

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

امیر روحانی<sup>۱\*</sup>، صادق تابع جماعت<sup>۱\*\*</sup> و ایوب عادل<sup>۲\*\*\*</sup>

۱- دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوافضا

۲- تهران، خیابان ولیعصر، خیابان بزرگمهر، شماره ۳۶، واحد ۸، شرکت تولیدی مهندسی شعله صنعت

(دریافت: ۱۳۸۹/۱/۲۰، پذیرش: ۱۳۸۹/۷/۱۴)

در پژوهش حاضر، مطالعه تجربی پایداری شعله غیر پیش آمیخته گاز طبیعی با هوای چرخشی و رقیق سازی همزمان هوا با گاز نیتروژن بررسی قرار شده است. برای تولید چرخش از پره های چرخاننده با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه استفاده شده است. در طی آزمایش ها 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 سرعت های بالاتر دچار خاموشی می شود. در جریان با چرخش قوی، شعله در فاصله کمی از نازل سوخت بلند شده و بسیار پایدار است. 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 هواست. با اعمال چرخش بر هوای رقیق شده دیده می شود که چرخش، اثرات منفی رقیق سازی هوا را کاهش داده و موجب افزایش پایداری شعله می شود.

واژگان کلیدی: احتراق چرخشی، شعله غیر پیش آمیخته، رقیق سازی، گاز طبیعی

### مقدمه

امروزه استفاده از جریان های چرخشی در طراحی سیستم های احتراقی با بازده بالا و کاهش آلاینده ها در آن ها بسیار مورد توجه است. جریان های چرخشی به منظور افزایش پایداری شعله ها در کوره ها، توربین های گازی، دیگ های بخار، مشعل ها و موتورهای احتراق داخلی کاربرد گسترده ای دارند. اثرات کلی چرخش بر ساختار جریان به خوبی 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 است. بیر و چیگی<sup>[۱]</sup> جریان های چرخشی با چرخش های مختلف را بررسی کردند. آن ها 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 (Gaussian) است و بیشینه سرعت در راستای محوری است. با افزایش شدت چرخش، میزان مولفه شعاعی سرعت افزایش می یابد. در چرخش قوی، به دلیل به وجود آمدن اختلاف فشار در جهت معکوس محوری، جریان بازگشتی ایجاد شده و ناحیه بازگردش مرکزی (Central Recirculation Zone) CRZ 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 هم دما و احتراقی انجام شده است. در اینجا چندین مطالعه از جریان های چرخشی مورد بازبینی

\* کارشناس ارشد - نویسنده مخاطب (ایمیل: [rowhani@aut.ac.ir](mailto:rowhani@aut.ac.ir))

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

\*\*\* مدیر عامل شرکت تولیدی مهندسی شعله صنعت (ایمیل: [info@sholehsanat.com](mailto:info@sholehsanat.com))

قرار گرفته است. گوپتا و همکاران مطالعات گسترده‌ای بر روی جریان‌های چرخشی انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که با استفاده از جریان‌های چرخشی، پایداری شعله در محفظه احتراق به دلیل به وجود آمدن ناحیه بازگردش افزایش یافته و طول شعله نیز کاهش می‌یابد و اختلاط جریان به ویژه در منطقه لایه برشی (Shear Layer) افزایش می‌یابد [۲]. فیکما و همکاران در دانشگاه میشیگان در یک سری تحقیقات بر روی یک مشعل نفوذی چرخشی، تاثیر میزان چرخش بر افزایش پایداری شعله را بررسی کردند. ایشان نشان دادند که چرخش جریان می‌تواند شعله را تا حد بسیار بالاتری (بر اساس بیشینه سرعت سوخت) نسبت به حالت بدون چرخش پایدار سازد [۳]. کر با اندازه‌گیری مولفه‌های شعاعی و محوری سرعت نشان داد که اعمال چرخش موجب کاهش سرعت محوری شده، جبهه شعله به مشعل نزدیک شده و همچنین باعث افزایش پایداری شعله می‌شود [۴]. متور و همکاران پایداری شعله نفوذی را با هوای چرخشی با شدت چرخش مختلف بررسی کردند و بیان کردند چرخش به اندازه کافی قوی باعث به وجود آمدن ناحیه بازگردش مرکزی در مرکز محفظه احتراق می‌شود که این ناحیه با قطر محفظه احتراق نیز متناسب است [۵].

یوآسا با چرخش دادن همزمان سوخت و هوا، حدود پایداری شعله غیر پیش آمیخته پروپان و هیدروژن را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که نتایج حالت کم چرخش بسیار مشابه حالت بدون چرخش است اما در چرخش‌های بالاتر، مشابه تحقیق‌های قبلی به دلیل پدید آمدن ناحیه بازگردش در نزدیک خروجی نازل سوخت، محدوده پایداری شعله افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین بیان کردند چرخش همزمان سوخت و هوا، باعث افزایش پایداری شعله نسبت به حالت هوای چرخشی با سوخت بدون چرخش، می‌شود [۶]. باکلی و همکاران تاثیر چرخش‌های مختلف را بر بازده یک محفظه احتراق و تشکیل آلاینده‌ها بررسی کردند و مشاهده کردند که اعمال چرخش موجب کاهش  $NO_x$  و CO و همچنین افزایش بازده محفظه احتراق می‌شود. تحقیقات متعددی بر روی رقیق‌سازی اکسیدکننده در شعله‌های غیر پیش آمیخته انجام شده است. درخصوص رقیق‌سازی سوخت و اکسیدکننده، کارهای زیادی در گذشته انجام شده و همواره بر تاثیر منفی رقیق‌سازی بر پایداری شعله تاکید شده است [۷]. روان و همکاران اثر رقیق‌سازی اکسیژن با نیتروژن و دی اکسید کربن را بر پایداری شعله آرام متان به صورت تجربی و عددی بررسی کردند و نشان دادند که اثر دی اکسید کربن بر روی پایداری شعله بیشتر از نیتروژن است [۸]. چائو و همکاران سرعت خاموشی شعله غیر پیش آمیخته متان، پروپان و هیدروژن با اکسیدکننده هوا، همراه با رقیق‌سازی با نیتروژن و دی اکسید کربن را بررسی کردند و ضمن تاکید بر کاهش حدود پایداری همراه با رقیق‌سازی، سرعت‌های خاموشی را با نظریه‌های خاموشی شعله تخمین زدند [۹]. ویلسون و همکاران اثر رقیق‌سازی هوا را بر پایداری شعله غیر پیش آمیخته متان و اتیلن رقیق شده با نیتروژن بررسی کرده و دریافتند رقیق‌سازی موجب کاهش سرعت‌های پایداری شعله می‌شود [۱۰].

براساس دانش نویسنده، تاکنون پژوهشی در زمینه اثر رقیق‌سازی در شعله‌های چرخشی انجام نشده و تحقیقات انجام شده فقط در مورد رقیق‌سازی اکسیدکننده در شعله‌های هم‌محور (Co-flow) است که به برخی از آنها اشاره شد. از دیدگاه کاربردی، مطالعه چرخش جریان بر پایداری شعله و کاهش آلاینده‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. تا به حال تحقیقات جامعی در خصوص بررسی چرخش‌های مختلف در ایران انجام نشده است. در کار حاضر، ضمن آماده‌سازی یک بستر آزمایشگاهی برای بررسی اثرات مختلف چرخش، پایداری شعله گاز طبیعی مورد مطالعه قرار گرفت و همچنین اثر رقیق‌سازی هوای چرخشی بر شعله گاز طبیعی نیز بررسی شد.

