نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق
سال سیزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۹

مطالعه تجربی تاثیر نسبت انسداد انژکتور کم‌چرخش بر حدود پایداری و رژیم‌های احتراقی شعله گاز طبیعی

نوید حشمتی[۱] و سیدمهدی میرساجدی[۲*]

۱- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، na.heshmati@mail.sbu.ac.ir
2- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، m_mirsajedi@sbu.ac.ir
* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۷، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۳۹۹/۰۳/۲۱، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۵)

در این مطالعه، به بررسی تاثیر نسبت انسداد چرخاننده کم‌چرخش بر حدود پایداری و رژیم‌های احتراقی شعله پرداخته می‌شود. نسبت انسداد برابر سطح مسدود و پوشیده صفحه مغشوش‌کننده به کل مساحت آن است و یکی از پارامترهای اصلی چرخاننده کم‌چرخش است که تاثیر مهمی بر پایداری شعله کم‌چرخش دارد. به‌منظور بررسی تاثیر نسبت انسداد کانال مرکزی چرخاننده بر پایداری، ۹ چرخاننده با هندسه متمایز مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت انسداد، حد خاموشی چرخاننده‌ها کاهش می‌یابد، به‌طوری که با افزایش نسبت انسداد از ۴۳٪ تا ۷۶٪، میزان حد خاموشی تا حدود ۲۵٪ کاهش یافته و پایداری شعله بهبود می‌یابد. همچنین، در این مطالعه مشاهده شد که با افزایش نسبت هم‌ارزی، شعله یک فرایند گذار را طی می‌کند که در آن شعله از یک حالت Vشکل (کاسه‌ای‌شکل) معلق پایدار تا حالت گردابه‌ای‌شکل متصل به دهانه مشعل پیش می‌رود. فرایند گذار را می‌توان به سه رژیم احتراقی متفاوت تقسیم کرد که حدود این رژیم‌های احتراقی براساس نسبت هم‌ارزی و میزان عدد رینولدز ورودی مشعل تعیین می‌شود. بررسی میزان آلاینده NO_x چرخاننده‌ها نشان داد که میزان NO_x با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد و در نسبت‌های هم‌ارزی نزدیک ۱ میزان NO_x در حدود ۲۰ppm است.

کلیدواژگان: احتراق کم‌چرخش، پایداری شعله، نسبت انسداد، گاز طبیعی

مقدمه

در سال‌های اخیر، لزوم کاهش میزان آلایندگی سامانه‌های احتراقی به یک اولویت تبدیل شده و تعیین قوانین جدید مرتبط با حد مجاز انتشار آلاینده‌های حاصل از احتراق این موضوع را به یکی از الزامات طراحی سامانه‌های احتراقی تبدیل کرده است[۱]. برای کاهش میزان آلاینده‌ها، باید ابزاری را انتخاب کرد تا ضمن تامین نیازهای صنعتی مورد نیاز دارای آلایندگی پایینی باشد. دلیل اهمیت این موضوع آن است که بعضی راهکارهای کاهش آلایندگی باعث کاهش بازدهی سامانه احتراقی می‌شوند و به همین دلیل با وجود قابلیت کاهش آلایندگی کنار گذاشته شده و به‌طور جدی در طراحی سامانه‌های احتراقی وارد نمی‌شوند. یکی از راهکارهای کلی کاهش آلاینده‌های احتراق استفاده از جریان پیش‌مخلوط سوخت و هوا است. در جریان پیش‌مخلوط سوخت و هوا، به‌دلیل مخلوط‌شدن همگن سوخت و هوا و ثابت‌بودن نسبت سوخت و هوا در تمامی قسمت‌های جریان و همچنین قابل کنترل‌بودن تعیین نسبت هم‌ارزی، احتراق کامل‌تر بوده و آلایندگی کاهش می‌یابد. چالش اصلی احتراق پیش‌مخلوط پایداری شعله است، زیرا به‌دلیل مخلوط‌بودن سوخت و هوا پیش از ناحیه احتراق جریان مستعد اشتعال‌پذیری است و از این رو باید ملاحظات پایداری شعله و ایمنی دستگاه و سامانه احتراق مد نظر قرار گیرد. یکی از متداول‌ترین روش‌های احتراق پیش‌مخلوط استفاده از جریان چرخشی است که امروزه این روش در بسیاری از مشعل‌های صنعتی و همچنین توربین گازهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد[۲].

