

مطالعه تجربی اثر چرخش و رقیق سازی اکسید کننده بر پایداری احتراق غیر پیش آمیخته گاز طبیعی

امیر روحانی^{۱*}، صادق تابع جماعت^۲، ایوب عادل^۳

تهران-خیابان حافظ-دانشگاه صنعتی امیرکبیر-دانشکده مهندسی هوافضا

(* نویسنده مخاطب: rowhani@aut.ac.ir)

چکیده

در پژوهش حاضر، مطالعه تجربی پایداری شعله غیرپیش آمیخته گاز طبیعی با هوای چرخشی و رقیق سازی همزمان هوا با گاز نیتروژن مورد بررسی قرار گرفته است. برای تولید چرخش از پره های چرخاننده با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه استفاده شده است. در طی آزمایشات با توجه به میزان چرخش اعمال شده به هوا، دو نوع رژیم احتراقی مشاهده شده است. در جریان با چرخش ضعیف، با افزایش سرعت سوخت، شعله از روی نازل بلند شده و در سرعتهای بالاتر دچار خاموشی می شود. در جریان با چرخش قوی، شعله در فاصله کمی از نازل سوخت بلند شده و بسیار پایدار می باشد. هدف از این مطالعه، بررسی حدود پایداری شعله شامل سرعت و ارتفاع برخاستگی و نیز خاموشی شعله در محدوده گسترده ای از سرعت های هوا و همچنین در شرایط رقیق سازی هوا می باشد. با اعمال چرخش بر هوای رقیق شده، مشاهده می شود که چرخش، اثرات منفی رقیق سازی هوا را کاهش داده و موجب افزایش پایداری شعله می گردد.

واژه های کلیدی: احتراق چرخشی - شعله غیر پیش آمیخته - رقیق سازی - گاز طبیعی

۱- مقدمه

امروزه استفاده از جریان های چرخشی در طراحی سیستم های احتراقی با راندمان بالا و کاهش آلاینده ها در آنها بسیار مورد توجه می باشد. جریان های چرخشی به منظور افزایش پایداری شعله ها در کوره ها، توربین های گازی، بویلرها، مشعل ها و موتورهای احتراق داخلی کاربرد گسترده ای دارند. اثرات کلی چرخش بر ساختار جریان بخوبی شناخته شده اند. البته ساختار هندسی مشعل، اختلاط سوخت و هوا و مشخصات جریان بر شکل شعله، پایداری و توزیع دما در جریان های چرخشی تاثیر می گذارد. رفتار جریان های چرخشی توسط عدد بی بعد چرخش (S) بیان می شود. عدد بی بعد چرخش، بیانگر میزان اغتشاش در شعله نسبت به وجود گردابه های داخل آن می باشد. بیر و چیگیئر (Beer and Chigier) [1]، جریان های چرخشی با چرخش های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آنها جریان های چرخشی را به دو دسته تقسیم کردند. جریان های چرخشی ضعیف ($S < 0.6$) و جریان های چرخشی قوی ($S > 0.6$). در این جریان ها سهم مولفه شعاعی سرعت از سرعت متوسط محوری به میزان چرخش بستگی دارد. برای چرخش ضعیف، توزیع سرعت به صورت گوسین می باشد و بیشینه سرعت در

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا گرایش پیشرانس دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشیار دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- مدیر عامل شرکت تولیدی-مهندسی شعله صنعت

راستای محوری است. با افزایش شدت چرخش، میزان مولفه شعاعی سرعت افزایش می یابد. در چرخش قوی، بدلیل بوجود آمدن اختلاف فشار در جهت معکوس محوری، جریان بازگشتی ایجاد شده و ناحیه بازگردش مرکزی CRZ^۱ تشکیل می شود. جریان های برگشتی در سیستم های احتراقی موجب پایداری شعله می شوند. مطالعات آزمایشگاهی و عددی زیادی به منظور درک صحیح اثرات چرخش بر جریان های همدم و احتراقی انجام شده است. در اینجا چندین مطالعه از جریان های چرخشی مورد بازبینی قرار گرفته است. گوپتا و همکاران (Gupta et al.) مطالعات گسترده ای بر روی جریان های چرخشی انجام دادند. آنها نشان دادند که استفاده از جریان های چرخشی، پایداری شعله در محفظه احتراق را بدلیل بوجود آمدن ناحیه بازگردش افزایش داده و طول شعله نیز کاهش می یابد و اختلاط جریان بخصوص در منطقه لایه برشی^۲ افزایش می یابد [2]. فیکما و همکاران (Feikema et al.) در دانشگاه میشیگان در یک سری تحقیقات بر روی یک مشعل دیفیوژن چرخشی، تاثیر میزان چرخش بر افزایش پایداری شعله را بررسی کردند. ایشان نشان دادند که چرخش جریان می تواند شعله را تا حد بسیار بالاتری (بر اساس بیشینه سرعت سوخت) نسبت به حالت بدون چرخش پایدار سازد [3]. باکلی و همکاران (Buckley et al.) تاثیر چرخش های مختلف را بر راندمان یک محفظه احتراق را بررسی کردند [4]. متور و همکاران (Mathur et al.) نشان دادند که چرخش قوی هوا یک منطقه بازگردش در مرکز محفظه احتراق تولید می کند که موجب افزایش پایداری شعله می گردد [5]. یوآسا (Yuasa) مطالعات تجربی بر تاثیر چرخش بر پایداری شعله دیفیوژن انجام داد [6]. فیلپ و همکاران (Philipp et al.) مطالعات گسترده ای به صورت تجربی و عددی بر پایداری شعله های پیش مخلوط و غیر پیش مخلوط انجام دادند [7]. تحقیقات متعددی روی رقیق سازی اکسید کننده در شعله های غیرپیش آمیخته انجام شده است. روان و همکاران (Ruan et al.) اثر رقیق سازی اکسیژن با نیتروژن و دی اکسیدکربن را در شعله آرام متان به صورت تجربی و عددی بررسی کردند و نشان دادند که اثر دی اکسید کربن روی پایداری شعله بیشتر است [8]. در خصوص تاثیر منفی رقیق سازی سوخت و اکسید کننده، کارهای زیادی در گذشته انجام شده است [9-10].

