده با این تفاوت که اختلاف بین آنها کمتر گردیده است. مسائل بیان شده با مقایسه نمودارهای شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۷: نمودار مقادیر مختلف سطح مقطع دید از مقابل شعله برای اعداد پیچش متفاوت و نسبت به دبی هوای جانبی در حالت همراه با پیش گرم سازی (۱۵۰ درجه سانتی گراد) در سمت راست و بدون پیش گرم سازی (هوا) جانبی با دمای حدود ۵۰ درجه سانتی گراد) در سمت چپ.

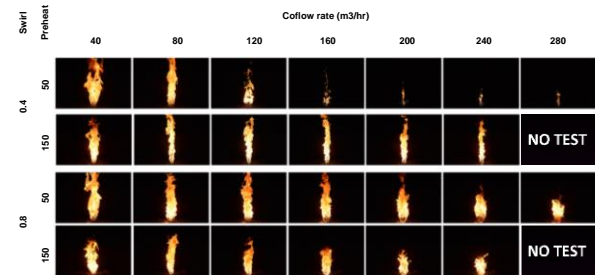
در هنگام پیش گرم سازی هوای جانبی تا رسیدن به دمای حدود ۲۰۰ درجه سانتی گراد روند حجم استوانه محاط به شعله با افزایش دبی هوا برای هر سه عدد پیچش نزولی است. با گذشت پیش گرم سازی از دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد برای عدد پیچش ۰٫۴ روند تغییر حجم با افزایش دبی تغییر کرده و حالت صعودی به خود می‌گیرد که گمان می‌رود به دلیل بهبود احتراق و تقویت واکنش‌ها در دمای پیش گرم سازی بالاتر باشد. در اعداد پیچش ۰٫۶ و ۰٫۸ همچنان در پیش گرم سازی‌های بالای ۲۰۰ درجه نیز تغییرات حجم استوانه محاط به شعله با تغییر دما به شکل نزولی می‌باشد.

با ایجاد پیش گرم سازی در هوای جانبی در عدد پیچش ۰٫۴ دیگر تغییر ساختار شعله صورت نگرفته و میزان برخاستگی شعله در این عدد پیچش نیز همچون دو عدد پیچش دیگر شکل کاهشی به خود خواهد گرفت. روند



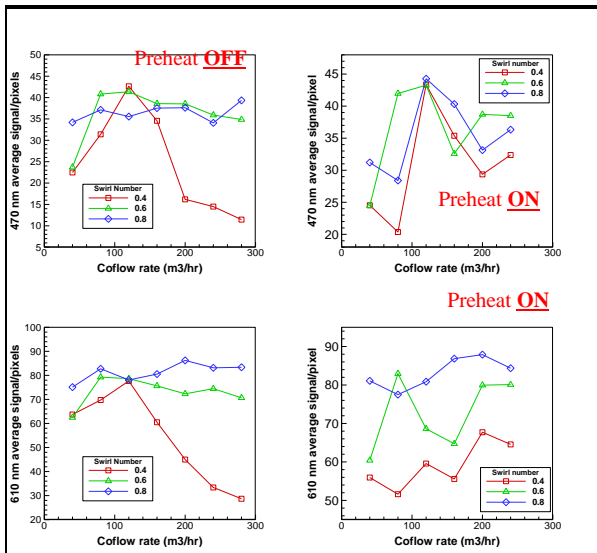
شکل ۴: نمودار مقادیر مختلف طول شعله برای دماهای پیش گرم سازی متفاوت و نسبت به دبی هوای جانبی (سمت راست) و سرعت معادل جریان (سمت چپ)

طبق ملاحظات صورت گرفته ایجاد پیش گرم سازی در هنگام استفاده از پیچاننده هوا با عدد پیچش ۰٫۴ مانع از ورود شعله به ساختار A (مطابق شکل ۲) در دبی‌های ۱۲۰ متر مکعب بر ساعت و بالاتر از آن می‌گردد. به همین جهت در عدد پیچش ۰٫۴ ایجاد پیش گرم سازی سبب افزایش طول شعله می‌گردد. در شرایط مشابه هنگام استفاده از پیچاننده هوا با عدد پیچش ۰٫۸ با افزایش دمای پیش گرم سازی طول شعله کاهش می‌یابد. به طور کلی نتایج نشان می‌دهند در اعداد پیچش بالا که پدیده‌هایی همچون شکست گردابه در آن شرایط رخ می‌دهد سبب کاهش طول شعله و در اعداد پیچش پایین که ساختار جریان در آنها متفاوت از هنگام اعمال عدد پیچش بالا می‌باشد، افزایش پیش گرم سازی به خصوص در دبی‌های بالا سبب بهبود احتراق (که عموماً به شکل ناقص صورت می‌گیرد) و سبب افزایش طول شعله می‌گردد که این مسئله را می‌توان در تصاویر شکل ۵ مشاهده نمود.



شکل ۵: تصاویر مربوط به شعله در دو دمای پیش گرم سازی ۵۰ و ۱۵۰ درجه برای اعداد پیچش ۰٫۴ و ۰٫۸ در دبی‌های کثافت هوای جانبی.