مطالعات دهه‌های اخیر نشان داده است که به هر میزان در جریان پیش‌مخلوط سوخت و هوا نسبت هم‌ارزی کاهش یابد و یا به بیان دیگر احتراق با هوای اضافی بیشتر انجام گیرد، میزان آلایندگی حاصل از احتراق نیز کاهش می‌یابد، اما پایدارسازی شعله رقیق‌شده با هوای اضافی نیز چالشی جدید به‌حساب می‌آید. در دو دهه اخیر، روش‌های گوناگونی برای پایدارسازی شعله رقیق‌شده با هوای اضافی مطرح شده است که یکی از آن‌ها استفاده از جریان کم‌چرخش است. پایدارسازی شعله در شرایط رقیق‌شده با هوای اضافی با استفاده از احتراق کم‌چرخش اولین‌بار توسط رابرت چنگ، در سال ۱۹۹۲، انجام شد[۳]. مشعل معرفی شده توسط رابرت چنگ دارای هندسه منحصربه‌فردی شامل چهار جت مماسی بود که با ایجاد یک چرخش ضعیف در جریان محوری اصلی یک میدان جریان واگرا را در خروجی نازل ایجاد می‌کرد. به این ترتیب شعله در جایی که سرعت سوزش آن با سرعت جریان محلی برابر می‌شد در بالای نازل مشعل به‌صورت معلق پایدار باقی می‌ماند. در سال ۱۹۹۶، چرخاننده‌ای با هندسه منحصربه‌فرد توسط رابرت چنگ و همکاران معرفی شد که بدون بهره‌گیری از جت‌های مماسی و با استفاده از پره‌های راهنما میدان جریانی مشابه مشعل ابداعی اولیه آن‌ها ایجاد می‌کرد[۴]. این چرخاننده دارای یک کانال مرکزی بوده که پره‌هایی با زاویه مشخص گرداگرد این کانال قرار می‌گرفتند و بخش مرکزی این کانال مرکزی توسط صفحه سوراخ‌دار مغشوش‌کننده‌ای پوشیده شده بود. جریان محوری در حین عبور از پره‌ها دارای چرخش متناسب با زاویه پره‌های چرخاننده می‌شد و جریان عبوری از صفحه مغشوش‌کننده بدون چرخش باقی می‌ماند.

جانسون و همکاران مقایسه‌ای را بین یک مشعل کم‌چرخش با یک مشعل پرچرخش به‌صورت تجربی انجام دادند که مهم‌ترین نتیجه این مقایسه، که با استفاده از ابزار PIV[1] انجام شد، این بود که مشعل کم‌چرخش فاقد ناحیه بازگردشی قوی است که این امر سبب تفاوت مکانیزم پایداری شعله در این دو نوع مشعل شده و همچنین باعث کاهش آلایندگی مشعل، به‌دلیل کاهش زمان ماند محصولات احتراق، در ناحیه احتراق می‌شود که این مورد را می‌توان عمده‌ترین تفاوت مشعل کم‌چرخش با مشعل پرچرخش دانست[۵،۶،۷]. فرشچی و همکاران پایداری شعله و میزان آلایندگی تولیدی مشعل کم‌چرخش را به‌صورت تجربی بررسی کرده و نتایج نشان داد که شعله مشعل کم‌چرخش به نازل مشعل متصل نمی‌شود و به‌صورت معلق در بالای نازل باقی می‌ماند و به‌دلیل این عدم اتصال شعله به نازل، تنش حرارتی به مشعل وارد نشده و به همین علت می‌توان مشعل را از مواد سبک و ارزان‌قیمت همچون PVC[2] ساخت[۸]. شهسواری و فرشچی پایداری شعله را تحت تاثیر تغییرات پارامترهای هندسی مشعل بررسی کردند و نتایج نشان داد که افزایش طول نازل ضمن افزایش زمان اختلاط جریان محوری و چرخشی سبب بهبود پایداری شعله می‌شود. همچنین، در این مطالعه مشاهده شد که دمش (خاموشی شعله[3]) با افزایش نسبت انسداد بهبود یافت، اما پسش (برگشت شعله[4]) افزایش می‌یابد[۹]. شهسواری و فرشچی مطالعه‌ای را بر روی مشخصه‌های پایداری و تولید آلاینده NO_x شعله‌های کم‌چرخش انجام داده و نتایج تحقیق ایشان نشان داد که سرعت مخلوط سوخت و هوا بر پایداری شعله‌های کم‌چرخش بسیار تاثیرگذار است، به‌نحوی که در سرعت‌های پایین شعله ناپایدار می‌شود، اما، با افزایش سرعت مخلوط سوخت و هوا، پایداری شعله افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که میزان NO_x تولیدی با تغییر سرعت مخلوط سوخت و هوا تغییر نمی‌کند[۱۰]. پیش بین و همکاران رفتار شعله کم‌چرخش تحت تاثیر تغییر پارامترهای عملکردی را با تمرکز بر روی فاصله درنگ به‌صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. فاصله درنگ به فاصله خروجی چرخاننده تا دهانه خروجی نازل گفته شده که درحقیقت فاصله حضور جریان‌های چرخشی و محوری خروجی از چرخاننده در کنار هم تا لحظه خروج از نازل است. نتایج این تحقیق نشان داد که ارتفاع شعله با فاصله درنگ به‌طور مستقیم در ارتباط است و می‌توان یک مقدار حداقلی برای فاصله درنگ در یک عدد چرخش مشخص تعیین کرد، به‌گونه‌ای که شعله در دامنه‌ای از نسبت هم‌ارزی‌های متفاوت به‌صورت پایدار و معلق باقی بماند[۱۱].