در کار حاضر، ضمن بررسی اثرات چرخش بر پایداری شعله گاز طبیعی، دو پارامتر چرخش و رقیق سازی هوا به صورت همزمان اعمال شده اند. برای بررسی حدود پایداری شعله از مشاهده مستقیم و عکسبرداری با دوربین دیجیتال استفاده شده است.

۲- تجهیزات و روش آزمایش

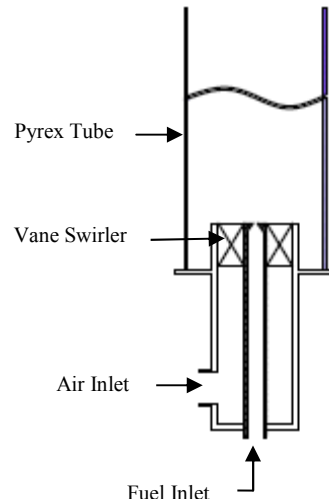
به منظور بررسی اثر چرخش، از یک مشعل غیر پیش آمیخته چرخشی استفاده شده است. در این مشعل سوخت و هوای چرخشی به صورت هم محور وارد محفظه احتراق می شوند. سوخت گازی از طریق نازل سوخت به قطر ۳ میلیمتر که در مرکز مشعل قرار گرفته است وارد محفظه می شود. هوای مورد نیاز از اطراف نازل سوخت به صورت هم محور پس از عبور از پره های چرخاننده وارد محفظه می شود. به منظور جلوگیری از حضور هوای اطراف در احتراق از یک شیشه پیرکس به قطر داخلی ۱۳ سانتیمتر استفاده شده است. برای چرخش دادن به هوای ورودی از پره های چرخاننده با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه استفاده شده است. در شکل (۱) پره های چرخاننده و در شکل (۲)، مشعل چرخشی نشان داده شده اند.



شکل ۱- پره های چرخاننده. (۱) ۳۰ درجه (۲) ۴۵ درجه (۳) ۶۰ درجه

¹ Central Recirculation Zone

² Shear Layer



شکل ۲- طرحواره مشعل چرخشی

جهت تامین هوای مورد نیاز برای احتراق از یک کمپرسور که قادر به تولید هوا با فشار ۱۰ اتمسفر را می باشد استفاده شده است. هوا پس از عبور از خشک کن و فیلترهای مناسب، خشک و ذرات معلق آن گرفته می شود. دبی جریان های سوخت و اکسید کننده توسط روماتر های تعبیه شده در مسیر تغذیه مشعل با دقت $\pm 0.2\%$ اندازه گیری شده است. برای تصویر برداری از دوربین دیجیتال (Canon Power Shot G6) و سرعت بالا (0.1 msec) استفاده شده است. جریان های سوخت و اکسید کننده در درجه حرارت محیط (25°C) می باشند.

۲-۱- محاسبه عدد چرخش

عدد چرخش به صورت شار محوری مومنوم چرخشی تقسیم بر شار محوری مومنوم محوری تعریف می گردد. برای محاسبه عدد چرخش برای یک پره چرخاننده به قطر داخلی d_i و قطر خارجی d_o از رابطه زیر استفاده می گردد [2].

$$SN = \frac{2}{3} \tan(\theta) \left(\frac{1 - (d_i/d_o)^3}{1 - (d_i/d_o)^2} \right) \quad (1)$$

برای محاسبه عدد چرخش مطابق رابطه (۱)، فقط به پارامترهای هندسی پره یعنی قطر داخلی، قطر خارجی و زاویه پره مورد نیاز است. به همین دلیل عدد فوق را عدد هندسی چرخش می نامند [2]. در این تحقیق اعداد چرخش برای پره های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه با توجه به رابطه (۱) مقادیر ۰/۴۶، ۰/۸ و ۱/۴۱ محاسبه می گردد. با توجه به تقسیم بندی جریانهای چرخشی توسط بیر (beer)، با استفاده از پره ۳۰ درجه در محدوده جریان کم چرخش و پره ۴۵ و ۶۰ درجه در محدوده جریانهای با چرخش زیاد قرار می گیریم [1].

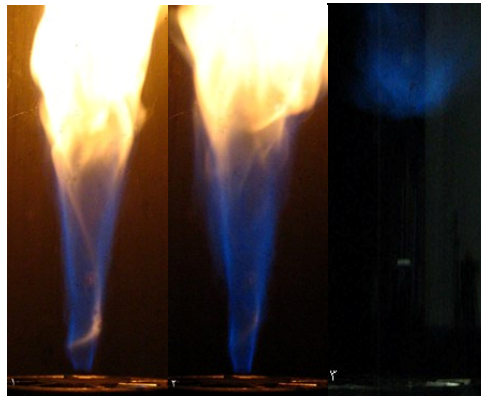
۳- بحث و بررسی نتایج

نتایج بدست آمده در این مطالعه، به دو بخش احتراق کم چرخش و احتراق با چرخش زیاد تقسیم می شوند. در هر دو بخش، آزمایشات با اکسید کننده هوا و همچنین هوای رقیق شده با نیتروژن انجام شده اند. در بررسی رقیق سازی هوا، به میزان ۵٪ و ۱۰٪ دبی کل اکسید کننده به هوا نیتروژن افزوده شده است. پارامترهای مورد بررسی در بخش کم چرخش،

سرعت برخاستگی^۱ و سرعت خاموشی^۲ می باشد. در بخش چرخش بالا، سرعت برخاستگی و ارتفاع برخاستگی اندازه گیری شده اند. در کلیه آزمایشات به دلیل محدودیت فشار گاز طبیعی آزمایشگاه، بیشینه دبی در دسترس ۱۴ لیتر بر دقیقه است و امکان عبور از سرعت ۳۳ متر بر ثانیه را به ما نمی دهد.