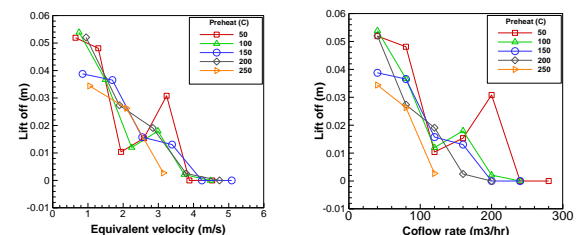
شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش دبی هوای جانبی مقطع دید از مقابل شعله کاهش می‌یابد ولی با توجه به نمودار سرعت معادل-طول شعله می‌توان گفت شیب این کاهش برای شعله بدون اعمال پیش گرم سازی داری مقدار بیشتری نسبت به شعله‌های دارای پیش گرم سازی هوای جانبی می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده همچنین می‌توان گفت با افزایش دمای پیش گرم سازی به شرط این که ساختار شعله را تغییر ندهد باعث کاهش مساحت مقطع دید از مقابل شعله می‌گردد. با مقایسه نمودارهای میزان مساحت دید از مقابل شعله در دماهای مختلف پیش گرم سازی بیشترین اختلاف بین نمودارهای دو حالت شعله بدون پیش گرم سازی و شعله دارای حداقل پیش گرم سازی (۱۰۰ درجه سانتی گراد) مشاهده می‌گردد. با افزایش میزان دمای پیش گرم سازی اختلاف بین مقطع دید از مقابل کاهش می‌یابد و نمودارهای مربوط به پیشگرم سازی ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی گراد بسیار نزدیک به هم می‌باشند که این موضوع را می‌توان در شکل ۶ مشاهده نمود.



شکل ۹: نمودارهای میانگین تابش در میدان در دو حالت با و بدون پیشگرم با تغییرات دبی هوای جانبی

با بررسی نتایج مربوط به فیلتر و ۴۷۰ و ۴۳۰ نانومتر روند تغییر میانگین تابش در شرایط بدون پیشگرم تا دبی هوای جانبی ۱۲۰ متر مکعب بر ساعت سازی به صورت افزایشی بوده و سپس شکل نزولی به خود گرفته و ثابت می‌گردد. اگر حداکثر میانگین تابش در فیلتر ۴۳۰ نانومتر را در دبی ۱۲۰ متر مکعب بر ساعت در نظر بگیریم تا حدودی مشاهده می‌گردد این پارامتر با افزایش دمای هوای جانبی به سمت دبی‌های بالاتر هوای جانبی میل می‌کند. موضوع دیگری که با مقایسه نمودارهای مربوط به شرایط همراه با پیشگرم سازی و بدون پیشگرم سازی در شکل ۹ دریافت می‌شود عدم افت شدید میانگین تابش در عدد پیچش ۰,۴ در شرایط همراه با پیشگرم سازی به دلیل عدم تغییر ساختار شعله می‌باشد که به خوبی قابل مشاهده می‌باشد. در خصوص طول موج ۴۷۰ نانومتر با اعمال پیشگرم سازی شعله مربوط به عدد پیچش ۰,۴ تقویت شده و وارد ساختار شعله شماره ۱ نمی‌گردد که امر سبب شده هم‌گونی بیشتری را در نمودارهای مربوط به اعداد پیچش مختلف مشاهده نماییم. به نظر می‌رسد افزایش میزان پیشگرم سازی سبب کاهش اختلاف بین میانگین تابش در فیلتر ۴۷۰ نانومتر برای اعداد پیچش مختلف می‌گردد. روند تغییر میانگین تابش در تصاویر فیلتر ۶۱۰ نانومتر که می‌تواند بیانگر آزاد سازی حرارت باشد با افزایش دبی هوای جانبی به صورت صعودی بوده و یا تقریباً دارای مقداری ثابت می‌باشد. البته در شرایط بدون پیشگرم سازی و در هنگام اعمال عدد پیچش ۰,۴ روند میانگین تابش فیلتر ۶۱۰ نانومتر با عبور از دبی ۱۲۰ متر مکعب بر ساعت تغییر ساختار داده و با ورود به ساختار شماره ۱ و احتراق ناقص تابش در فیلتر ۶۱۰ نانومتر (و آزاد سازی حرارت) با کاهش قابل توجهی روبرو می‌شود اما در همین حالت و با اعمال پیشگرم سازی از تغییر ساختار به ساختار شماره ۱ جلوگیری شده و روند در عدد پیچش ۰,۴ نیز به صورت صعودی یا ثابت در می‌آید. اثر دمای پیشگرم در دبی‌های مختلف هوای جانبی بر نورتابی شیمیایی شعله در شکل ۱۰ ارائه شده است.

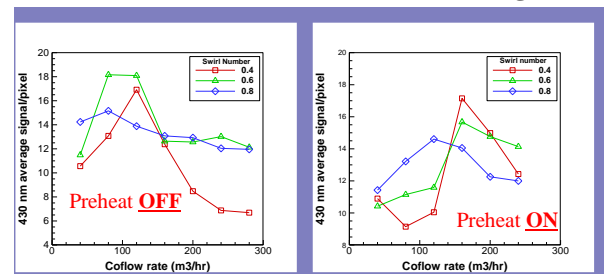
تغییر برخاستگی با افزایش دبی هوای جانبی و تغییر در عدد پیچش در این شرایط کماکان همانند حالت قبل بوده و با افزایش عدد پیچش برخاستگی کاهش می‌یابد. با بررسی مقادیر برخاستگی برای دماهای مختلف پیشگرم سازی می‌توان مشاهده نمود در تمامی اعداد پیچش با افزایش میزان دمای پیشگرم سازی میزان برخاستگی شعله کاهش پیدا می‌کند. کاهش میزان برخاستگی در اعداد پیچش ۰,۴ و ۰,۶ در دبی‌های بالای هوای جانبی منجر به چسبیدن شعله بر روی سرمشعل می‌گردد با توجه به نمودارهای شکل ۸ نمودار مربوط به برخاستگی-دبی صفر شدن میزان برخاستگی برای پیشگرم سازی‌های متفاوت را در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. اما در نمودار مربوط به سرعت معادل - برخاستگی تا هنگام رسیدن دمای پیشگرم سازی به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد شاهد صفر شدن میزان برخاستگی بعد از عبور سرعت معادل از محدوده ۴ متر ثانیه بعد برای دماهای پیشگرم سازی پیش از آن می‌باشیم. به نظر می‌رسد اثر پیشگرم سازی بر کاهش میزان برخاستگی ناچیز بوده و اثر غالب تغییر در سرعت جریان می‌باشد. در نمودار مربوط به دمای پیشگرم سازی ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد شاهد چسبیدن شعله به سرمشعل در سرعت معادل حدود ۳,۲ متر بر ثانیه می‌باشیم که با این وجود علاوه بر تاثیر سرعت بر میزان برخاستگی با عبور دما از مقدار مشخصی تاثیر افزایش دما بر کاهش برخاستگی نیز نمایان می‌گردد.