1. Particle Image Velocimetry
2. Polyvinyl chloride
3. Flame Blowoff
4. Flame Flashback

در مطالعه حاضر، به بررسی تاثیر تغییرات نسبت انسداد چرخاننده کم‌چرخش بر حدود پایداری و رژیم‌های احتراقی شعله پرداخته می‌شود. نسبت انسداد در بخش بعدی مقاله به‌طور کامل معرفی و تبیین خواهد شد، اما توضیح اجمالی آن این است که نسبت سطح مسدود صفحه مغشوش‌کننده به کل مساحت کانال مرکزی چرخاننده برابر با نسبت انسداد است. تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه تاثیرات هندسه مشعل کم‌چرخش بر پایداری و ویژگی‌های شعله کم‌چرخش انجام شده است که بخش زیادی از آن‌ها شامل پارامترهای هندسی چرخاننده و همچنین نسبت انسداد می‌شود. اما، بیشتر مطالعات انجام‌گرفته در ارتباط با نسبت انسداد در زمینه مشعل‌های کم‌چرخش تمرکزشان بر روی الگوی هندسی صفحه مغشوش‌کننده در نسبت انسدادهای ثابت و مشخص بوده و نحوه تاثیر الگوهای هندسی متفاوت بر میزان اغتشاش جریان و تاثیر آن بر شعله را در نسبت انسدادهای مشخص بررسی کرده‌اند.