۳-۱- احتراق غیر پیش آمیخته کم چرخش

دلیل اولیه و مقدماتی استفاده از چرخش، افزایش سطح شعله و افزایش پایداری شعله بواسطه نرخ کاهش سرعت محوری و بوجود آمدن مولفه سرعت شعاعی می باشد. در جریان های کم چرخش، سهم مولفه محوری بیشتر از مولفه شعاعی است. افزایش عدد چرخش موجب کاهش مولفه محوری شده که سبب پایداری بیشتر شعله می گردد. رفتار جریان های کم چرخش را می توان با جریان بدون چرخش^۳ مقایسه کرد. در جریان های هم محور و بدون چرخش، با افزایش سرعت سوخت، شعله ابتدا از فاز آرام وارد فاز مغشوش شده و با افزایش پیوسته سرعت سوخت، شعله از روی نازل بلند می شود [11]. شعله بلند شده، در فاصله زیادی از سر نازل قرار گرفته و بسیار ناپایدار است. با استفاده از چرخش کم، اختلاط سوخت و هوا در منطقه واکنش افزایش یافته که این افزایش منجر به احتراق بهتر، افزایش حدود پایداری و همچنین موجب کاهش آلاینده های احتراق بالاخص ناکس^۴ می شود. در آزمایشات انجام شده برای تولید هوای کم چرخش از پره چرخاننده ۳۰ درجه استفاده شده است. طبق رابطه ارائه شده برای محاسبه عدد چرخش، پره ۳۰ درجه، عدد چرخش ۰/۴۶ را بوجود می آورد. شکل (۳) رفتار احتراق کم چرخش را با افزایش سرعت سوخت نشان می دهد.



شکل ۳- تغییرات شکل شعله گاز طبیعی با افزایش سرعت سوخت و عدد چرخش ۰/۴۶ و سرعت هوا ۰/۶۴ متر بر ثانیه

$$U_f=16.2 \text{ m/s}(۳) . U_f=14.8 \text{ m/s}(۲) . U_f=13.3 \text{ m/s}(۱)$$

۳-۱-۱- اثر سرعت جریان سوخت بر پایداری شعله با اکسید کننده هوا

شکل (۴) میزان سرعت برخاستگی و همچنین سرعت خاموشی شعله را در محدوده گسترده ای از سرعت های هوا نشان می دهد. با افزایش سرعت هوا، میزان سرعت برخاستگی و سرعت خاموشی افزایش یافته و مشاهده می شود که شیب نمودار خاموشی بطور متوسط بیشتر از شیب نمودار برخاستگی شعله است که این مطلب بیانگر تاثیر سرعت هوای چرخشی در

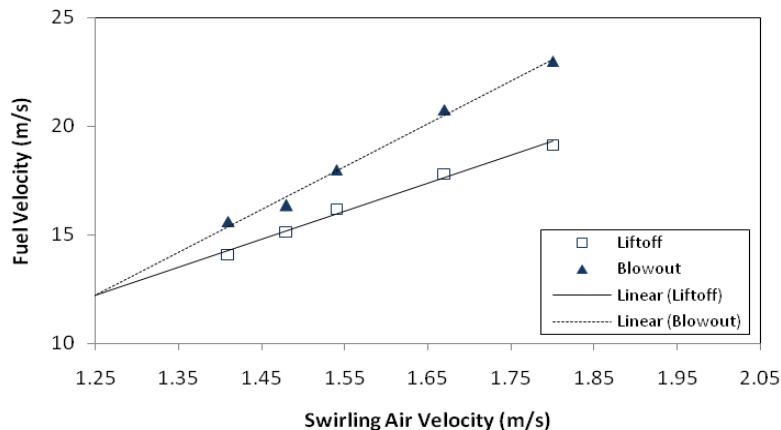
¹ Lift-off Height

² Lift-off Velocity

³ No Swirl Flow

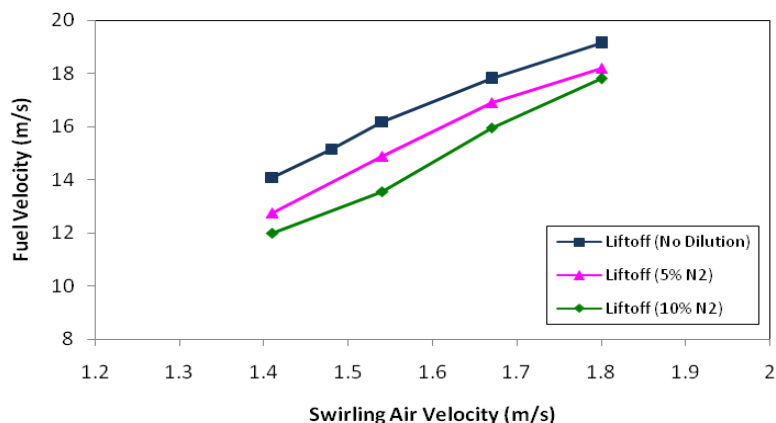
⁴ NOx

افزایش پایداری شعله است. افزایش سرعت هوا موجب زیاد شدن مولفه سرعت و افزایش شدت ناحیه بازگردش گوشه ای شده که در نهایت پایداری شعله را بهبود می بخشد.