شکل ۸: نمودار مقادیر مختلف برخاستگی شعله برای دماهای پیشگرم سازی متفاوت و نسبت به دبی هوای جانبی (سمت راست) و سرعت معادل جریان (سمت چپ)

نورتابی شیمیایی شعله

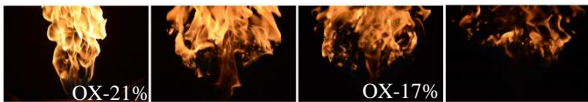
در این بخش سعی شده تا نورتابی شیمیایی شعله در دبی‌های مختلف هوای جانبی برای دماهای مختلف پیشگرم سازی در فیلترهای گذر محدود ۴۳۰، ۴۷۰، ۶۱۰ نانومتر مورد بررسی قرار گیرد. نمودارهای میانگین تابش در میدان در دو حالت با و بدون پیشگرم با تغییرات دبی هوای جانبی در شکل ۹ نشان داده شده است.



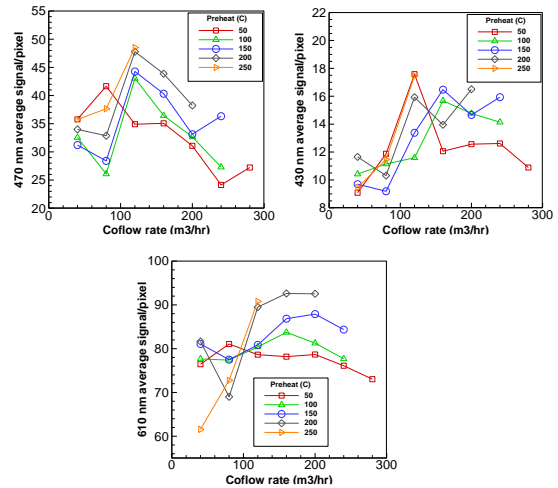
در ادامه به بررسی اثرات تغییر در غلظت اکسیژن هوای جانبی با پرداخته شده است. لازم به ذکر است در موارد بررسی شده به دلیل ماهیت همزمانی ایجاد رقیق‌سازی و پیش‌گرم‌سازی تمامی شعله‌های دارای رقیق‌سازی، دارای پیش‌گرم‌سازی هوای جانبی با دمای حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد نیز می‌باشند که با توجه به شرایط مختلف رقیق‌سازی میزان دمای هوای جانبی می‌تواند تا حداکثر ۵۰ درجه از دمای گفته شده منحرف شده باشد.

مشخصات هندسی شعله

با تغییر در میزان اکسیژن هوای جانبی تغییرات عمده‌ای در مشخصات هندسی شعله به وجود می‌آید که در این بخش به بررسی آنها پرداخته شده است. در تصاویر شکل ۱۱ شعله‌های دارای مقادیر متفاوت رقیق‌سازی نمایش داده شده است و اطلاعات مربوط به طول شعله، سطح دید از مقابل، حجم معادل و برخاستگی شعله و در نمودارهای شکل ۱۲ ارائه شده است. مقدار طول شعله (فاصله بین افشانه و بالاترین نقطه دارای تابش) و سطح مقطع دید از مقابل در هنگام رقیق‌سازی اکسیژن در اعداد پیچش ۰٫۶ و ۰٫۸، به صورت کاهشی بوده که این کاهش در عدد پیچش ۰٫۶ بیش از مقدار آن در عدد پیچش ۰٫۸ می‌باشد اما میزان برخاستگی افزایش نشان می‌دهد که این افزایش صورت گرفته برای هر دو عدد پیچش ۰٫۶ و ۰٫۸ تقریباً برابر بوده و همچنین مقدار برخاستگی نیز بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشد. با افزایش میزان رقیق‌سازی در عدد پیچش ۰٫۶ مقدار حجم استوانه محاط به شعله تقریباً ثابت مانده و در عدد پیچش ۰٫۸ با افزایش میزان رقیق‌سازی حجم استوانه محاط به شعله کاهش می‌یابد که آن را می‌توان متأثر از احتراق قوی‌تر در عدد پیچش ۰٫۸ دانست. با کم کردن میزان اکسیژن هوای جانبی ابتدا شعله به طور کلی تغییر شکل داده و قسمت بالایی شعله حذف می‌گردد. با ادامه کاهش غلظت اکسیژن شعله از قسمت پایین آن شروع به خاموش شدن کرده و به سمت بالا حرکت می‌کند که سبب کاهش طول شعله می‌گردد. به صورت کلی با افزایش میزان رقیق‌سازی شعله تقلیل رفته و از مشخصات هندسی آن کاسته می‌گردد که می‌تواند به معنای احتراق ناقص باشد.