در سال ۲۰۱۲، ترکلسن و همکاران مطالعه‌ای تجربی در زمینه تاثیر پارامترهای هندسی چرخاننده بر مشخصه‌های احتراقی شعله کم‌چرخش انجام داده و نتایج مربوط‌به نسبت انسداد نشان داد که افزایش نسبت انسداد سبب افزایش پسای[1] کانال مرکزی چرخاننده شده و این امر سبب افزایش سرعت جریان در بخش چرخشی می‌شود. همچنین، مشاهده شد که نسبت انسداد در ارتفاع قرارگیری شعله بسیار موثر بوده و می‌توان از این نسبت برای تعیین موقعیت قرارگیری شعله برای ملاحظات به‌کارگیری در محفظه احتراق توربین‌های گازی بهره برد[۱۲]. در سال ۲۰۱۵، وربیک و همکاران تاثیر تغییر الگوی هندسی صفحه مغشوش‌کننده را در نسبت انسدادهای مشخص بررسی کرده و صفحه متداول که دارای سوراخ‌های دایروی‌شکل بود را با یک نمونه صفحه فراکتال[2] با پایه هندسی ضربدری‌شکل جایگزین کردند. نتایج این تغییر نشان داد که تغییر الگوی هندسی صفحه مغشوش‌کننده سبب تغییر در آشفتگی جریان و همچنین افزایش نوسانات سرعت اغتشاشی جریان محوری می‌شود. این مورد در برهمکنش جریان محوری و چرخشی بسیار موثر است به‌گونه‌ای که هر اندازه اغتشاش جریان افزایش یابد باید به میزان طول نازل نیز افزوده شود تا در خروجی، پروفیل سرعت دارای شکل یکنواختی باشد. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که تغییر الگوی هندسی صفحه مغشوش‌کننده تاثیری بر میزان آلایندگی تولیدی مشعل کم‌چرخش ندارد[۱۳]. در سال ۲۰۱۶، نیز وربیک و همکاران نتیجه گرفتند که صفحه فراکتال نسبت‌به صفحه‌های مغشوش‌کننده سوراخ‌دار متداول اغتشاش بیشتری در جریان ایجاد می‌کند که این اغتشاش بیشتر سبب چین‌خوردگی بیشتر جبهه شعله شده و نرخ سوزش شعله را بالا می‌برد[۱۴]. در سال ۲۰۱۶، ثیج و همکاران نتیجه گرفتند که اغتشاش شدید جریان سبب افزایش نسبت هم‌ارزی خاموشی شعله می‌شود و پایداری شعله را کاهش می‌دهد و به همین دلیل باید حد مشخصی برای اغتشاش جریان تعیین کرد و هندسه صفحه مغشوش‌کننده باید به‌گونه‌ای انتخاب شود تا جریان خروجی از آن شدت اغتشاش مشخصی داشته باشد تا بر پایداری شعله تاثیر منفی نداشته باشد[۱۵]. نحوی و همکاران، در سال ۲۰۱۹، تاثیر نسبت انسداد بر مشخصه‌های احتراقی یک شعله گاز طبیعی را با استفاده از یک مشعل کم‌چرخش با قطر ۳۴/۷ میلی‌متر به‌طور تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه، سه نسبت انسداد برای چرخاننده‌ای با زاویه پره °۴۵ تعیین شده و نتایج حاصل نشان داد که افزایش عدد چرخش سبب افزایش وسعت ناحیه احتراق و کاهش بیشینه دمای احتراق و متعاقب آن باعث کاهش آلاینده NOx می‌شود و همچنین در این مطالعه مشاهده شد که ارتفاع قرارگیری شعله حساس‌ترین پارامتر به عدد چرخش است[۱۶].

ویژگی اصلی مطالعه حاضر مقیاس پایین مشعل کم‌چرخش مورد استفاده نسبت‌به ابعاد مشعل‌های مورد استفاده در مطالعات تجربی انجام‌گرفته تاکنون است. بیشتر مشعل‌های مورد بررسی در مطالعات تجربی انجام‌گرفته تاکنون قطری بیش از ۳۸ میلی‌متر دارد، اما قطر مشعل کم‌چرخش این مطالعه ۱۴ میلی‌متر است. ابعاد کوچک مشعل مورد مطالعه با رویکرد به‌کارگیری مشعل کم‌چرخش در سامانه‌های احتراقی مقیاس‌پایین و با ابعاد کوچک است. در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از سامانه‌های احتراقی مقیاس‌پایین، به‌دلیل بازدهی مناسب و هزینه‌های تعمیر و نگهداری پایین‌تر و همچنین آلایندگی کمتر،

1. drag
2. fractal

افزایش یافته است. در تنها مطالعه انجام‌گرفته در زمینه تطبیق‌پذیری مشعل کم‌چرخش با سامانه‌های احتراق مقیاس‌پایین، که در سال ۲۰۱۸ توسط فرانک و همکاران و زیر نظر رابرت چنگ، ابداع‌کننده مشعل کم‌چرخش، انجام شد، انطباق مشعل کم‌چرخش با محفظه احتراق میکروتوربینی با قطر کمتر از ۱۸ میلی‌متر مشاهده شد. همچنین، انجام آزمایش‌های تجربی و بررسی رفتار شعله در تمامی شرایط ورودی در ابعاد کوچک بررسی شد و نتایج حاصل بیانگر توانایی انطباق مشعل کم‌چرخش در سامانه‌های احتراقی با ابعاد کوچک بود[۱۷]. در مطالعه حاضر، از گاز طبیعی شهری به‌عنوان سوخت گازی استفاده شده است. گاز طبیعی شهری به‌عنوان فراوان‌ترین و دردسترس‌ترین و همچنین پرکاربردترین سوخت گازی سامانه‌های احتراقی به‌خصوص سامانه‌های مقیاس‌پایین همچون میکروتوربین‌های CHP[1] مطرح است و بررسی تطبیق‌پذیری مشعل کم‌چرخش مقیاس‌پایین با این سوخت گازی حائز اهمیت است. بنابراین، با رویکرد به‌کارگیری مشعل کم‌چرخش در سامانه‌های احتراقی مقیاس‌پایین همچون میکروتوربین‌ها قطر مشعل مورد استفاده در این تحقیق ۱۴ میلی‌متر و سوخت مورد استفاده نیز گاز طبیعی شهری انتخاب شده است. همانطور که گفته شد، بیشتر انطباق‌پذیری مشعل کم‌چرخش در به‌کارگیری در میکروتوربین‌ها مشاهده شده است، اما همچنان نیازمند مطالعات بیشتری در زمینه تعیین نحوه تاثیر پارامترهای هندسی بر پایداری شعله در این ابعاد کوچک است.