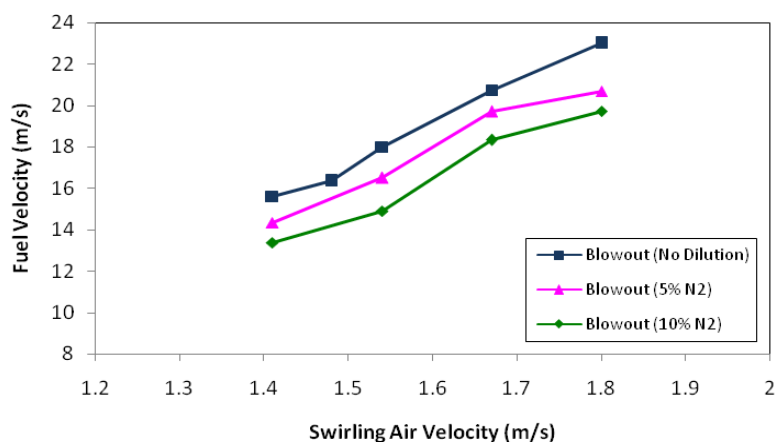


شکل ۴- تغییرات سرعت برخاستگی و خاموشی با افزایش سرعت سوخت

۳-۱-۲- اثر سرعت جریان سوخت بر جدایش و خاموشی شعله در شرایط رقیق سازی اکسید کننده محدوده پایداری احتراق گاز طبیعی با هوای کم چرخش، در شرایط رقیق سازی هوا نیز بررسی شده اند. بدین منظور از گاز نیتروژن برای رقیق سازی هوا استفاده شده است. در دو حالت به میزان ۵٪ و ۱۰٪ دبی اکسید کننده، نیتروژن به هوا افزوده شده و هوای رقیق شده پس از عبور از پره های چرخاننده وارد محفظه احتراق می شود. به منظور بررسی دقیق نتایج، نمودار سرعت جدایش شعله در شکل (۵) و منحنی سرعت خاموشی در شکل (۶) به صورت جداگانه نشان داده شده اند. رقیق سازی اکسید کننده بدلیل کاهش اکسیژن در منطقه واکنش موجب کاهش پایداری شعله می شود. با توجه به نتایج سرعت جدایش شعله در شکل (۵) مشاهده می شود که افزودن ۵٪ نیتروژن به هوا باعث کاهش ۷/۹٪ سرعت جدایش نسبت به حالت بدون رقیق سازی و افزودن ۱۰٪ نیتروژن موجب کاهش ۱۶/۲٪ سرعت جدایش نسبت به حالت بدون رقیق سازی می شود. اما به دلیل حضور چرخش، شعله شکل کلی خود را مطابق با حالت بدون رقیق سازی حفظ می کند. رقیق سازی همچنین باعث کاهش سرعت خاموشی شعله می شود. با توجه به نمودار شکل (۶)، رقیق سازی هوا با ۵٪ نیتروژن، سرعت خاموشی را به میزان ۸/۳٪ نسبت به حالت بدون رقیق سازی، و با افزودن ۱۰٪ نیتروژن، سرعت خاموشی ۱۷/۲٪ نسبت به حالت بدون رقیق سازی کاهش می یابد.



شکل ۵- تغییرات سرعت برخاستگی شعله در شرایط رقیق سازی و بدون رقیق سازی



شکل ۶- تغییرات سرعت خاموشی شعله در شرایط رقیق سازی و بدون رقیق سازی

۳-۲- احتراق غیر پیش آمیخته با چرخش زیاد

میزان پایداری شعله به شدت به میزان چرخش وابسته است. با افزایش عدد چرخش، شدت احتراق افزایش یافته، طول شعله کوتاه تر شده و نرخ استهلاک مولفه های سرعت محوری و چرخشی افزایش می یابد [2]. این کاهش در مولفه سرعت محوری باعث بوجود آمدن اختلاف فشار در راستای محور شده و باعث افزایش پایداری شعله می شود. جریان های با چرخش بالا ($S > 0.6$) باعث بوجود آمدن ناحیه بازگشتی مرکزی علاوه بر ناحیه بازگشتی در کناره ها می شود که این گردابه ها باعث افزایش اختلاط محصولات احتراق و مواد واکنش دهنده شده و همچنین نقش اساسی در پایداری شعله دارند. در اینجا پایداری شعله در جریان با چرخش قوی در دو چرخش مختلف بررسی شده و نتایج با هم مقایسه شده اند.

۳-۲-۱- اثر سرعت جریان سوخت و رقیق سازی هوا بر پایداری شعله با عدد چرخش ۰/۸ (پره ۴۵ درجه)

در اینجا با ثابت نگه داشتن سرعت هوا و افزایش سرعت سوخت فقط یک حد پایداری شعله مشاهده می شود و آن بلند شدن شعله از نازل است. (به دلیل محدودیت سرعت سوخت، قادر به مشاهده خاموشی شعله در بخش چرخش بالا نیستیم). شکل (۷) رفتار شعله را با افزایش سرعت سوخت نشان می دهد.



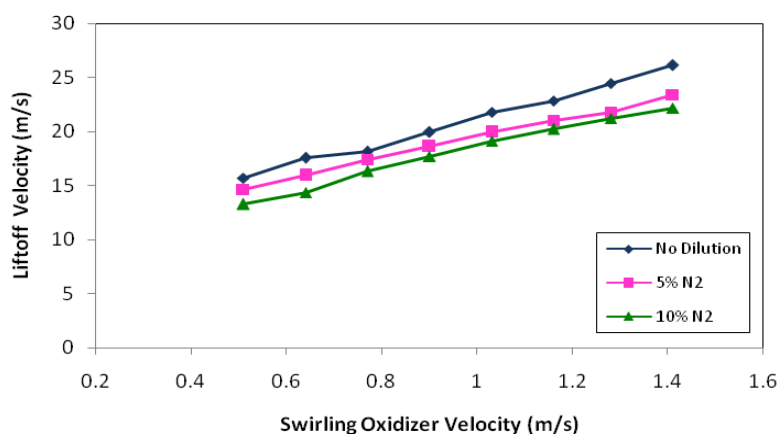
شکل ۷- تغییرات شکل شعله گاز طبیعی با افزایش سرعت سوخت و عدد چرخش ۰/۸ و سرعت هوا ۰/۶۴ متر بر ثانیه

(۱. $U_f=12.8$ m/s (۲. $U_f=14.9$ m/s (۳. $U_f=16.8$ m/s (۴. $U_f=17.5$ m/s (۵. $U_f=24.5$ m/s)

در این شکل ها، سرعت هوا ثابت و برابر $0/64$ متر بر ثانیه و پره 45 درجه با عدد چرخش متناظر $0/8$ در نظر گرفته شده است. با افزایش سرعت سوخت تا سرعت های کمتر از 13 متر بر ثانیه شعله آرام می باشد. با افزایش سرعت سوخت و ورود به فاز مغشوش، شعله از نازل جدا شده و در فاصله نزدیک به سر مشعل قرار می گیرد. برای سرعت هوای $0/64$ متر بر ثانیه، سرعت برخاستگی برابر $17/5$ متر بر ثانیه می باشد. با افزایش سرعت سوخت میزان ارتفاع برخاستگی افزایش یافته و انتظار می رود که در سرعت های بالاتر سوخت، شعله دچار خاموشی گردد. در این مطالعه فقط به بررسی سرعت برخاستگی و میزان ارتفاع برخاستگی پرداخته شده است و از بررسی وقوع نقطه گذار تا زمان بلند شدن شعله صرف نظر شده است.