شکل ۱۱: تصاویر مربوط به شعله با افزایش میزان رقیق‌سازی اکسیژن از چپ به راست



شکل ۱۰: اثر دمای پیش‌گرم در دبی‌های مختلف هوای جانبی بر نورتابی شیمیایی شعله

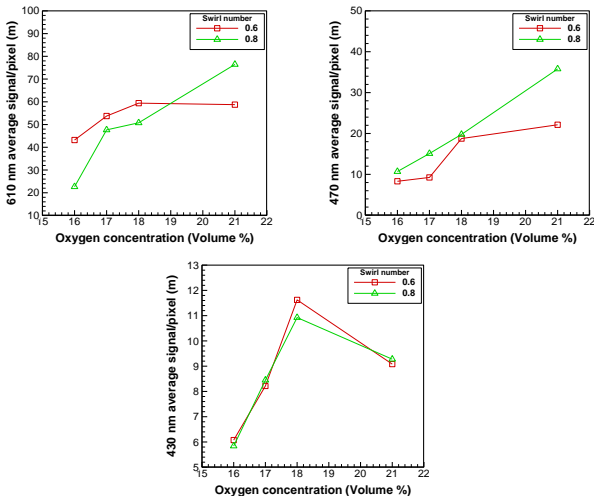
با مقایسه میزان میانگین تابش در دبی‌های مختلف هوا متوجه می‌شویم با افزایش دمای هوای جانبی میزان میانگین تابش نیز در فیلتر ۴۳۰ نانومتر گریبان‌ها در این نمودار کاهش یافته و هم در صعود اولیه و هم در نزول ثانویه میزان میانگین تابش برای شرایط با پیش‌گرم‌سازی کمتر، تغییر بیشتری را تجربه می‌کنند. همچنین با افزایش پیش‌گرم‌سازی در یک دبی هوای جانبی ثابت به طور کلی می‌توان گفت فعل و انفعالات شیمیایی تقویت شده و میانگین تابش فیلتر ۴۳۰ نانومتر نیز افزایش می‌یابد. مشاهده می‌گردد محل پیک رخ داده در میزان میانگین تابش فیلتر ۴۳۰ نانومتر با تغییر پیش‌گرم‌سازی در دبی‌های متفاوتی واقع می‌شوند. در صورتی که اگر سرعت معادل هوا مدنظر قرار گیرد پیک‌های میانگین تابش تقریباً در سرعت معادل جریان نزدیک به ۳٫۲ متر بر ثانیه رخ داده که البته حالت بدون پیش‌گرم‌سازی شرایط متفاوتی را تجربه کرده و پیک میانگین تابش خود را در سرعتی نزدیک به ۱٫۸ متر بر ثانیه به ثبت رسانیده است.

با توجه به نورتابی در طول موج ۴۷۰ نانومتر می‌توان گفت با افزایش میزان پیش‌گرم‌سازی میانگین تابش در فیلتر ۴۷۰ نانومتر (که می‌تواند بیانگر دما و تابش دی‌اکسید نیتروژن باشد) با افزایش میزان پیش‌گرم‌سازی افزایش می‌یابند. همچنین مشاهده می‌گردد که پیک تابش رخ داده در یک دبی مشخص برای همه دماهای پیش‌گرم‌سازی رخ داده در حالی که در نمودار سرعت معادل محل پیک تابش در فیلتر ۴۷۰ نانومتر در سرعت‌های متفاوتی رخ داده می‌باشد لذا می‌توان گفت رفتار دمایی شعله بیشتر متأثر از دبی هوای تزریق شده می‌باشد.

میزان تابش فیلتر ۶۱۰ نانومتر را بر اساس دبی هوای جانبی و سرعت معادل جریان رسم شده اند نشان می‌دهند با افزایش میزان پیش‌گرم‌سازی در دبی‌های پایین تقریباً میانگین تابش مقادیر یکسانی داشته و در دبی‌های بالاتر موارد دارای پیش‌گرم‌سازی بیشتر میانگین تابش بیشتری را در فیلتر ۶۱۰ نانومتر از خود نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد در شرایطی که دبی هوای جانبی بالا بوده و پدیده‌هایی همچون شکست گردابه رخ می‌دهد ایجاد پیش‌گرم‌سازی و افزایش دمای پیش‌گرم‌سازی به شکل چشمگیرتری سبب افزایش آزاد سازی حرارت می‌گردد.

بررسی اثرات تغییر غلظت اکسیژن هوای جانبی

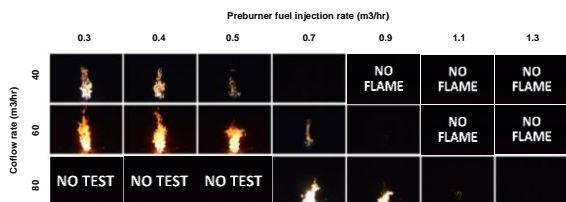
تصاویر فیلتر ۶۱۰ نانومتر نشان می دهند با افزایش میزان رقیق سازی اکسیژن هوای جانبی با کاهش میانگین تابش در فیلتر گذر محدود ۶۱۰ نانومتر مواجه می گردیم که احتمالاً بیانگر کاهش آزاد سازی حرارت و غلظت گونه HCO می باشند. با توجه به نمودار شکل ۱۴ میزان میانگین تابش بر خلاف فیلتر ۴۷۰ نانومتر در فیلتر گذر محدود ۶۱۰ نانومتر برای عدد پیچش ۰٫۶، بیش از میزان آن برای عدد پیچش ۰٫۸ می باشد. نکته حائز اهمیت دیگری که در این بخش مشاهده می گردد یکنواخت گشتن میدان تابش برای هر سه فیلتر ۴۳۰، ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر می باشد.



شکل ۱۴: نمودار میانگین تابش در فیلترهای ۴۳۰ (سمت راست)، ۴۷۰ (وسط) و ۶۱۰ (سمت چپ) نانومتر برای اعداد پیچش ۰٫۶ و ۰٫۸.