تشریح مسئله

همان‌گونه که بیان شد، در این مطالعه، با تغییر نسبت انسداد صفحه مغشوش‌کننده، تاثیر این نسبت بر حدود پایداری شعله و رژیم‌های احتراقی آن و همچنین تاثیر آن بر میزان آلایندگی تولیدی مشعل بررسی می‌شود. در این بخش، مفاهیم اولیه و اصلی مورد استفاده در این تحقیق معرفی و تبیین می‌شود. عدد چرخش پارامتر کلیدی در مطالعه و بررسی احتراق چرخشی است. عدد چرخش میزان شدت چرخش جریان را نشان می‌دهد و اولین‌بار توسط بییر تعریف شد[۱۸]:

$$S = \frac{\int_0^R UWr^2 dr}{R\int_0^R U^2 r dr} \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، U میانگین سرعت مولفه محوری و W میانگین سرعت مولفه مماسی است. در تعیین عدد چرخش مشعل کم‌چرخش، با توجه به اینکه میدان جریان حاصل توسط چرخاننده ایجاد می‌شود و ویژگی‌های میدان جریان و همچنین میزان تکانه چرخشی و محوری توسط هندسه چرخاننده تعیین می‌شود، می‌توان با اعمال‌کردن هندسه چرخاننده در رابطه اصلی عدد چرخش، رابطه عدد چرخش مربوط‌به مشعل کم‌چرخش را به‌دست آورد. این رابطه، که اولین‌بار توسط رابرت چنگ معرفی شد، به‌عنوان عدد چرخش هندسی شناخته می‌شود. عدد چرخش هندسی توسط پارامترهای هندسی چرخاننده محاسبه شده و به‌صورت زیر تعریف می‌شود[۱۹]:

$$S = \frac{2}{3}tan\alpha \frac{1-R^3}{1-R^2+\left[m^2\left(\frac{1}{R^2}-1\right)^2\right]R^2} \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، R برابر با نسبت شعاع کانال مرکزی چرخاننده r_c به شعاع چرخاننده r و α زاویه پره‌های چرخاننده و m نسبت دبی جرمی گذرنده از بخش چرخشی به بخش غیر چرخشی چرخاننده است. همانطور که مشاهده می‌شود، عدد چرخش هندسی تابعی از پارامترهای هندسی چرخاننده است که این سه پارامتر اصلی چرخاننده عبارت‌اند از: نسبت شعاع (R)، زاویه پره (α) و نسبت انسداد (B) که تغییر هرکدام از این سه پارامتر سبب تغییر در عدد چرخش می‌شود و مشخصات عملکردی شعله را تغییر می‌دهد. پارامترهای اصلی هندسی چرخاننده در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