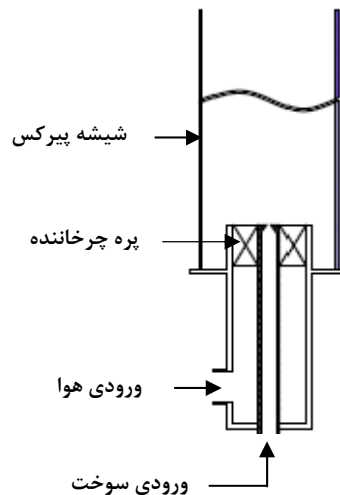
## تجهیزات و روش آزمایش

به منظور بررسی اثر چرخش، از یک مشعل غیر پیش آمیخته چرخشی استفاده شده است. در این مشعل سوخت و هوای چرخشی به صورت هم‌محور وارد محفظه احتراق می‌شوند. سوخت گازی از طریق نازل سوخت به قطر ۳ میلی‌متر که در مرکز مشعل قرار گرفته است وارد محفظه می‌شود. هوای مورد نیاز از اطراف نازل سوخت به صورت هم‌محور پس از عبور از پره‌های چرخاننده وارد محفظه می‌شود. 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 پره‌های چرخاننده با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه استفاده شده است. در شکل (۱) پره‌های چرخاننده و در شکل (۲)، طرحواره مشعل چرخشی نشان داده شده‌اند.



شکل ۱- پره‌های چرخاننده: (۱) ۳۰درجه، (۲) ۴۵درجه، (۳) ۶۰ درجه



شکل ۲- طرحواره مشعل چرخشی

جهت تامین هوای مورد نیاز برای احتراق از یک کمپرسور که قادر به تولید هوا با فشار ۱۰ اتمسفر است استفاده شده است. هوا پس از عبور از خشک‌کن و فیلترهای مناسب، خشک و ذرات معلق آن گرفته می‌شود. دبی جریان‌های سوخت و اکسیدکننده توسط روماترهای تعبیه شده در مسیر تغذیه مشعل با دقت  $\pm 0.2\%$  درصد اندازه‌گیری شده است. برای تصویربرداری از دوربین دیجیتال (Canon Power Shot G6) با سرعت ۲ تصویر در ثانیه استفاده شده است. جریان‌های سوخت و اکسیدکننده در دمای محیط ( $25^{\circ}\text{C}$ ) هستند.

### محاسبه عدد چرخش

عدد چرخش به صورت شار محوری تکانه (Momentum) چرخشی تقسیم بر شار محوری تکانه محوری تعریف می‌شود. برای محاسبه عدد چرخش برای یک پره چرخاننده به قطر داخلی  $d_i$  و قطر خارجی  $d_o$  از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲].

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

برای محاسبه عدد چرخش مطابق رابطه (۱)، فقط به متغیرهای هندسی پره یعنی قطر داخلی، قطر خارجی و زاویه پره نیاز است. به همین دلیل عدد فوق را عدد هندسی چرخش می‌نامند [۲]. در این تحقیق اعداد چرخش برای پره‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه با توجه به رابطه (۱) مقادیر ۰/۴۶، ۰/۸ و ۱/۴۱ محاسبه می‌شود. با توجه به تقسیم‌بندی جریان‌های چرخشی توسط بیر، با استفاده از پره ۳۰ درجه در محدوده جریان کم چرخش و پره ۴۵ و ۶۰ درجه در محدوده جریان‌های با چرخش زیاد قرار می‌گیریم [۱].

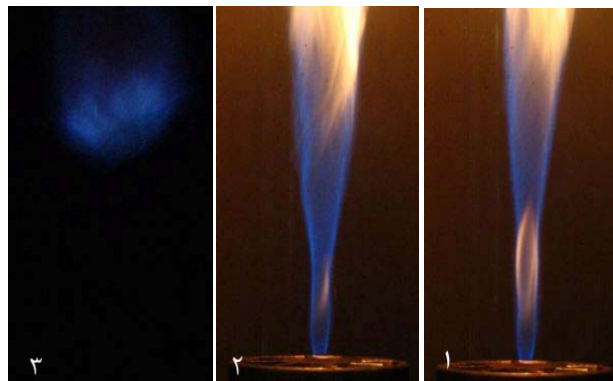
## بحث و بررسی نتایج

نتایج به دست آمده در این مطالعه، به دو بخش احتراق کم چرخش و احتراق با چرخش زیاد تقسیم می‌شوند. در هر دو بخش، آزمایش‌ها با اکسیدکننده هوا و همچنین هوای رقیق شده با نیتروژن انجام شده‌اند. در بخش مطالعه رقیق‌سازی هوا، به میزان ۵ درصد و ۱۰ درصد دبی کل اکسیدکننده به هوا نیتروژن افزوده شده است. در کلیه آزمایش‌ها 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 نمی‌دهد. متغیرهای مورد بررسی در بخش چرخش کم، سرعت برخاستگی (Lift-off Velocity) و سرعت خاموشی (Blow out Velocity) است. در بخش چرخش زیاد، در اثر محدودیت فشار گاز آزمایشگاه، قادر به مشاهده خاموشی شعله گاز طبیعی به دلیل پایداری زیاد شعله نبودیم. لذا فقط متغیرهای سرعت برخاستگی و ارتفاع برخاستگی (Lift-off Height) اندازه‌گیری شده‌اند.

## احتراق غیر پیش آمیخته کم چرخش

دلیل اولیه استفاده از چرخش، افزایش سطح شعله و افزایش پایداری شعله به واسطه نرخ کاهش سرعت محوری و پدید آمدن مولفه سرعت شعاعی است. در جریان‌های کم چرخش، سهم مولفه محوری بیشتر از مولفه شعاعی است. افزایش عدد چرخش موجب کاهش مولفه محوری شده که سبب پایداری بیشتر شعله می‌شود. رفتار جریان‌های کم چرخش را می‌توان با جریان بدون چرخش (No Swirl Flow) مقایسه کرد. در جریان‌های هم‌محور 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 می‌شود [۱۱]. 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 آلاینده‌های احتراق به ویژه  $NO_x$  می‌شود.

برای درک و مشاهده رفتار احتراق کم چرخش در آزمایش‌های انجام شده برای تولید هوای چرخشی، از پره چرخاننده ۳۰ درجه استفاده شده است. طبق رابطه ارائه شده برای محاسبه عدد چرخش، پره ۳۰ درجه، عدد چرخش ۰/۴۶ را به وجود می‌آورد. در هر مرحله از آزمایش‌ها، با ثابت نگه داشتن سرعت هوا، سرعت سوخت به تدریج افزایش می‌یابد. با این افزایش تدریجی سرعت سوخت، دیده می‌شود که شعله ابتدا وارد فاز مغشوش شده و در یک سرعت بحرانی که به آن سرعت برخاستگی گفته می‌شود، شعله از سر نازل بلند می‌شود. شعله بلند شده، در فاصله زیادی از سر نازل قرار گرفته و نیز بسیار ناپایدار بوده و دارای نوساناتی بر روی سر مشعل است، لذا فقط سرعتی که در آن برخاستگی رخ می‌دهد ثبت شده و از اندازه‌گیری ارتفاع برخاستگی صرف‌نظر شده است. با افزایش بیشتر سرعت سوخت، شعله بلند شده به تدریج از نازل فاصله گرفته و خاموش می‌شود. رفتار احتراق کم چرخش با افزایش سرعت سوخت در شکل (۳) به خوبی نشان داده شده است.