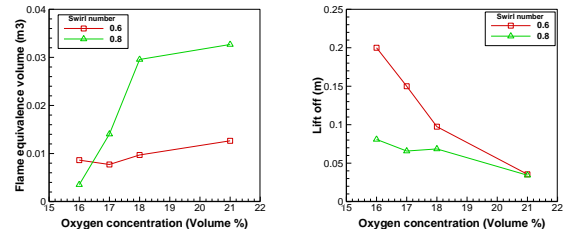
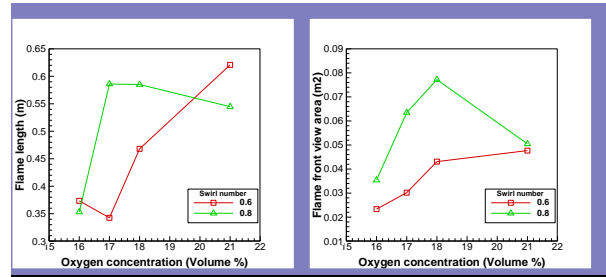
اثرات پیشگرم سازی و رقیق سازی بالا

در ادامه تحقیقات صورت گرفته در حوزه رقیق سازی اکسیژن هوای جانبی به بررسی اثر تغییر دبی هوای جانبی و دبی سوخت مشعل سامانه رقیق سازی پرداخته شده است. تصاویر عادی با نمای دور حاصل از شعله در شرایط گوناگون دبی هوای جانبی و دبی سوخت سامانه رقیق سازی در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می گردد در دبی های مختلف هوای جانبی اگرچه شعله ها با افزایش میزان سوخت مشعل رقیق سازی که مقارن با کاهش غلظت اکسیژن در مشعل اصلی می باشد روند یکسانی را طی نموده اند ولی آغاز و پایان این روند در بازه های متفاوت دبی هوای جانبی واقع شده است.



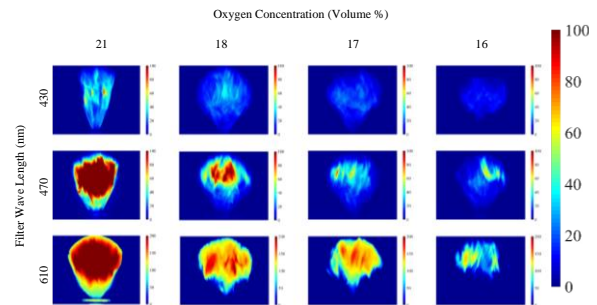
شکل ۱۵: تصاویر عادی با نمای دور حاصل از شعله در شرایط گوناگون دبی هوای جانبی و دبی سوخت سامانه رقیق سازی

با محاسبه نسبت هم آرزوی در مشعل سامانه رقیق سازی می توان با استفاده از اطلاعات عملکردی مشعل رقیق سازی میزان اکسیژن هوای جانبی در مشعل اصلی را محاسبه نمود که نتایج آن در جدول ۲ برای مقادیر مختلف



شکل ۱۲: نمودار های تغییرات طول شعله (بالا سمت چپ)، تغییرات سطح دید از مقابل شعله (بالا سمت راست)، حجم معادل شعله (سمت پایین سمت چپ) و تغییرات برخاستگی شعله (پسین سمت راست) با تغییر میزان رقیق سازی هوای جانبی برای اعداد پیچش ۰٫۶ و ۰٫۸.

ایجاد رقیق سازی و کاهش غلظت اکسیژن تغییرات شدیدی را در نورتابی شیمیایی شعله ایجاد می کند. با کم شدن میزان اکسیژن، شدت احتراق به شدت کاهش یافته و انتظار می رود دمای شعله و میزان آزاد سازی حرارت نیز کاهش چشم گیری داشته باشند. تصاویر مربوط به فیلترهای گذر محدود در تصاویر شکل ۱۳ نمایش داده شده و اطلاعات استخراج شده از آن در نمودارهای شکل ۱۴ ارائه شده است.



شکل ۱۳: تصاویر فیلترهای ۴۳۰، ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر برای شعله در شرایط رقیق سازی گوناگون اکسیژن

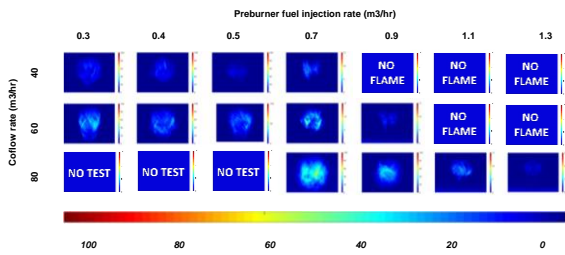
همان طور که انتظار می رود در تصاویر مربوط به فیلتر ۴۳۰ نانومتر با افزایش میزان رقیق سازی اکسیژن هوای جانبی با کاهش میانگین تابش در این فیلتر مواجه می گردیم و می توان گفت با افزایش رقیق سازی شاهد کاهش شدید شدت احتراق هستیم. در نمودار شکل ۱۴ می توان مشاهده نمود میزان میانگین تابش برای اعداد پیچش ۰٫۶ و ۰٫۸ تقریباً برابر بوده و اختلافی میان آنها مشاهده نمی شود.

در تصاویر مربوط به فیلتر گذر محدود ۴۷۰ نانومتر می توان مشاهده نمود با افزایش میزان رقیق سازی غلظت اکسیژن هوای جانبی با کاهش میانگین تابش مواجه می گردیم. فیلتر ۴۷۰ نانومتر می تواند بیانگر دمای شعله و گونه دی اکسید نیتروژن نیز باشد، کاهش دما و متعاقباً کاهش غلظت اکسیدهای نیتروژن را نشان می دهد. قابل به ذکر است که میزان میانگین تابش در این فیلتر برای عدد پیچش ۰٫۸، بیش از میزان آن برای عدد پیچش ۰٫۶ می باشد.

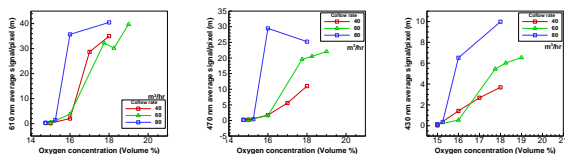


شکل ۱۶: تصویر مربوط به شعله آبی رنگ با حساسیت مناسب تصویر برداری (ISO6400) برای این شعله

تصاویر تهیه شده به وسیله فیلترهای گذر محدود ۴۳۰، ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر برای شرایط گوناگون دبی هوای جانبی و دبی سوخت سامانه رقیق سازی تهیه و به علت محدودیت فضا تنها نتایج مرتبط با فیلتر ۴۳۰ نانومتر در شکل ۱۷ ارائه شده است. همچنین اطلاعات استخراج شده مربوط به میانگین تابش سلول‌ها در تصاویر فیلترهای گذر محدود در نمودارهای شکل ۱۸ بر حسب میزان اکسیژن هوای جانبی و برای دبی‌های مختلف هوای جانبی نمایش داده شده است.