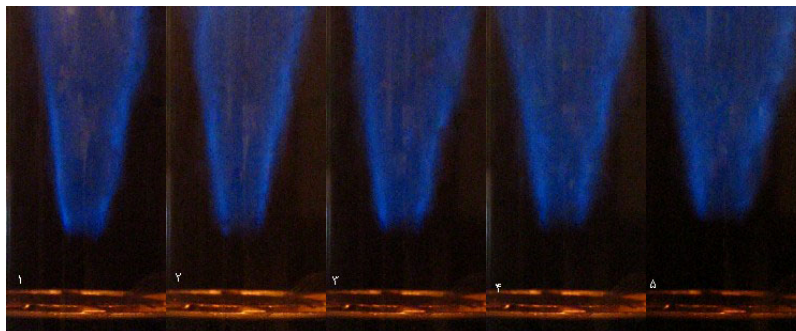
در بخش رقیق سازی هوا، آزمایشات در دو درصد مختلف رقیق سازی انجام شده اند. بعنوان نمونه با ثابت نگه داشتن عدد چرخش به میزان $0/8$ و همچنین سرعت اکسید کننده برابر با $0/64$ متر بر ثانیه، در دو حالت به میزان 5% و 10% دبی اکسید کننده، نیتروژن به هوا افزوده شده است. بدلیل آنکه رقیق سازی باعث کاهش میزان اکسیژن حاضر در فضای واکنش می شود، موجب کاهش پایداری شعله شده و باعث می گردد که برخاستگی شعله در سرعت های پایین تری نسبت به حالت بدون رقیق سازی رخ دهد. رقیق سازی موجب افزایش ارتفاع برخاستگی نیز می شود. بطوریکه با توجه به نتایج، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها مانند عدد چرخش و سرعت اکسید کننده، میزان ارتفاع برخاستگی شعله در سرعت $18/6$ متر بر ثانیه برای سوخت، برابر با $13/07$ میلیمتر در حالت بدون رقیق سازی و برابر با $13/73$ میلیمتر با افزایش 5% نیتروژن به هوا و برابر با $14/7$ میلیمتر با افزایش 10% نیتروژن به هوا می باشد که این مطلب بیانگر افزایش 5 درصدی میزان ارتفاع برخاستگی شعله به ازاء افزایش 5% نیتروژن به هوا می باشد.

شکل (۸) میزان سرعت برخاستگی به ازاء عدد چرخش $0/8$ ، بدون رقیق سازی و همراه با رقیق سازی هوا، در محدوده گسترده ای از سرعت های هوا یعنی از $0/51$ متر بر ثانیه تا $1/41$ متر بر ثانیه نشان می دهد.



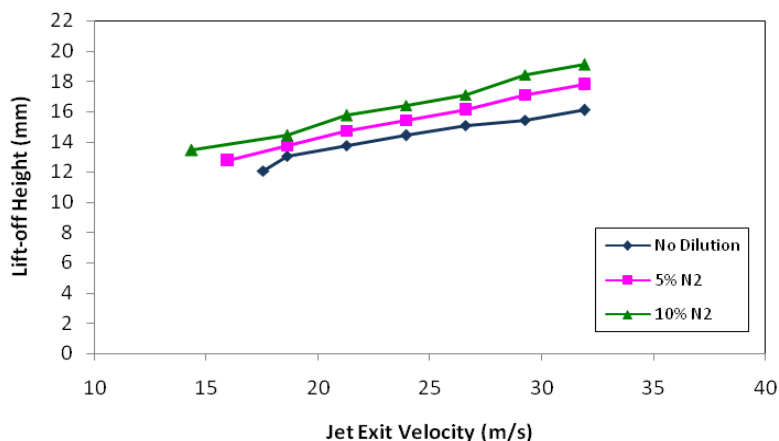
شکل ۸- تغییرات سرعت برخاستگی شعله در شرایط رقیق سازی و بدون رقیق سازی هوا و عدد چرخش $0/8$

شکل (۹) میزان ارتفاع برخاستگی شعله را با افزایش سرعت سوخت نشان میدهد. اندازه ارتفاع برخاستگی در شکل (۱۰) قابل مشاهده است.



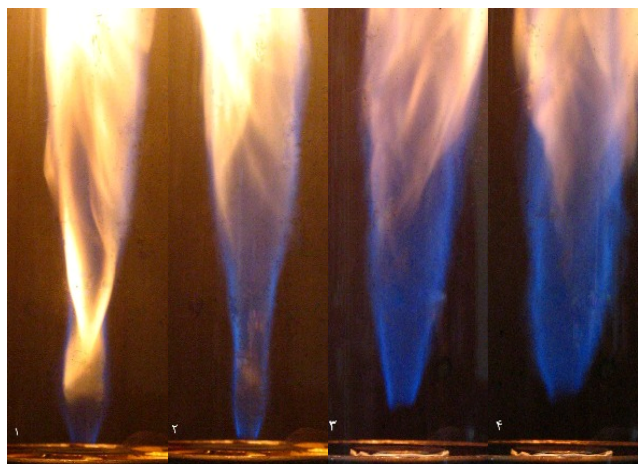
شکل ۹- تغییرات ارتفاع برخاستگی شعله با افزایش سرعت سوخت و عدد چرخش 0.8 و سرعت هوا 0.64 متر بر ثانیه
 $U_f=29.2$ m/s (۵) $U_f=26.6$ m/s (۴) $U_f=23.9$ m/s (۳) $U_f=21.2$ m/s (۲) $U_f=17.5$ m/s (۱)