1. Combined Heat and Power

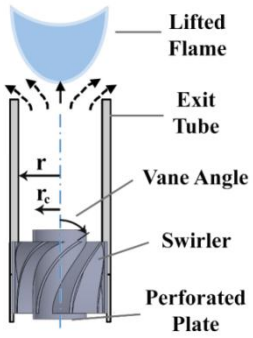

Figure 1- LSB Swirler main geometrical parameters

شکل ۱- الف) چرخاننده کم‌چرخش و پارامترهای هندسی اصلی آن

حدود پایداری شعله توسط کمترین و بیشترین نسبت هم‌ارزی، که در آن احتراق شعله به‌صورت پایدار امکان‌پذیر است، محدود می‌شود. کمترین نسبت هم‌ارزی شعله پایدار حد خاموشی شعله و بیشترین نسبت هم‌ارزی شعله پایدار حد برگشت شعله است که در این مطالعه کمترین نسبت هم‌ارزی شعله پایدار (حد خاموشی) و همچنین بیشترین نسبت هم‌ارزی شعله پایدار در سرعت‌های ورودی متفاوت هوا و سوخت بررسی و تعیین می‌شود که درنتیجه حدود پایداری شعله و رفتار شعله در رژیم‌های احتراقی متفاوت در نسبت هم‌ارزی‌های متفاوت مشخص می‌شود. نسبت هم‌ارزی به‌صورت نسبت سوخت به هوای واقعی به نسبت سوخت به هوای استوکیومتری تعریف می‌شود:

$$\emptyset = \frac{\left(\frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{air}}}\right)_{\text{actual}}}{\left(\frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{air}}}\right)_{\text{stochiometric}}} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، m_{fuel} جرم سوخت و m_{air} جرم هواست. اگر $\emptyset$ بیشتر از ۱ باشد، مخلوط سوخت و هوا اصطلاحا مخلوط غنی سوخت نامیده می‌شود و اگر $\emptyset$ کمتر از ۱ باشد، مخلوط فقیر سوخت یا رقیق سوخت نامیده می‌شود. در نسبت‌های خیلی کمتر از ۱ شعله به طرف خاموشی پیش می‌رود. با تغییر سرعت‌های ورودی سوخت و هوا پارامتر دیگری به نام سرعت توده جریان[1] نیز تغییر می‌کند. سرعت توده جریان (U_{Bulk}) پارامتر مهم در طراحی مشعل کم‌چرخش است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U_{\text{Bulk}} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}}} + \frac{\dot{m}_{\text{fuel}}}{\rho_{\text{fuel}}}\right)}{A} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، ρ_{air} چگالی هوا و ρ_{fuel} چگالی سوخت و A مساحت مقطع عبوری جریان است. در این مطالعه، تجربی نسبت‌های هم‌ارزی خاموشی، که براثر تغییر سرعت‌های ورودی سوخت و هوا به‌دست می‌آید، براساس سرعت توده جریان نشان داده می‌شود. در این آزمایش‌ها با تغییرات شرایط ورودی جریان سوخت و هوا دامنه پایداری مشعل را بررسی کرده و درنهایت نقشه پایداری مشعل به‌دست می‌آید.

نسبت انسداد

نسبت انسداد (B) برابر با نسبت مساحت مسدود و پوشیده صفحه مغشوش‌کننده به مساحت کل آن است. در شکل ۲، صفحه مغشوش‌کننده چرخاننده در میان بخش چرخشی[2] مشاهده می‌شود. صفحه مغشوش‌کننده در چرخاننده وظیفه تنظیم دبی

1. Bulk Velocity
2. Swirling Annulus

عبوری بین بخش محوری مرکزی و چرخشی را دارد. نسبت دبی عبوری از بخش مرکزی چرخاننده به بخش چرخشی، که در رابطه (۲) با m نشان داده شده است، تحت تاثیر میزان نسبت انسداد صفحه مغشوش‌کننده است و با تغییر میزان نسبت انسداد صفحه مغشوش‌کننده می‌توان نسبت دبی گذرنده از بخش چرخشی به بخش غیرچرخشی را تنظیم کرد. نسبت انسداد از طریق رابطه (۵) محاسبه می‌شود که برای چرخاننده‌های مورد استفاده در این تحقیق برابر مساحت پوشیده صفحه مغشوش‌کننده (مساحت کل صفحه به جز مجموع مساحت حفره‌های صفحه مغشوش‌کننده) به کل مساحت این صفحه (A_p) است. در رابطه (۵)، A_h مجموع مساحت حفره‌های صفحه مغشوش‌کننده، N_h برابر تعداد حفره‌ها، r_p شعاع صفحه مغشوش‌کننده و r_h شعاع حفره‌هاست که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. مقادیر این متغیرها برای چرخاننده‌های آزمایش در بخش بعدی آورده شده‌اند.

$$B = \frac{A_p - A_h}{A_p} = \frac{\pi {r_p}^2 - N_h(\pi {r_h}^2)}{\pi {r_p}^2} \quad (۵)$$