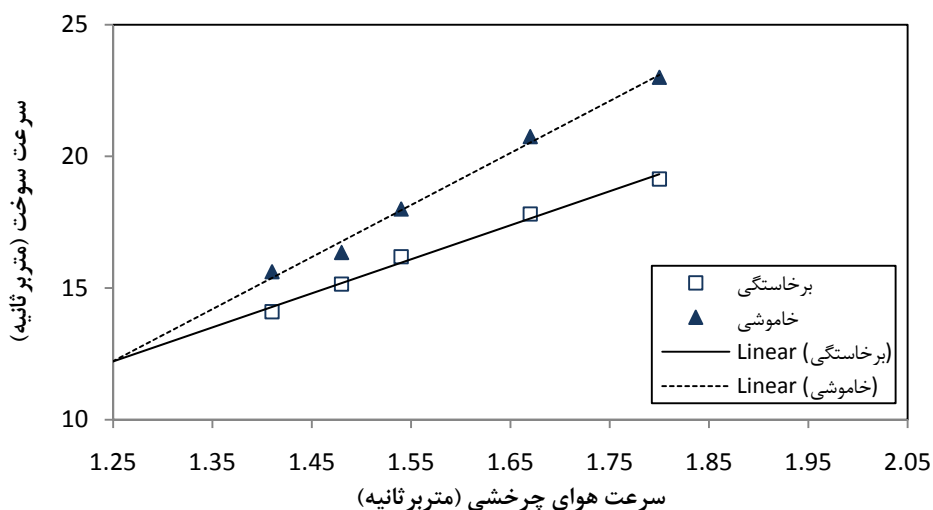


شکل ۳- تغییرات شکل شعله گاز طبیعی با افزایش سرعت سوخت، در عدد چرخش ۰/۴۶ و سرعت هوای ۰/۶۴ متر بر ثانیه

$$U_T = 16/2 \text{ m/s (3), } U_T = 14/8 \text{ m/s (2), } U_T = 13/3 \text{ m/s (1)}$$

### اثر سرعت جریان سوخت بر پایداری شعله با اکسید کننده هوا

در آزمایش‌های این بخش، با ثابت نگه داشتن سرعت هوا، سرعت سوخت به تدریج افزایش می‌یابد تا شعله از روی نازل بلند شده و پس از آن خاموشی رخ دهد. این آزمایش در محدوده‌ای از سرعت‌های هوا (سرعت هوا بین ۱/۴۱ متر بر ثانیه تا ۱/۸۵ متر بر ثانیه است) تکرار شده و سرعت‌های برخاستگی و خاموشی ثبت شده‌اند. هدف از انجام این آزمایش، مطالعه اثر سرعت هوای چرخشی بر پایداری شعله است. همه آزمایش‌ها در دو بخش چرخش کم و چرخش زیاد، چندین بار انجام شده و نتایج به دست آمده در همه دفعات آزمایش بسیار به هم نزدیک بوده‌اند که این مطلب نشان دهنده تکرارپذیر بودن کلیه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق است. خطای بسیار کم دیده شده در نتایج هر بخش، مربوط به خطای انسانی در خواندن داده‌ها بوده که قابل صرف‌نظر بوده است. شکل (۴) نتایج به دست آمده از میزان سرعت برخاستگی و همچنین سرعت خاموشی شعله را در محدوده گسترده‌ای از سرعت‌های هوا نشان می‌دهد. با افزایش سرعت هوا، میزان سرعت برخاستگی و سرعت خاموشی افزایش یافته و دیده می‌شود که شیب نمودار خاموشی به طور متوسط بیشتر از شیب نمودار برخاستگی شعله است که این مطلب بیانگر تاثیر سرعت هوای چرخشی در افزایش پایداری شعله است. دلیل این افزایش را می‌توان این گونه توصیف کرد که افزایش سرعت هوا، موجب زیاد شدن مولفه‌های سرعت و افزایش شدت ناحیه بازگردش گوشه‌ای شده که در نهایت پایداری شعله را بهبود می‌بخشد.

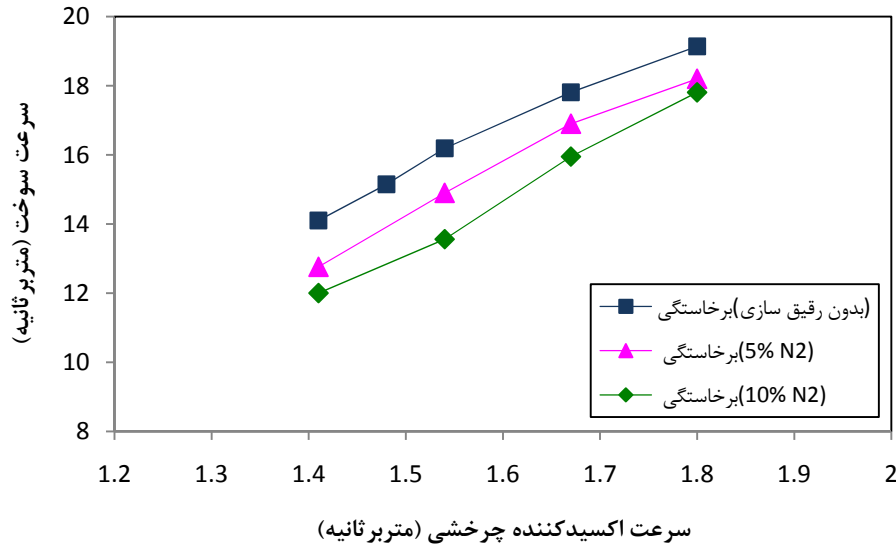


شکل ۴- تغییرات سرعت برخاستگی و خاموشی نسبت به سرعت هوای چرخشی

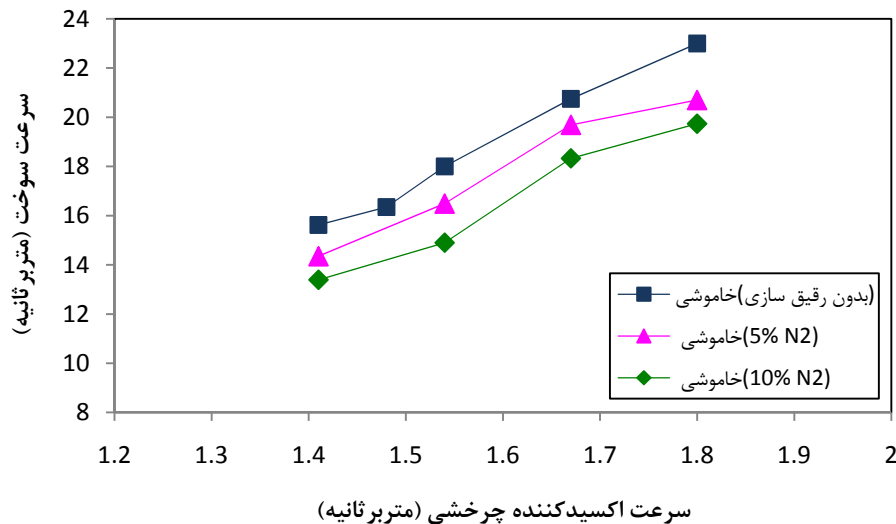
### اثر سرعت جریان سوخت بر جدایش و خاموشی شعله در شرایط رقیق‌سازی اکسید کننده