شکل ۱۷: تصاویر بدست آمده از فیلتر ۴۳۰ نانومتر در میزان های مختلف رقیق سازی



شکل ۱۸: میزان میانگین تابش بر سلول در فیلترهای میان گذر ۴۳۰، ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر براساس محتوای اکسیژن هوای جانبی برای دبی‌های مختلف هوای جانبی

همان‌طور که در نمودارهای شکل ۱۸ مشاهده می‌شود روند تغییرات میانگین تابش در سلول‌های تصویر برای هر سه فیلتر گذر محدود ۴۳۰، ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر با کاهش محتوای اکسیژن هوای جانبی به شکل کاهشی می‌باشد. به نظر میرسد کاهش شدید در میزان تابش در هر سه فیلتر مورد بررسی در حوالی میزان محتوای اکسیژن ۱۶ درصد تغییرات شدیدی را تجربه می‌کند. شیب کاهش برای دبی‌های هوای جانبی متفاوت مقدار متفاوتی دارد به صورتی که شیب کاهش تابش با کاهش محتوای اکسیژن برای دبی ۸۰ متر مکعب بر ساعت در حدود محتوای اکسیژن ۱۶ درصد بیشتر از دبی ۶۰ متر مکعب بر ساعت بود و این مقدار برای دبی ۶۰

دبی هوای جانبی و دبی سوخت مشعل سامانه رقیق سازی ارائه شده است. با بررسی محتوای اکسیژن موجود در هوای جانبی هر یک از شعله‌های شکل ۱۵ مشاهده می‌گردد شعله‌های دارای محتوای اکسیژن مشابه از ساختار مشابهی نیز بهره می‌برند. از این سو به نظر می‌آید محتوای اکسیژن هوای جانبی تعیین کننده چگونگی ساختار شعله در شرایط گوناگون می‌باشد.

جدول ۲: اطلاعات مربوط به نسبت هم‌ارزی سامانه رقیق سازی و محتوای اکسیژن محصولات خروجی از سامانه رقیق سازی (در موقعیت خانه‌های سبز رنگ شعله تشکیل شده و در خانه‌های قرمز رنگ شعله تشکیل نمی‌شود).

دبی هوا	دبی سوخت سامانه رقیق‌سازی							نسبت هم‌ارزی	محتوای اکسیژن %
	۱.۵	۱.۳	۱.۱	۰.۹	۰.۷	۰.۵	۰.۴		
۴۰	۰.۹	۰.۷۷	۰.۶۵	۰.۵۴	۰.۴۲	۰.۳	۰.۲۴	۰.۱۸	۱۸
	۱۰	۱۱	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۸
۶۰	۰.۶	۰.۵۲	۰.۴۴	۰.۳۶	۰.۲۸	۰.۲	۰.۱۵	۰.۱۲	۱۹
	۱۳	۱۴	۱۵	۱۵	۱۶	۱۸	۱۸	۱۹	۱۹
۸۰	۰.۴۵	۰.۳۹	۰.۳۳	۰.۲۷	۰.۲۰	۰.۱۵	۰.۱۲	۰.۹	۲۰
	۱۳	۱۵	۱۵	۱۶	۱۸	۱۸	۱۹	۲۰	۲۰

با توجه به اطلاعات جدول ۲ می‌توان برداشت نمود تغییر ساختار شعله از ساختار زرد رنگ به ساختار آبی رنگ در محتوای اکسیژن هوای جانبی حدود ۱۵ درصد به وقوع می‌پیوندد که شعله آن با تنظیمات یکسان دوربین برای تمامی تصاویر قابل رویت نمی‌باشد. با توجه به تصاویر شکل ۱۵ می‌توان گفت شعله با کاهش میزان رقیق‌سازی دچار تقلیل در ابعاد هندسی خود از جمله طول و سطح مقطع دید از مقابل می‌گردد. مشاهده شد با افزایش رقیق‌سازی اکسیژن افزایش میزان برخاستگی تا رسیدن به شرایط شعله آبی رنگ رخ داده و پس از آن کاهش ناگهانی برخاستگی در شرایط شعله آبی رنگ مشاهده شده است. پس انتقال به حالت آبی رنگ با افزایش رقیق‌سازی اکسیژن مجدداً میزان برخاستگی افزایش یافته تا جایی که این شعله نیز خاموش می‌گردد.

در تصاویر شکل ۱۵ به دلیل مقایسه‌پذیر بودن تصاویر تهیه شده و اختلاف شدید میزان تابش بین شعله آبی رنگ و زرد رنگ شعله تصاویر با حساسیت به نور ISO2500 تهیه شده اند که در این تصاویر قسمت آبی رنگ آن به سختی مشاهده می‌گردد به همین دلیل تصویر دیگری از شعله کاملاً آبی رنگ با میزان حساسیت به نور بیشتر دوربین (ISO6400) تهیه شده که در شکل ۱۶ نمایش داده شده است.