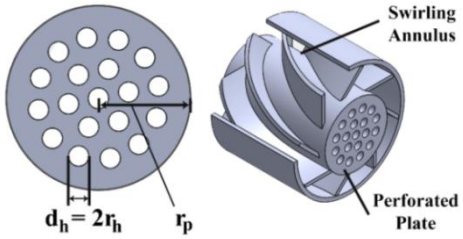

Figure 2- Perforated plate and swirling annulus of swirler

شکل ۲- موقعیت قرارگیری صفحه مغشوش‌کننده و بخش چرخشی در چرخاننده

چرخاننده‌های آزمایش

در این مطالعه، از ۹ چرخاننده با هندسه متفاوت استفاده شده که مشخصات چرخاننده‌های مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. چرخاننده‌ها دارای سه نسبت انسداد متفاوت بوده که مقادیر آن برابر با ۰/۷۶، ۰/۵۲ و ۰/۴۳ است. برای هر کدام از این نسبت‌ها سه زاویه پره نیز درنظر گرفته شده است که درمجموع ۹ چرخاننده را تشکیل می‌دهند. قطر تمامی چرخاننده‌های کم‌چرخش ۱۴ میلی‌متر است و نسبت شعاع آن‌ها (نسبت شعاع کانال مرکزی چرخاننده به شعاع کل) برابر ۰/۶۴ است. تعداد پره‌ها در تمامی چرخاننده‌ها ۸ عدد است که نمای گرافیکی آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۱- مشخصات هندسی چرخاننده‌های مورد استفاده

Table 1- Swirlers specifications

Swirler	(α)	($R = R_c/R_i$)	Blockage	Swirl No.
1	34°	0.64	76%	0.52
2	40°	0.64	76%	0.64
3	50°	0.64	76%	0.92
4	34°	0.64	52%	0.42
5	40°	0.64	52%	0.53
6	50°	0.64	52%	0.75
7	34°	0.64	43%	0.39
8	40°	0.64	43%	0.48
9	50°	0.64	43%	0.68

کانال مرکزی چرخاننده توسط یک صفحه سوراخ‌دار مغشوش‌کننده پوشیده شده است که برای نسبت انسداد ۷۶٪ این صفحه مغشوش‌کننده دارای ۱۹ سوراخ با شعاع ۰/۴۵ میلی‌متر و برای نسبت انسدادهای ۵۲٪ و ۴۳٪ نیز به‌ترتیب ۱۲ و ۷

سوراخ با شعاع ۰/۸ و ۱/۱۵ میلی‌متر است. الگوی قرارگیری سوراخ‌های صفحه مغشوش‌کننده برای هر نسبت انسداد متمایز در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود. در ساخت تمامی چرخاننده‌ها، از تکنولوژی پرینت سه‌بعدی استفاده شده است که نمونه ساخته‌شده چرخاننده شماره ۱ در شکل ۳-الف نشان داده شده است. در شکل ۳-الف، نمای پره‌های چرخاننده در سمت راست و نمای پایینی چرخاننده و صفحه مغشوش‌کننده به‌همراه غلاف نگهدارنده چرخاننده در نازل مشعل در سمت چپ مشاهده می‌شود.

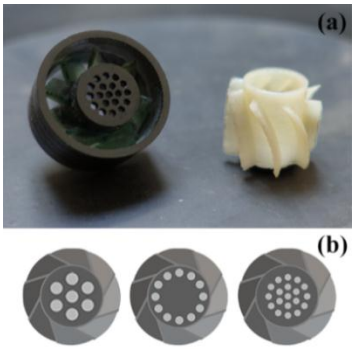

Figure 3- a) 3D printed swirler-1 of present study, b) 3 different arrangements of holes of perforated plate
شکل۳- الف) نمونه پرینت سه‌بعدی‌شده چرخاننده شماره ۱ و ب) الگوی صفحه مغشوش‌کننده چرخاننده‌ها

معرفی دستگاه و تجهیزات آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها تجربی یک بستر آزمایش در آزمایشگاه پیش‌رانش دانشگاه شهید بهشتی طراحی و ساخته شد[۲۱،۲۰]. این بستر آزمایش شامل مجموعه ابزار دقیق اندازه‌گیری و کنترل مشخصات جریان‌های ورودی سوخت و هوا به دستگاه آزمایش و ابزارآلات آنالیز و بررسی شعله و همچنین بخش اصلی مجموعه، یعنی مشعل کم‌چرخش، است. مشعل کم‌چرخش استفاده‌شده شامل پنج بخش اصلی است که شامل محفظه آرام‌کننده جریان[1]، بخش تزریق سوخت، بخش اختلاط سوخت و هوا، چرخاننده و بخش نازل مشعل است. در شکل ۴، مشعل کم‌چرخش به‌همراه طرحواره اجزای آن مشاهده می‌شود.