محدوده پایداری احتراق گاز طبیعی با هوای کم چرخش، در شرایط رقیق‌سازی هوا نیز بررسی شده است. بدین منظور از گاز نیتروژن برای رقیق‌سازی هوا استفاده شده است. در دو حالت به میزان ۵ درصد و ۱۰ درصد دبی اکسید کننده، نیتروژن به هوا افزوده شده و هوای رقیق شده پس از عبور از پره‌های چرخاننده وارد محفظه احتراق می‌شود. مشابه حالت بدون رقیق‌سازی، با ثابت نگه داشتن سرعت هوای رقیق شده با نیتروژن در هر مرحله، سرعت سوخت به تدریج افزایش داده شده و میزان سرعت‌های برخاستگی و خاموشی ثبت شده‌اند. محدوده تغییر سرعت اکسید کننده از ۱/۴۱ متر بر ثانیه تا ۱/۸۵ متر بر ثانیه است. به منظور بررسی دقیق نتایج، نمودار سرعت جدایش شعله در شکل (۵) و منحنی سرعت خاموشی در شکل (۶) به صورت جداگانه نشان داده شده‌اند. رقیق‌سازی اکسید کننده به دلیل کاهش اکسیژن در منطقه واکنش موجب کاهش پایداری شعله می‌شود. با توجه به نتایج سرعت جدایش شعله در شکل (۵) دیده می‌شود که افزودن ۵ درصد نیتروژن به هوا باعث کاهش ۷/۹ درصد سرعت جدایش نسبت به حالت بدون رقیق‌سازی و افزودن ۱۰ درصد نیتروژن موجب کاهش ۱۶/۲ درصد 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 شکل (۶)، رقیق سازی هوا با ۵ درصد نیتروژن، سرعت خاموشی را به میزان ۸/۳ درصد نسبت به حالت بدون رقیق سازی، و با افزودن ۱۰ درصد نیتروژن، سرعت خاموشی ۱۷/۲ درصد نسبت به حالت بدون رقیق سازی کاهش می یابد. آزمایش های مربوط به رقیق سازی اکسیدکننده در این بخش مانند سایر آزمایش های گذشته تکرار پذیر بوده و نتایج مندرج در نمودارها پس از چندین تکرار، ثبت شده اند.



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



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

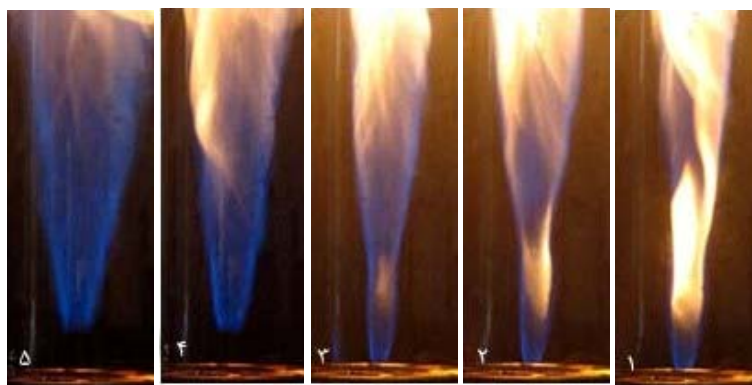
### احتراق غیر پیش آمیخته با چرخش زیاد

همان طور که در مقدمه مطرح شد، وقتی میزان چرخش از یک حد بیشتر شود ( $S > 0.6$ )، جریان های برگشتی تولید می شوند. این جریان ها باعث برگشت محصولات احتراق به منطقه واکنش شده و دمای مخلوط واکنش را افزایش می دهد که به موجب

آن تعداد واکنش‌ها افزایش یافته و شدت احتراق نیز افزایش می‌یابد. جریان‌های برگشتی تولید شده در جریان‌های با چرخش زیاد، به شدت پایداری شعله را افزایش می‌دهند. با افزایش عدد چرخش طول شعله کوتاه‌تر شده و نرخ استهلاک مولفه‌های سرعت محوری و چرخشی افزایش می‌یابد [۲]. این کاهش در مولفه سرعت محوری باعث پدید آمدن اختلاف فشار در راستای محور شده و سبب افزایش پایداری شعله می‌شود. در آزمایش‌های این بخش، با استفاده از دو پره ۴۵ و ۶۰ درجه، هوای چرخشی با چرخش قوی پدید می‌آید. برای هر دو پره، آزمایش‌ها با اکسیدکننده هوا و همین‌طور با هوای رقیق شده با نیتروژن انجام شده‌اند. در اینجا به دلیل محدودیت فشار سوخت آزمایشگاه قادر به مشاهده خاموشی شعله نبودیم و فقط سرعت ارتفاع برخاستگی شعله ثبت شده‌اند. در تمامی آزمایش‌های این بخش، با ثابت نگه داشتن سرعت هوا و عدد چرخش، سرعت سوخت به تدریج افزایش یافته تا زمانی که شعله از روی نازل بلند شده و در فاصله‌ای نسبتاً نزدیک به نازل سوخت بدون نوسان، پایدار می‌شود. سرعتی که در آن شعله بلند می‌شود (سرعت برخاستگی) در محدوده گسترده‌ای از سرعت‌های هوا (از ۰/۴ متر بر ثانیه تا ۱/۶ متر بر ثانیه) برای دو عدد چرخش ۰/۸ و ۱/۴۱ و همچنین در دو حالت بدون رقیق‌سازی و با رقیق‌سازی هوا به دست آمده است. برای اندازه‌گیری ارتفاع برخاستگی، در هر مرحله از آزمایش‌ها با ثابت نگه داشتن کلیه متغیرها (عدد چرخش، سرعت اکسیدکننده و رقیق‌سازی) با افزایش سرعت سوخت، در چند نقطه از شعله با دوربین دیجیتال عکس‌برداری مستقیم شده است. با استفاده از نرم‌افزار فتوشاپ، فاصله پایین‌ترین بخش شعله (بخش مرئی شعله) تا سر مشعل اندازه‌گیری و ثبت شده است. این مقادیر به عنوان ارتفاع برخاستگی گزارش شده‌اند.

#### اثر سرعت جریان سوخت و رقیق‌سازی 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 دیده می‌شود و آن بلند شدن شعله از روی 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 و بدون رقیق‌سازی هوا، نشان می‌دهد.



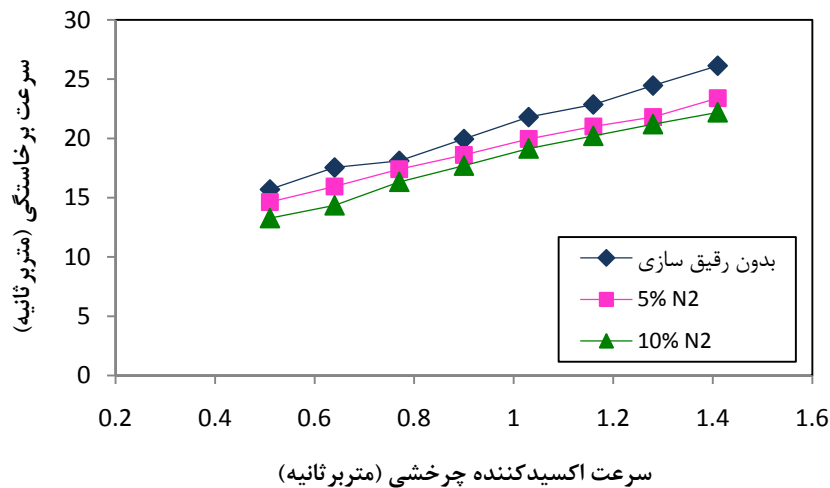
شکل ۷- تغییرات شکل شعله گاز طبیعی با افزایش سرعت سوخت در عدد چرخش ۰/۸، سرعت هوا ۰/۶۴ متر بر ثانیه و بدون رقیق‌سازی هوا. (۱.  $U_f = 12/8$  m/s (۲.  $U_f = 14/9$  m/s (۳.  $U_f = 16/8$  m/s (۴.  $U_f = 17/5$  m/s (۵.  $U_f = 24/5$  m/s

در این شکل‌ها، سرعت هوا ثابت و برابر ۰/۶۴ متر بر ثانیه و پره ۴۵ درجه با عدد چرخش متناظر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. با افزایش سرعت سوخت تا سرعت‌های کمتر از ۱۳ متر بر ثانیه شعله آرام است. با افزایش سرعت سوخت و ورود به فاز مغشوش، شعله از نازل جدا شده و در فاصله نزدیک به سر مشعل قرار می‌گیرد. برای سرعت هوای ۰/۶۴ متر بر ثانیه، سرعت برخاستگی برابر ۱۷/۵ متر بر ثانیه است. با افزایش سرعت سوخت میزان ارتفاع برخاستگی افزایش یافته و انتظار می‌رود که در سرعت‌های بالاتر سوخت، شعله دچار خاموشی شود. 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 صرف‌نظر شده است.