در شکل (۱۰) میزان سرعت هوا ثابت و برابر 0.64 متر بر ثانیه، عدد چرخش برابر 0.8 و بدون رقیق سازی می باشد و مشاهده می شود که افزایش سرعت سوخت موجب بالا رفتن میزان ارتفاع برخاستگی شعله می شود. شکل (۱۰)، مقایسه ای از ارتفاع برخاستگی در حالت بدون رقیق سازی و با رقیق سازی آمده است. سرعت اکسید کننده در کلیه آزمایشات ثابت و برابر 0.64 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. از این شکل دو نکته برداشت می شود. اول آنکه در حالتی که نیتروژن به هوا افزوده شده است، شعله در سرعت های کم تری از روی نازل بلند می شود و دیگر آنکه همانطور که انتظار داشتیم با رقیق سازی هوا، میزان ارتفاع برخاستگی، افزایش می یابد. بیشترین میزان ارتفاع برخاستگی در 10% رقیق سازی رخ داده است که این مقدار در مقایسه با حالت بدون رقیق سازی به طور متوسط، حدود $9/5\%$ بیشتر است.



شکل ۱۰- تغییرات ارتفاع برخاستگی شعله در شرایط رقیق سازی و بدون رقیق سازی هوا و عدد چرخش 0.8

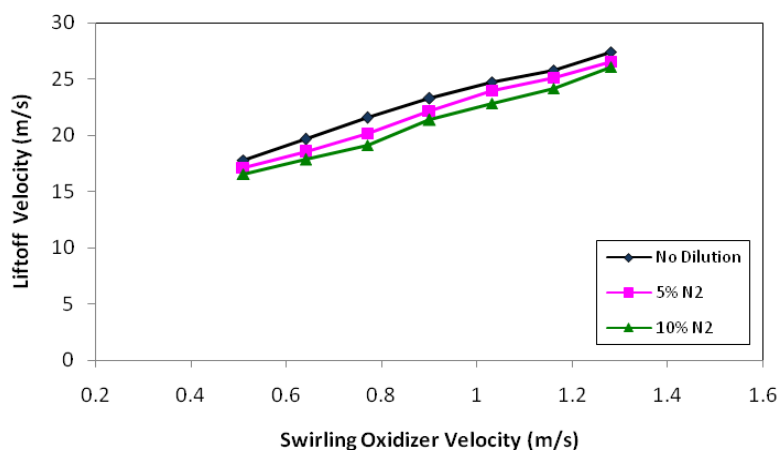
۳-۲-۲- اثر سرعت جریان سوخت و رقیق سازی هوا بر پایداری شعله با عدد چرخش $1/41$ (پره 60 درجه)
 با تغییر پره از 45 درجه به 60 درجه، عدد چرخش جدید به $1/41$ می رسد که همواره در محدوده جریان های با چرخش قوی قرار دارد. در این حالت، به دلیل زیاد شدن زاویه پره چرخاننده، سهم مولفه شعاعی سرعت خیلی بیشتر از سهم مولفه محوری سرعت نسبت به پره 45 درجه می شود. کم شدن سرعت در راستای محوری موجب بزرگتر شدن گرادیان فشار محوری بوجود آمده در راستای مرکز شعله می شود که باعث می شود حدود پایداری شعله نسبت به حالت قبل یعنی با پره 45 درجه، افزایش یابد. شکل (۱۱) رفتار شعله را با افزایش جریان سوخت نشان می دهد.



شکل ۱۱- تغییرات شکل شعله گاز طبیعی با افزایش سرعت سوخت و عدد چرخش $1/41$ و سرعت هوا $0/64$ متر بر ثانیه
 $U_f=26.6 \text{ m/s}$ (۴) . $U_f=18.6 \text{ m/s}$ (۳) . $U_f=17.2 \text{ m/s}$ (۲) . $U_f=8.1 \text{ m/s}$ (۱)

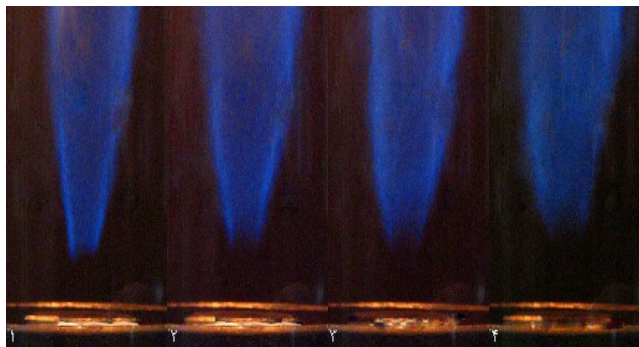
در این حالت رفتار شعله با عدد چرخش $1/41$ مانند عدد چرخش $0/8$ می باشد. در اینجا سرعت هوا ثابت و برابر $0/64$ متر بر ثانیه می باشد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش سرعت سوخت، پس از اینکه شعله وارد فاز مغشوش شد در یک سرعت بحرانی از نازل بلند می شود.

در آزمایشات مربوط به رقیق سازی هوا با گاز نیتروژن، با ثابت نگه داشتن عدد چرخش $1/41$ و سرعت اکسید کننده $0/64$ متر بر ثانیه، در دو حالت، 5% و 10% دبی اکسید کننده، نیتروژن به هوا افزوده شده است. همانطور که قبلاً ذکر شد، رقیق سازی موجب کاهش پایداری شعله می شود. نتایج این بخش از مطالعه نیز بیانگر نقش رقیق سازی در کاهش پایداری می باشد. چنانکه برای اکسید کننده چرخشی با سرعت $0/64$ متر بر ثانیه، میزان سرعت برخاستگی شعله با 5% رقیق سازی هوا، $6/4\%$ کمتر از سرعت برخاستگی بدون رقیق سازی و با هوای خالص می باشد. در شکل (۱۱) میزان سرعت برخاستگی در محدوده وسیعی از سرعت اکسید کننده نشان داده شده است.