تفکیک شده نیز مورد مطالعه قرار گرفته که در زیر به این پارامترها و نتایج بررسی آنها به صورت اجمالی اشاره شده است. اهم نتیجه به دست آمده بصورت زیر می باشد:

- تقویت کیفیت احتراق و احتراق کامل تر سوخت در شرایط پیش گرم سازی مشاهده شد.
- همچنین ایجاد پیش گرم سازی سبب ایجاد تغییرات هندسی در ظاهر شعله شده است که می توان به کاهش برخاستگی در همه شرایط اشاره نمود
- در دبی هوای ۱۲۰ تا ۲۴۰ متر مکعب بر ساعت در اکثر موارد کاهش عرض شعله مشاهده شده است.
- رفتار طول شعله در هنگام ایجاد پیش گرم سازی با توجه به عدد پیچش جریان رفتارهای متفاوتی داشته به صورتی که در اعداد پیچش پایین سبب افزایش طول شعله و در اعداد پیچش بالای جریان سبب کاهش طول شعله شده است.
- تغییر در میزان محتوای اکسیژن هوای جانبی سبب تغییر کلی در ساختار شعله نسبت به حالت بدون رقیق سازی می گردد بدین صورت که شعله با کاهش محتوای اکسیژن به کمتر از ۲۰ درصد محتوای حجمی تغییر شکل کلی داده و کوتاه تر و پهن تر می گردد.
- تصاویر مربوط به نورتابی شیمیایی شعله نیز در تصاویر مربوط حالت رقیق سازی تابش بسیار کمتر و نیز یکنواخت تری را ارائه می دهد.
- از اهداف بسیار مهم این پژوهش دستیابی به رژیم احتراقی مایلد برای سوخت سنگین کروسین می باشد. با ایجاد رقیق سازی اکسیژن هوای جانبی به کمتر از ۱۵ درصد محتوای حجمی و پیش گرم سازی هوای جانبی شعله در محدوده بالای ۲۵۰ درجه سانتی گراد و استفاده همزمان از مکانیزم پیچش هوا با اعداد پیچش بالا به شعله ای با مشخصات شعله های گزارش شده در رژیم احتراقی مایلد مشاهده شد.

مراجع

- [1] R. R. Reiche and I. H. E. Association, *Combustion Technology Manual*. Combustion Division of the Industrial Heating Equipment Association, 1974.
- [2] A. K. Gupta, S. Bolz, and T. Hasegawa, "Effect of Air Preheat Temperature and Oxygen Concentration on Flame Structure and Emission," vol. 121, no. September 1999, pp. 209-216, 2016.
- [3] A. Cavaliere and M. De Joannon, *Mild Combustion*, vol. 30. 2004. doi: 10.1016/j.pecs.2004.02.003.
- [4] P. F. Li et al., "Progress and recent trend in MILD combustion," *Science China Technological Sciences*, vol. 54, no. 2, pp. 255-269, 2011, doi: 10.1007/s11431-010-4257-0.
- [5] R. Weber, J. P. Smart, and W. Vd Kamp, "On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 30 II, no. 2, pp. 2623-2629, 2005, doi: 10.1016/j.proci.2004.08.101.
- [6] B. B. Dally, A. N. Karpetis, and R. S. Barlow, "Structure of turbulent non-premixed jet flames in a diluted hot coflow," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 29, no. 1, pp. 1147-1154, 2002, doi: 10.1016/S1540-7489(02)80145-6.

متر مکعب نیز بیشتر از دبی ۴۰ متر مکعب بر ساعت می باشد. تقریباً برای همه دبی های هوای جانبی تست شده با کاهش شدید تابش در حوالی محتوای اکسیژن ۱۶ درصد روبرو می شویم و سپس نمودارها حول محتوای اکسیژن ۱۵ درصد همگام شده و تا جایی که شعله وجود داشته باشد تقریباً میزان این تابش ثابت می گردد. محل همگرایی نمودارها در محتوای اکسیژن ۱۵ درصد نقطه ای می باشد که شعله کاملاً به رنگ آبی در آمده است.

در مطالعات صورت گرفته به وسیله مردانی و همکاران نمودارهای مربوط به پایداری شعله در دماهای مختلف پیش گرم سازی به ازای محتوای اکسیژن هوای جانبی برای سوخت کروسین در شرایط بدون پیچش هوای جانبی محاسبه گردیده [۲۳]. با افزودن پیچش به هوای جانبی مرزهای پایداری شعله مرزهای پایداری شعله نسبت به حالت بدون پیچش به سمت محتوای کمتر اکسیژن گسترش داشته و در شرایطی که پیش از آن شعله ای تشکیل نمی گردید، شعله حاصل شده است.

دستیابی به رژیم احتراقی مایلد از ابتدای این پژوهش یکی از مهم ترین دستاوردهای مورد نظر محسوب می گردید. حال با توجه به نتایج بدست آمده این سوال پیش رو قرار خواهد گرفت که آیا شعله آبی رنگ حاصل شده در این پژوهش احتراق مایلد مربوط بوده یا حاصل از شرایط دیگری می باشد. در ادامه به مقایسه شرایط مطرح شده در مراجع در خصوص تشخیص رژیم احتراقی مایلد به منظور شفاف سازی در خصوص چگونگی شرایط موجود می پردازیم. البته با این وجود موضوع احتراق مایلد با استفاده از سوخت کروسین در منابع گزارش نگردیده و مقایسه های صورت گرفته با شرایط مربوط به سوخت های سبک تر و ساده تر می باشد. از جمله مشخصات بارز احتراق در رژیم احتراقی مایلد که تقریباً در تمام منابع یاد شده مرتبط با رژیم احتراقی مایلد در بخش پیشینه تحقیق فصل مقدمه این پژوهش به آن اشاره شده است کاهش شدید تابش در ناحیه مرئی می باشد. با بررسی این موضوع می توانیم دریابیم شعله بدون رقیق سازی دارای پیشینه سیگنال نزدیک به ۲۰۰ و میانگین سیگنال تابش حدود ۱۶۰ می باشد در صورتی که در شعله آبی رنگ میانگین تابش زیر ۱۰ و پیشینه تابش زیر ۲۰ مشاهده می گردد که به معنای کاهش تابش حدود ۹۵ درصدی در ناحیه مرئی می باشد. مسئله دیگر مربوط به همگن شدن میدان دمایی و آزاد سازی حرارت می باشد در این زمینه با مشاهده تصاویر مربوط به فیلترهای ۴۷۰ و ۶۱۰ نانومتر می توان گفت نقاط شدید مشاهده شده در حالت زرد رنگ در حالت آبی رنگ ناپدید شده و میدان تابش یکنواخت تری که می تواند بیانگر میدان دمایی و آزادسازی حرارت همگن تر باشد مشاهده می گردد.