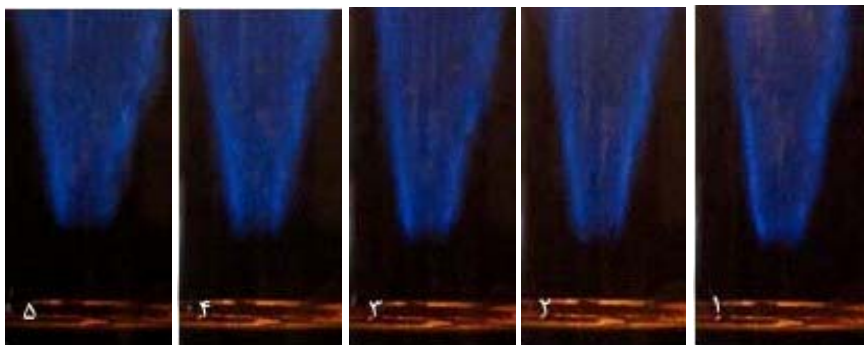


در بخش رقیق‌سازی هوا، آزمایش‌ها در دو درصد مختلف رقیق‌سازی انجام شده‌اند. به عنوان نمونه با ثابت نگه داشتن عدد چرخش به میزان  $0/8$  و همچنین سرعت اکسید کننده برابر با  $0/64$  متر بر ثانیه، در دو حالت به میزان  $5$  درصد و  $10$  درصد دبی اکسید کننده، نیتروژن به هوا افزوده شده است. به دلیل آنکه رقیق‌سازی باعث کاهش میزان اکسیژن حاضر در فضای واکنش می‌شود، موجب کاهش پایداری شعله شده و باعث می‌شود که برخاستگی شعله در سرعت‌های پایین‌تری نسبت به حالت بدون رقیق‌سازی رخ دهد. رقیق‌سازی موجب افزایش ارتفاع برخاستگی نیز می‌شود. به طوری که با توجه به نتایج، با ثابت نگه داشتن سایر متغیرها 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 رقیق‌سازی و برابر با  $13/73$  میلی‌متر با افزایش  $5$  درصد نیتروژن به هوا و برابر با  $14/7$  میلی‌متر با افزایش  $10$  درصد نیتروژن به هواست که این مطلب بیانگر افزایش  $5$  درصدی میزان ارتفاع برخاستگی شعله به ازای افزایش  $5$  درصد نیتروژن به هواست.

شکل (۸)، مقایسه‌ای از میزان سرعت برخاستگی به ازای عدد چرخش  $0/8$ ، بدون رقیق‌سازی و همراه با رقیق‌سازی هوا، در محدوده گسترده‌ای از سرعت‌های هوا یعنی از  $0/51$  متر بر ثانیه تا  $1/41$  متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه‌ای از تصاویر ثبت شده با دوربین دیجیتال از ارتفاع برخاستگی شعله، در حالتی که سرعت هوای بدون رقیق‌سازی برابر با  $0/64$  متر بر ثانیه و عدد چرخش  $0/8$  است، شکل (۹) ارائه شده است. تصاویر ارتفاع برخاستگی در حالت رقیق‌سازی در مقایسه با حالت بدون رقیق‌سازی از نظر ظاهری تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشتند. بدین جهت از آوردن آن‌ها صرف نظر شده است.



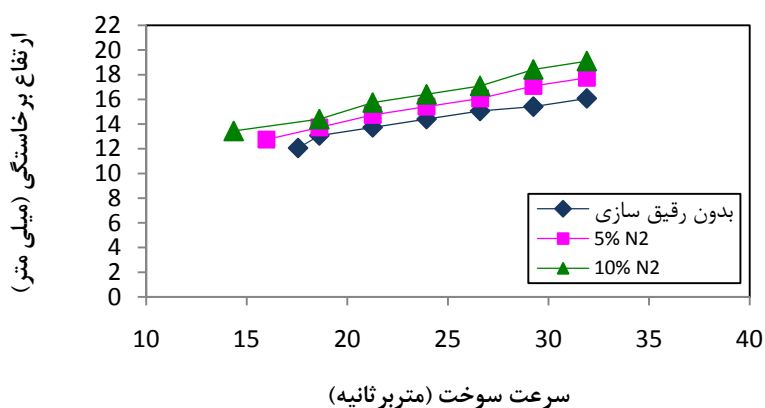
شکل ۸- تغییرات سرعت برخاستگی شعله در شرایط رقیق‌سازی و بدون رقیق‌سازی هوا و در عدد چرخش  $0/8$



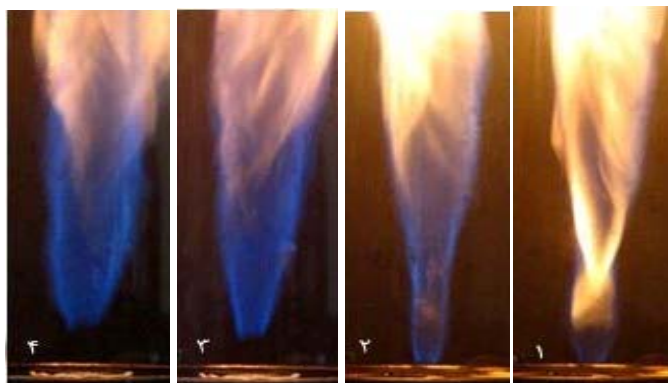
شکل ۹- تغییرات ارتفاع برخاستگی شعله با افزایش سرعت سوخت در عدد چرخش  $0/8$ ، سرعت هوا  $0/64$  متر بر ثانیه و در شرایط بدون رقیق‌سازی. (۱،  $U_f = 17/5$  m/s) (۲،  $U_f = 21/2$  m/s) (۳،  $U_f = 23/9$  m/s) (۴،  $U_f = 26/6$  m/s) (۵،  $U_f = 29/2$  m/s)