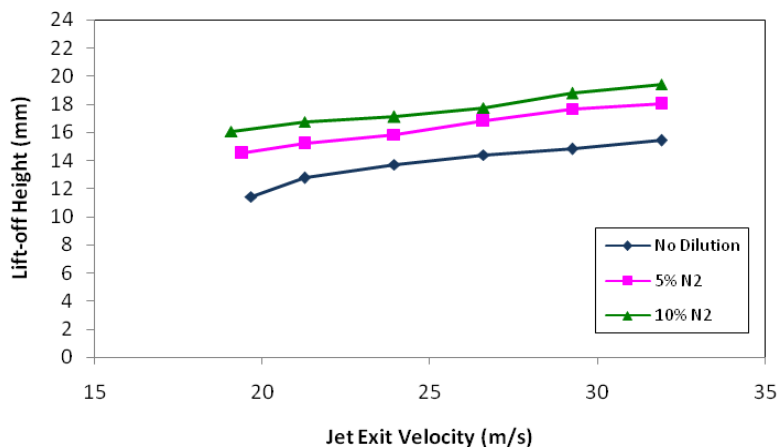
شکل ۱۱- تغییرات سرعت برخاستگی شعله در شرایط رقیق سازی و بدون رقیق سازی هوا و عدد چرخش $1/44$

شکل (۱۲) میزان ارتفاع برخاستگی را با افزایش سرعت سوخت نشان می دهد.



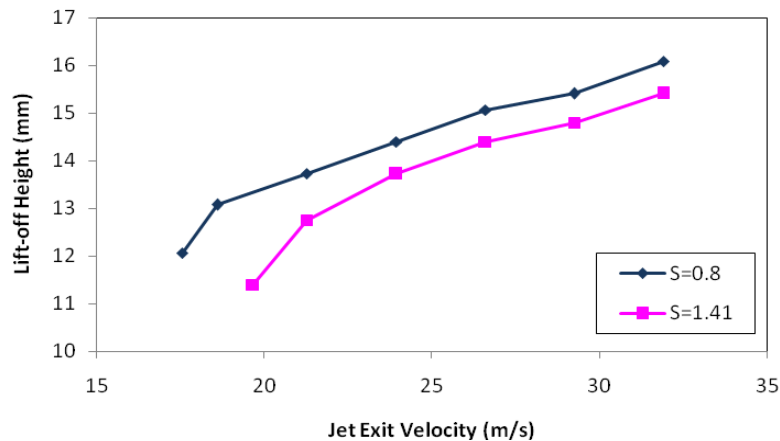
شکل ۱۲- تغییرات ارتفاع برخاستگی شعله با افزایش سرعت سوخت و عدد چرخش $1/41$ و سرعت هوا $0/64$ متر بر ثانیه
 $U_f=18.6 \text{ m/s}$ (۱) $U_f=23.9 \text{ m/s}$ (۲) $U_f=26.6 \text{ m/s}$ (۳) $U_f=29.2 \text{ m/s}$ (۴)

در اینجا با ثابت نگه داشتن سرعت هوا برابر $0/64$ متر بر ثانیه و عدد چرخش $1/41$ ، میزان ارتفاع برخاستگی شعله با افزایش سرعت سوخت مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج بیانگر آن هستند که میزان ارتفاع برخاستگی شعله با افزایش سرعت سوخت افزایش می یابد. این آزمایش برای محدوده گسترده ای از سرعت های هوا مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با افزودن 5% و 10% نیتروژن به سوخت، این پارامتر ثبت و بررسی شده است. شکل (۱۳) میزان ارتفاع برخاستگی را برای سرعت های مختلف هوا با رقیق سازی و بدون رقیق سازی هوا را نشان می دهد. مشاهده می شود که جدایش شعله در کمترین سرعت سوخت اتفاق می افتد و در حالتی که نیتروژن به هوا افزوده می شود، بیشترین مقدار ارتفاع برخاستگی در افزایش 10% نیتروژن به هوا رخ می دهد. با مقایسه نتایج در یک سرعت بخصوص برای سوخت $21/26$ متر بر ثانیه، میزان ارتفاع برخاستگی در احتراق با هوای خالص $12/75$ میلیمتر می باشد که این مقدار با افزایش 5% نیتروژن به هوا به $15/2$ میلیمتر و بیشترین ارتفاع برخاستگی، با افزودن 10% نیتروژن به هوا بدست می آید که برابر $16/75$ میلیمتر می باشد.



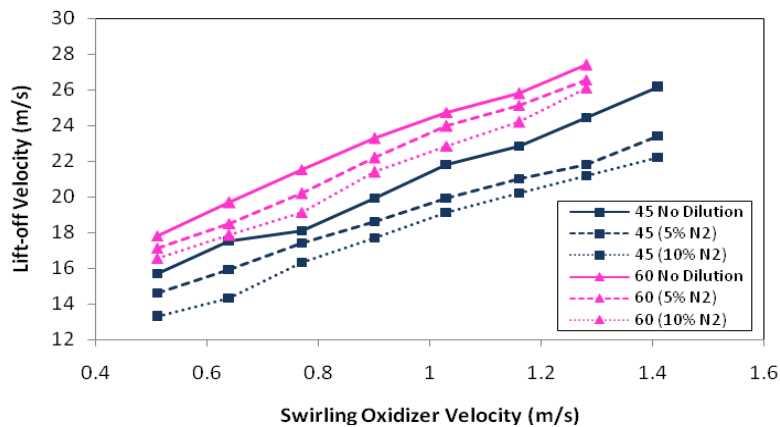
شکل ۱۳- تغییرات ارتفاع برخاستگی شعله در شرایط رقیق سازی و بدون رقیق سازی هوا و عدد چرخش $1/41$