جمع بندی

در این پژوهش سعی گردید تا تاثیرات تغییر در شرایط محیطی احتراق ساختار شعله در شرایط گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته و خواص آن گزارش گردد که طی بررسی های انجام شده ۵ ساختار متفاوت شعله با خصوصیات مشخص که در بین این مشخصه ها نسبت منطقی می تواند به عنوان عنصر متمایز کننده شناخته شود معرفی گردید است. اطلاعات مربوط به ساختارهای شعله شناسایی شده برای شرایط بدون رقیق سازی ارائه شد. تاثیرات عوامل محیطی مورد مطالعه بر ساختار شعله به صورت

- pp. 44–63, 2012, doi: 10.1080/00102202.2011.615770.
- [20] H. Rodrigues, "Spray combustion in moderate and intense low-oxygen conditions: An experimental study," 2015.
- [21] H. C. Rodrigues, M. J. Tummers, E. H. Van Veen, and D. J. E. M. Roekaerts, "International Journal of Heat and Fluid Flow Effects of coflow temperature and composition on ethanol spray flames in hot-diluted coflow," *INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND FLUID FLOW*, no. x, 2014, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.10.006.
- [22] H. C. Rodrigues, M. J. Tummers, E. H. Van Veen, and D. J. E. M. Roekaerts, "Spray flame structure in conventional and hot-diluted combustion regime," *COMBUSTION AND FLAME*, 2014, doi: 10.1016/j.combustflame.2014.07.033.
- [23] A. Mardani, A. Azimi, H. Karimi, and M. Mahalegi, "An Experimental Study on Kerosene Spray Combustion Under Conventional and Hot-Diluted Conditions An Experimental Study on Kerosene Spray Combustion Under Conventional and Hot-Diluted Conditions," *Combustion Science and Technology*, vol. 00, no. 00, pp. 1–40, 2021, doi: 10.1080/00102202.2021.1887156.
- [7] F. C. Christo and B. B. Dally, "Modeling turbulent reacting jets issuing into a hot and diluted coflow," *Combustion and Flame*, vol. 142, no. 1–2, pp. 117–129, 2005, doi: 10.1016/j.combustflame.2005.03.002.
- [8] P. R. Medwell, P. A. M. Kalt, and B. B. Dally, "Imaging of diluted turbulent ethylene flames stabilized on a Jet in Hot Coflow (JHC) burner," *Combustion and Flame*, vol. 152, no. 1–2, pp. 100–113, 2008, doi: 10.1016/j.combustflame.2007.09.003.
- [9] J. Ye, P. R. Medwell, E. Varea, S. Kruse, B. B. Dally, and H. G. Pitsch, "An experimental study on MILD combustion of prevaporised liquid fuels," *Applied Energy*, vol. 151, no. March 2019, pp. 93–101, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.019.
- [10] J. Ye, P. R. Medwell, B. B. Dally, and M. J. Evans, "The transition of ethanol flames from conventional to MILD combustion," *Combustion and Flame*, vol. 171, pp. 173–184, 2016, doi: 10.1016/j.combustflame.2016.05.020.
- [11] J. Ye, P. R. Medwell, K. Kleinheinz, M. J. Evans, B. B. Dally, and H. G. Pitsch, "Structural differences of ethanol and DME jet flames in a hot diluted coflow," *Combustion and Flame*, vol. 192, pp. 473–494, 2018, doi: 10.1016/j.combustflame.2018.02.025.
- [12] P. Taylor, A. Mardani, S. Tabejamaat, and M. Baig, "Combustion Theory and Modelling Numerical study of the effect of turbulence on rate of reactions in the MILD combustion regime," no. July 2014, pp. 37–41, doi: 10.1080/13647830.2011.561368.
- [13] C. Science and A. Mardani, "NO X FORMATION IN H₂-CH₄ BLENDED FLAME UNDER MILD CONDITION," no. x, 2016, doi: 10.1080/00102202.2012.663991.
- [14] A. Mardani, S. Tabejamaat, and S. Hassanpour, "Numerical study of CO and CO₂ formation in CH₄ / H₂ blended flame under MILD condition," *Combustion and Flame*, vol. 160, no. 9, pp. 1636–1649, 2013, doi: 10.1016/j.combustflame.2013.04.003.
- [15] A. Mardani and S. Tabejamaat, "NUMERICAL STUDY OF FLAME STRUCTURE IN THE," vol. 19, no. 1, pp. 21–34, 2015, doi: 10.2298/TSCI120522091M.
- [16] A. Mardani and A. F. Ghomshi, "Numerical study of oxy-fuel MILD (moderate or intense low-oxygen dilution combustion) combustion for CH₄ e H₂ fuel," *Energy*, vol. 99, pp. 136–151, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.01.016.
- [17] A. Mardani and S. Tabejamaat, "Effect of hydrogen on hydrogen e methane turbulent non-premixed flame under MILD condition," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 20, pp. 11324–11331, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.06.064.
- [18] P. Taylor, A. Mardani, S. Tabejamaat, and M. Ghamari, "Combustion Theory and Modelling Numerical study of influence of molecular diffusion in the Mild combustion regime," no. April 2013, pp. 37–41, 2010, doi: 10.1080/13647830.2010.512959.
- [19] V. M. Reddy, D. Trivedi, and S. Kumar, "Experimental investigations on lifted spray flames for a range of coflow conditions," *Combustion Science and Technology*, vol. 184, no. 1,