شکل (۱۰) مقایسه‌ای از میزان ارتفاع برخاستگی در حالت بدون رقیق‌سازی و همراه با رقیق‌سازی، در حالتی که سرعت اکسیدکننده در کلیه آزمایش‌ها ثابت و برابر ۰/۶۴ متر بر ثانیه و عدد چرخش برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، افزایش سرعت سوخت موجب بالا رفتن میزان ارتفاع برخاستگی شعله می‌شود. از این شکل دو نکته برداشت می‌شود، اول آنکه در حالت‌هایی که نیتروژن به هوا افزوده شده است، شعله در سرعت‌های کمتری از روی نازل بلند می‌شود و دیگر آنکه همان‌طور که انتظار داشتیم با رقیق‌سازی هوا، میزان ارتفاع برخاستگی، افزایش می‌یابد. با مقایسه میزان ارتفاع برخاستگی در حالت‌های بدون رقیق‌سازی و با رقیق‌سازی دیده می‌شود که بیشترین ارتفاع برخاستگی، در حالت بیشترین رقیق‌سازی (رقیق‌سازی با ۱۰ درصد نیتروژن) رخ داده است که این مقدار در مقایسه با حالت بدون رقیق‌سازی به طور متوسط حدود ۹/۵ درصد بیشتر است. انتظار می‌رود که در درصدهای بیشتر رقیق‌سازی (افزودن بیش از ۱۰ درصد نیتروژن به هوا)، در صورتی که شعله خاموش نشود و در ساختار آن تغییری ایجاد نشود، ارتفاع برخاستگی شعله نیز بیشتر شود. با تغییر پره از ۴۵ درجه به ۶۰ درجه، عدد چرخش جدید به ۱/۴۱ می‌رسد که همواره در محدوده جریان‌های 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 ۴۵ درجه می‌شود. کم شدن سرعت در راستای محوری موجب بزرگ‌تر شدن گرادیان فشار محوری پدید آمده در راستای مرکز شعله می‌شود که باعث می‌شود حدود پایداری شعله نسبت به حالت قبل یعنی با پره ۴۵ درجه، افزایش یابد. شکل (۱۱) رفتار شعله را با افزایش جریان سوخت نشان می‌دهد.

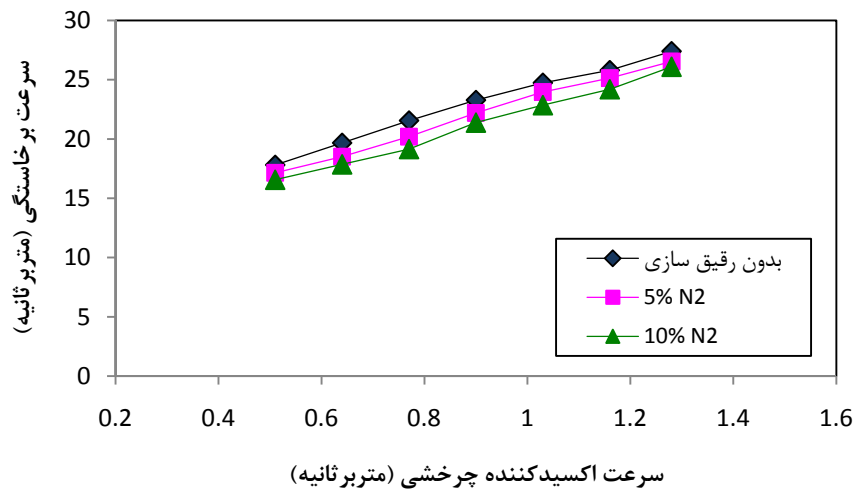


شکل ۱۰ - تغییرات ارتفاع برخاستگی شعله در شرایط رقیق‌سازی و بدون رقیق‌سازی هوا و در عدد چرخش ۰/۸ اثر سرعت جریان سوخت و رقیق‌سازی هوا بر پایداری شعله با عدد چرخش ۱/۴۱ (پره ۶۰ درجه)



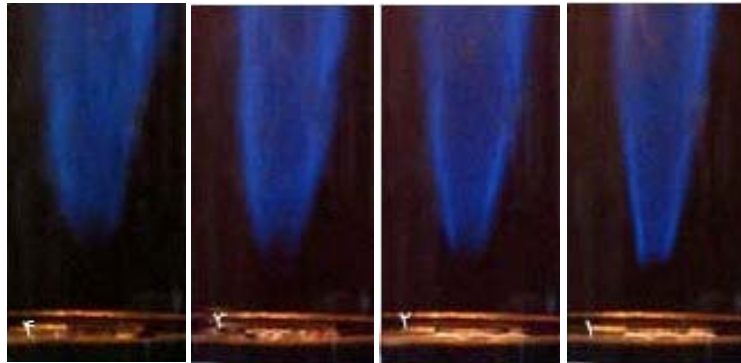
شکل ۱۱ - تغییرات شکل شعله گاز طبیعی با افزایش سرعت سوخت در عدد چرخش ۱/۴۱، سرعت هوا ۰/۶۴ متر بر ثانیه و در شرایط بدون رقیق‌سازی. (۱)  $U_f = 8/1$  m/s، (۲)  $U_f = 17/2$  m/s، (۳)  $U_f = 18/6$  m/s، (۴)  $U_f = 26/6$  m/s

در این حالت رفتار شعله با عدد چرخش  $1/41$  مانند عدد چرخش  $0/8$  است. آزمایش‌های این بخش کاملاً مشابه آزمایش‌های با پره چرخاننده  $45$  درجه (عدد چرخش  $0/8$ ) است. در اینجا سرعت هوای بدون رقیق‌سازی، ثابت و برابر  $0/64$  متر بر ثانیه بوده و سرعت سوخت به تدریج افزایش می‌یابد تا زمانی که شعله از روی نازل بلند شود. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش سرعت سوخت، پس از اینکه شعله وارد فاز مغشوش شد در یک سرعت مشخص (سرعت برخاستگی) از روی نازل سوخت بلند می‌شود. در آزمایش‌های مربوط به رقیق‌سازی هوا با گاز نیتروژن، با ثابت نگه داشتن عدد چرخش  $1/41$  و سرعت اکسید کننده  $0/64$  متر بر ثانیه، در دو حالت،  $5$  درصد و  $10$  درصد دبی اکسید کننده، نیتروژن به هوا افزوده شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، رقیق‌سازی موجب کاهش پایداری شعله می‌شود. نتایج این بخش از مطالعه نیز بیانگر نقش رقیق‌سازی در کاهش پایداری است. چنانکه برای اکسیدکننده چرخشی با سرعت  $0/64$  متر بر ثانیه، میزان سرعت برخاستگی شعله با  $5$  درصد رقیق‌سازی هوا،  $6/4$  درصد کمتر از سرعت برخاستگی بدون رقیق‌سازی و با هوای خالص است. در شکل (۱۲) میزان سرعت برخاستگی در محدوده وسیعی از سرعت اکسید کننده مقایسه شده است.



شکل ۱۲- تغییرات سرعت برخاستگی شعله در شرایط رقیق‌سازی و بدون رقیق‌سازی هوا و در عدد چرخش  $1/41$

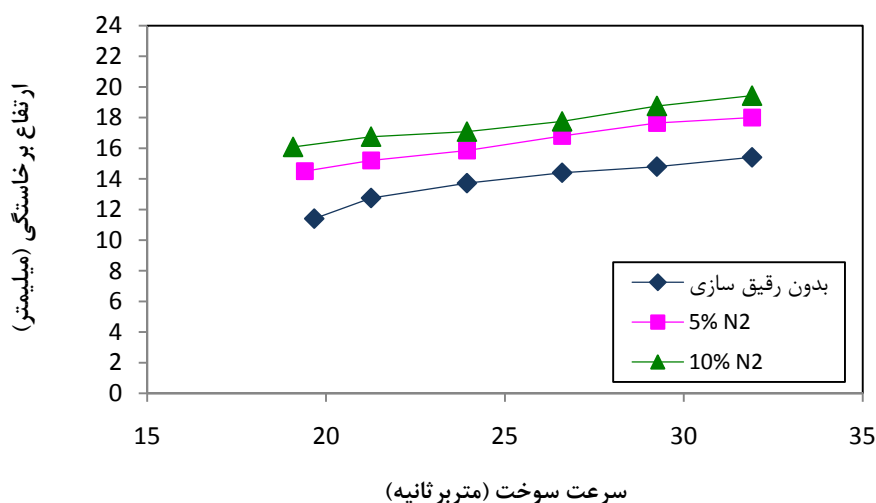
مانند حالت قبل، نمونه‌ای از تصاویر ثبت شده با دوربین دیجیتال از تغییر ارتفاع برخاستگی شعله با افزایش سرعت سوخت، در حالتی که سرعت هوای بدون رقیق‌سازی برابر با  $0/64$  متر بر ثانیه و عدد چرخش  $1/41$  است، در شکل (۱۳) ارائه شده است.