۳-۲-۳- اثر افزایش عدد چرخش در پایداری شعله در ناحیه چرخش قوی همانطور که قبلاً ذکر شد، افزایش عدد چرخش موجب افزایش پایداری شعله می شود. در شکل (۱۴) مقایسه ای از میزان ارتفاع برخاستگی بوجود آمده توسط پره های چرخاننده 45 درجه و 60 درجه نشان داده شده است



شکل ۱۴- تاثیر عدد چرخش بر ارتفاع برخاستگی

در این بررسی، میزان سرعت هوا ثابت و برابر 0.64 متر بر ثانیه است و هوا به صورت خالص و بدون رقیق سازی وارد محفظه احتراق می شود. استفاده از پره 60° درجه، عدد چرخش را به $1/41$ افزایش می دهد. با توجه به شکل (۱۴) می توان دریافت که در چرخش های بالا برای داشتن شعله بلند شده از سر مشعل، نیاز به سرعت های بالاتری داریم. بطوریکه با چرخش 0.8 ، سرعت برخاستگی $17/55$ متر بر ثانیه است در حالیکه برای جدایش شعله با عدد چرخش $1/41$ ، سرعت خروجی سوخت باید به $19/67$ متر بر ثانیه افزایش یابد. دلیل آن اینست که در چرخش های بالا به خاطر کاهش مولفه سرعت محوری و بوجود آمدن گرادیان فشار معکوس محوری با شدت بالا، به سرعت خروجی بیشتری برای سوخت برای غلبه بر گرادیان فشار و بلند شدن شعله نیاز داریم.



شکل ۱۵- تاثیر عدد چرخش بر سرعت برخاستگی شعله

شکل (۱۵) مقایسه کاملی از میزان سرعت برخاستگی شعله در چرخش های 0.8 و $1/41$ را همراه با افزودن 5% و 10% نیتروژن به هوا بعنوان رقیق ساز، نشان می دهد. تاثیر مثبت افزایش چرخش در افزایش سرعت برخاستگی کاملاً مشخص است. بطوریکه در شرایط کاملاً یکسان برای سرعت هوا و بدون رقیق سازی، با افزایش عدد چرخش از 0.8 به $1/41$ ، میزان سرعت برخاستگی بطور متوسط 14% افزایش می یابد.



۴- نتیجه گیری

نتایج بدست آمده در دو بخش جریان کم چرخش و جریان با چرخش زیاد قابل بررسی می باشند. در بخش جریان کم چرخش، مشاهده شد که با ثابت نگه داشتن سرعت هوا و افزایش پیوسته جریان سوخت، شعله از روی نازل بلند شده و در سرعت های بالاتر دچار خاموشی می شود. با افزایش سرعت هوا، میزان سرعت برخاستگی و سرعت خاموشی افزایش می یابد. این افزایش پایداری به دلیل بوجود آمدن ناحیه بازگردش گوشه ای در جریان کم چرخش می باشد. در بخش رقیق سازی هوا با گاز نیتروژن مشاهده شد که رقیق سازی حدود پایداری را کاهش می دهد که این کاهش با افزایش درصد رقیق سازی بیشتر شده ولی حضور جریان چرخشی و جریان های بازگردشی بوجود آمده اثر منفی رقیق سازی در پایداری شعله را کاهش می دهند. در بخش جریان های با چرخش بالا، مشاهده شد که دلیل بوجود آمدن جریان بازگردشی قوی در مرکز شعله، با افزایش سرعت سوخت، شعله از روی نازل سوخت بلند شده و در فاصله کمی از نازل قرار می گیرد. افزایش بیشتر سرعت سوخت موجب افزایش ارتفاع برخاستگی شعله می شود. همچنین مشاهده شد که میزان ارتفاع برخاستگی در حالت رقیق سازی هوا افزایش یافته و بیشترین ارتفاع در رقیق سازی هوا با ۱۰٪ نیتروژن بدست آمد

مراجع

- 1- Beer, J. M .and Chigier N. A., "Combustion Aerodynamics," Applied Science Publishers Ltd, 1972.
- 2- Gupta, A.K., Lilley, D.G., and Syred N. "Swirl Flows", Abacus Press, Cambridge, 1984.
- 3- Feikema, D. Chen, R.H . Driscoll, J.F. "Enhancement of blowout limits by the use of swirl," Combustion and Flame, Vol.80 ,pp.183-195, 1990.
- 4- Buckley, P.L., Craig, R.R., Davis, D.L. and Schartzkopf, K.G., "The design and combustion performance of practical swirlers for integral rocket/ramjet," AIAA, vol.21(5), pp 740-743, 1983.
- 5- Mathur, M.L and Maccallum, N.R.L., "Swirling air tesys issuing from vane swirlers," Journal of institute of Fuel, Vol.41, pp.238-240, 1976.
- 6- Yuasa, S. "Effects of swirl on stability of jet diffusion flames," Combustion and Flame, vol.66, pp.181-192, 1986.
- 7- Philipp, M. Haffman, S. Habisreuter, P. Lenze, B. "experimental and numerical study concerning stabilization of strongly swirling premixed and non-premixed flames," Twenty-fourth symposium (International) on combustion/ The Combustion Institute, pp.361-368, 1992.
- 8- Ruan, J., Kobayashi, H., and Niioka, T., "Effects of dilutions on structure and stability of axisymmetric lifted laminar diffusion flames", 3rd Asia-pacific conference on combustion (ASPACC), 2001.
- 9- Kalghatgi, G.T, "Lift-off Heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air ", Combustion Science and Technology, Vol. 41, Issue 1 & 2, pp. 17-29, 1984.
- 10- Chao Y.c, Wu C.Y, Lee.k.Y "Effects of dilution on blow-out limits of turbulent jet flames", Combustion Science and Technology, Vol.176, pp. 1735-1753, 2004.
- 11- Takeno, T., "Transition and structure of jet diffusion flames," Twenty fifth symposium (international) on combustion, pp.1061-1073, 1992.