شکل ۱۳- تغییرات ارتفاع برخاستگی شعله با افزایش سرعت سوخت در عدد چرخش  $1/41$ ، سرعت هوا  $0/64$  متر بر ثانیه و در شرایط

بدون رقیق‌سازی. (۱)  $U_r = 19/67$  m/s، (۲)  $U_r = 23/9$  m/s، (۳)  $U_r = 26/6$  m/s، (۴)  $U_r = 29/2$  m/s

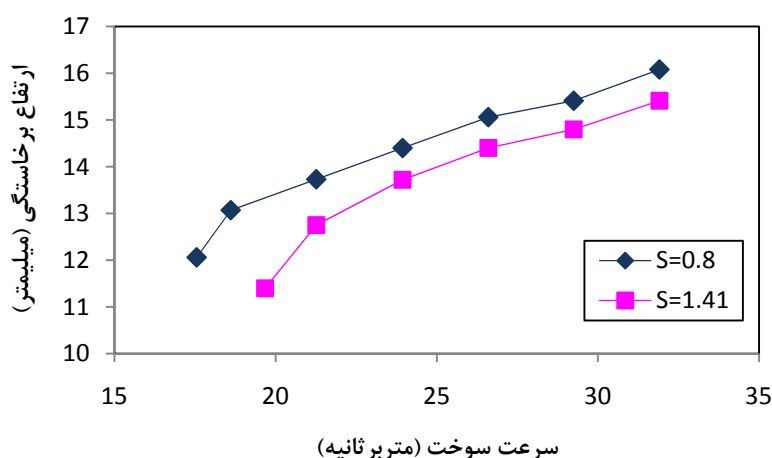
در اینجا با ثابت نگه داشتن سرعت هوا برابر  $0/64$  متر بر ثانیه و عدد چرخش  $1/41$ ، میزان ارتفاع برخاستگی شعله با افزایش سرعت سوخت بررسی شده است و نتایج بیانگر آن هستند که میزان ارتفاع برخاستگی شعله با افزایش سرعت سوخت افزایش می‌یابد. آزمایش‌های بخش رقیق‌سازی هوا نیز با افزودن ۵ درصد و ۱۰ درصد نیتروژن به هوا، مشابه حالت بدون رقیق‌سازی انجام شده‌اند. شکل (۱۴) مقایسه‌ای از میزان ارتفاع برخاستگی را در شرایط رقیق‌سازی و بدون رقیق‌سازی هوا نشان می‌دهد. در اینجا نیز سرعت اکسید کننده ثابت و برابر  $0/64$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده و سرعت سوخت به تدریج افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده، مجدداً بر اثر رقیق‌سازی بر افزایش ارتفاع برخاستگی شعله تأکید می‌کند. با مقایسه نتایج در یک سرعت به خصوص برای سوخت  $21/26$  متر بر ثانیه، دیده می‌شود میزان ارتفاع برخاستگی در احتراق با هوای خالص  $12/75$  میلی‌متر است که این مقدار با افزایش ۵ درصد نیتروژن به هوا به  $15/2$  میلی‌متر و با افزودن ۱۰ درصد نیتروژن به هوا به  $16/75$  می‌رسد.



شکل ۱۴- تغییرات ارتفاع برخاستگی شعله در شرایط رقیق‌سازی و بدون رقیق‌سازی هوا و در عدد چرخش  $1/41$

#### اثر افزایش عدد چرخش بر پایداری شعله در ناحیه چرخش قوی

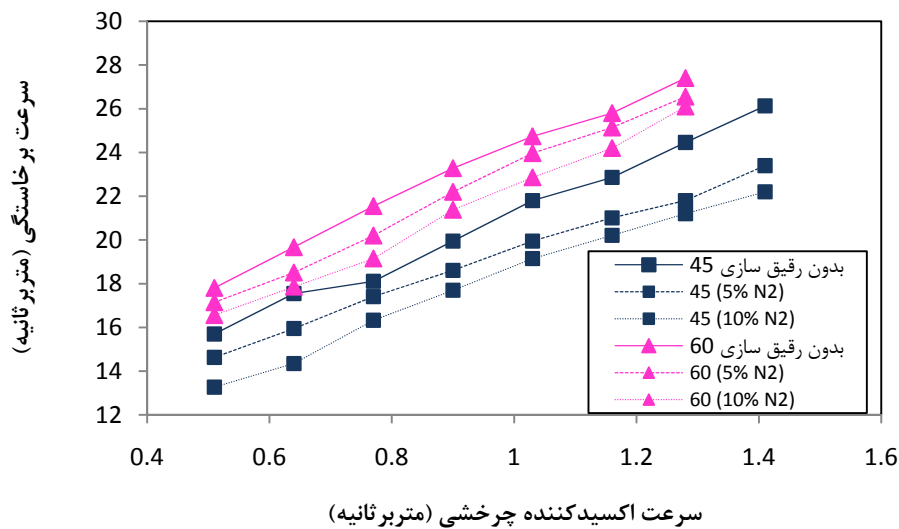
همان‌طور که قبلاً ذکر شد، افزایش عدد چرخش موجب افزایش پایداری شعله می‌شود. در شکل (۱۵) مقایسه‌ای از میزان ارتفاع برخاستگی پدید آمده توسط پره‌های چرخاننده ۴۵ درجه و ۶۰ درجه نشان داده شده است.



شکل ۱۵- تأثیر عدد چرخش بر ارتفاع برخاستگی

برای مقایسه اثر چرخش بر پایداری شعله، در یک سرعت ثابت هوا (۰/۶۴ متر بر ثانیه)، میزان ارتفاع برخاستگی برای اعداد چرخش ۰/۸ و ۱/۴۴ در برابر تغییر سرعت سوخت، رسم شده است. چرخش بیشتر باعث افزایش شدت جریان‌های بازگشتی شده و موجب می‌شود شعله در فاصله کمتری از سر مشعل پایدار شود. به عنوان مثال همان‌طور که از شکل (۱۵) دریافت می‌شود، هنگامی که سرعت سوخت ۲۳/۹۴ متر بر ثانیه است، ارتفاع برخاستگی برای عدد چرخش ۰/۸ برابر با ۱۴/۴ میلی‌متر و برای چرخش قوی‌تر یعنی در عدد چرخش ۱/۴۴ برابر ۱۳/۷۲ میلی‌متر است. از شکل (۱۵) همچنین می‌توان دریافت که برای سرعت سوخت بیشتر از ۲۲ متر بر ثانیه، اختلاف بین میزان ارتفاع برخاستگی تحت اثر دو چرخش تولید شده (با اعداد چرخش ۰/۸ و ۱/۴۴)، کمتر از زمانی است که سرعت سوخت کمتر از ۲۲ متر بر ثانیه است. این نکته نشان می‌دهد که هنگامی که سرعت سوخت خروجی از نازل از حد مشخصی (که این حد در مشعل‌های مختلف با ساختارهای گوناگون می‌تواند متفاوت باشد) کمتر باشد، اثر هوای چرخشی بر روی پایداری شعله بیشتر است و می‌تواند ارتفاع برخاستگی را بیشتر کاهش دهد.

شکل (۱۶) مقایسه کاملی از میزان سرعت برخاستگی شعله در چرخش‌های ۰/۸ و ۱/۴۱ را همراه با افزودن ۵ درصد و ۱۰ درصد نیتروژن به هوا به عنوان رقیق‌ساز، نشان می‌دهد. در این بررسی، میزان سرعت هوا ثابت و برابر ۰/۶۴ متر بر ثانیه است و هوا به صورت خالص و همچنین با رقیق‌سازی وارد محفظه احتراق می‌شود. استفاده از پره ۶۰ درجه، عدد چرخش را به ۱/۴۱ افزایش می‌دهد.



شکل ۱۶- سرعت برخاستگی شعله در شرایط چرخش قوی (پره ۴۵ و ۶۰ درجه) همراه با رقیق‌سازی و بدون رقیق‌سازی هوا

با توجه به شکل (۱۶) می‌توان دریافت که در چرخش‌های بالا برای داشتن شعله بلند شده از سر مشعل، نیاز به سرعت‌های بالاتری داریم. به عنوان مثال با مقایسه نقاط در شرایط بدون رقیق‌سازی، با عدد چرخش ۰/۸، سرعت برخاستگی ۱۷/۵۵ متر بر ثانیه است در حالی که برای جدایش شعله با عدد چرخش ۱/۴۱، سرعت خروجی سوخت باید به ۱۹/۶۷ متر بر ثانیه افزایش یابد. دلیل آن این است که در چرخش‌های بالا به دلیل کاهش مولفه سرعت محوری و پدید 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. تاثیر مثبت افزایش چرخش بر افزایش سرعت برخاستگی کاملاً مشخص است. به طوری که در شرایط کاملاً یکسان برای سرعت هوا و بدون رقیق‌سازی، با افزایش عدد چرخش از ۰/۸ به ۱/۴۱، میزان سرعت برخاستگی به طور متوسط ۱۴ درصد افزایش می‌یابد.

## نتیجه گیری

نتایج به دست آمده در دو بخش جریان کم چرخش و جریان با چرخش زیاد قابل بررسی اند. در بخش جریان کم چرخش، دیده شد که با ثابت نگه داشتن سرعت هوا و افزایش پیوسته جریان سوخت، شعله از روی نازل بلند شده و در سرعت‌های بالاتر دچار خاموشی می‌شود. همچنین با افزایش سرعت هوا، میزان سرعت برخاستگی و سرعت خاموشی افزایش می‌یابد. تحقیقات گذشته نشان می‌دهند که این افزایش پایداری به دلیل پدید آمدن ناحیه بازگردش گوشه‌ای در جریان کم چرخش است. در بخش رقیق‌سازی هوا با گاز نیتروژن دیده شد که رقیق‌سازی حدود پایداری را کاهش می‌دهد که این کاهش با افزایش درصد رقیق‌سازی بیشتر شده ولی چرخش دادن هوای احتراق، اثر منفی رقیق‌سازی در پایداری شعله را کاهش می‌دهد. در بخش جریان‌های با چرخش بالا، دیده شد که با ثابت نگه داشتن سرعت هوا و افزایش سرعت سوخت، شعله ابتدا در یک سرعت به خصوص از روی نازل سوخت بلند شده و در فاصله کمی از نازل قرار می‌گیرد. افزایش بیشتر سرعت سوخت موجب افزایش ارتفاع برخاستگی شعله شده و در نهایت با افزایش پیوسته سرعت سوخت، شعله دچار خاموشی می‌شود. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، با توجه به محدودیت فشار گاز آزمایشگاه، قادر به مشاهده خاموشی شعله در حالت هوای با چرخش بالا نبودیم و تنها برخاستگی شعله مشاهده شده است. رقیق‌سازی هوا باعث کاهش سرعت برخاستگی و افزایش ارتفاع برخاستگی می‌شود. افزایش درصد رقیق‌سازی هوا و ثابت نگه داشتن سایر شرایط، کاهش سرعت برخاستگی و افزایش ارتفاع برخاستگی را شدت می‌بخشد. در این تحقیق، بیشترین ارتفاع برخاستگی و کمترین سرعت برخاستگی در رقیق‌سازی هوا با ۱۰ درصد نیتروژن به دست آمد. بنابراین با استفاده از چرخش هوا می‌توان اثرات منفی رقیق‌سازی هوا را بر پایداری شعله کاهش داده و از هوای چرخشی همزمان با رقیق‌سازی هوا در طراحی سیستم‌های احتراقی استفاده کرد.

## 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., and Driscoll, J. F., "Enhancement of Blowout Limits by the Use of Swirl," Combustion and Flame, 80, pp. 183-195, 1990.
- 4- Kerr, N. M., "Swirl Effect on Flame Performance and The Modelling of the Swirling Flames," Journal of the Institute of Fuel, 39, pp. 527-538, 1965.
- 5- Mathur, M. L., and Maccallum, N. R. L., "Swirling Air Tests Issuing from Vane Swirlers," Journal of Institute of Fuel, 41, pp. 238-240, 1976.
- 6- Yuasa, S., "Effects of Swirl on Stability of Jet Diffusion Flames," Combustion and Flame, 66, pp. 181-192, 1986.
- 7- Buckley, P. L., Craig, R. R., Davis, D. L., and Scharzkopf, K. G., "The Design and Combustion Performance of Practical Swirlers for Integral Rocket/Ramjet," AIAA, 21, NO. 5, pp. 740-743, 1983.
- 8- Ruan, J., Kobayashi, H., and Niioka, T., "Effects of Dilutions on Structure and Stability of Axisymmetric Lifted Laminar Diffusion Flames," 3<sup>rd</sup> Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC), 2001.
- 9- Chao, Y. C., Wu, C. Y., and Lee, K. Y., "Effects of Dilution on Blow-Out Limits of Turbulent Jet Flames," Combustion Science and Technology, 176, pp. 1735-1753, 2004.
- 10- D. A. Vilson, and K. M. Lyons, "Effects of Dilution and Co-Flow on the Stability of Lifted Non-Premixed Biogas-Liked Flames," Fuel, 87, pp. 405-413, 2007
- 11- Takeno, T., "Transition and Structure of Jet Diffusion Flames," Twenty Fifth Symposium (International) on Combustion, pp.1061-1073, 1992.

## English Abstract

### An Experimental Study of the Effects of Swirl and Air Dilution on NG Non-Premixed Flame Stability

A. Rowhani<sup>1</sup>, S. Tabejamaat<sup>1</sup> and A. Adeli<sup>2</sup>

1- Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology

2- Unit 8, No. 36, Bozorgmehr St., Valiasr Ave., Tehran, Iran

*In this work, an experimental investigation of stability limits of natural city gas (NG) in a non-premixed swirling burner has been conducted. Air swirl motion is imparted through 30°, 45° and 60° vane swirlers to produce low and high swirling air streams. Air dilution with nitrogen (N<sub>2</sub>) was also performed because of the importance of dilution in practical applications. N<sub>2</sub> was added to the swirling air to examine the stability limits under diluted air conditions. The purpose of this study is to examine the stability limits including lift and blow-out velocity in low swirl conditions and liftoff height as well as liftoff velocity in high swirl conditions. It was observed that swirl increased the stability limits of NG while it decreased the negative effects of dilution on flame stability.*

**Keywords:** swirl combustion, non-premixed flame, dilution, NG