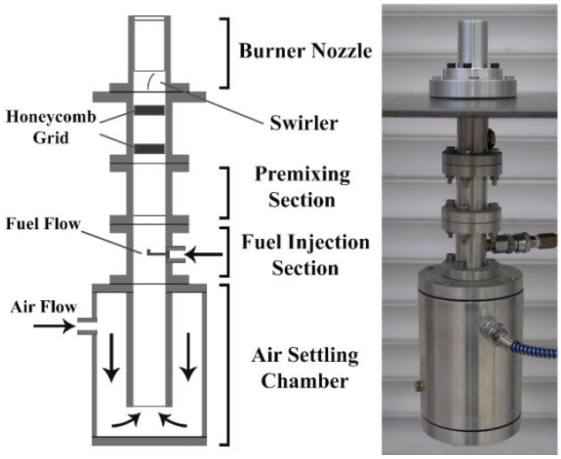

Figure 4- Low swirl burner of present study and schematic of burner main parts
شکل ۴- مشعل کم‌چرخش مورد مطالعه به‌همراه طرحواره اجزای اصلی آن

1. Settling Chamber

در بخش اندازه‌گیری و کنترل جریان‌های ورودی مشخصات اصلی جریان‌های سوخت و هوا شامل دبی عبوری و دما و فشار جریان اندازه‌گیری‌شده و کنترل میزان این مشخصات جریان توسط شیرهای کنترلی و رگلاتور تنظیم فشار و تنظیم‌کننده دبی عبوری انجام می‌شود. در شکل ۵، طرحواره اجزای اصلی اجزای آزمایش مشاهده می‌شود.

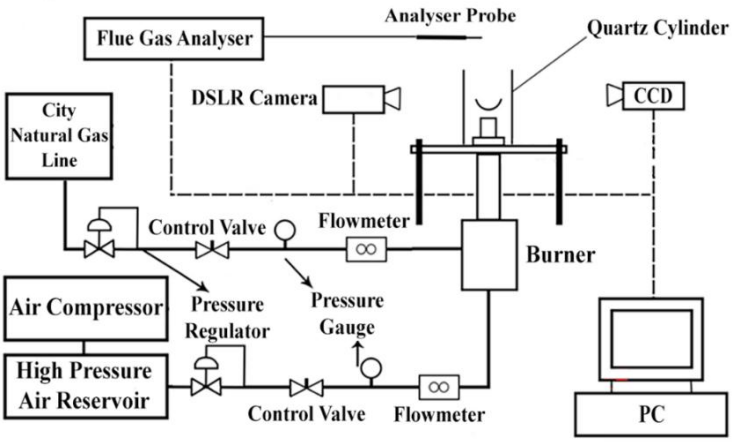

Figure 5- Test rig

شکل ۵- طرحواره اجزای آزمایش

دبی جریان هوا توسط دبی‌سنج با نام تجاری Rate Master و ساخت شرکت Dwyer اندازه‌گیری می‌شود که دارای حداکثر ظرفیت اندازه‌گیری 94 لیتر بر دقیقه (LPM) و دارای حداکثر خطای ۲ درصد (در حداکثر ظرفیت اندازه‌گیری) است. فشار هوای عبوری توسط گیج فشار با نام تجاری ST-100 و ساخت شرکت STL با محدوده اندازه‌گیری ۰/۱ بار تا ۱۰ بار اندازه‌گیری شده و دارای خطای حداکثر ۱ درصد است. کنترل دبی جریان با حداقل میزان تغییرات دلخواه توسط تنظیم‌کننده دبی عبوری با نام تجاری HPC-312 و ساخت شرکت HPC انجام شده که با کمترین افت فشار قابلیت تعیین دبی دلخواه عبوری را دارد. سوخت آزمایش این مطالعه گاز طبیعی شهری است. برای نشان‌دادن انطباق‌پذیری مشعل کم‌چرخش با سوخت گاز شهری و اثبات امکان استفاده از مشعل بالا در کاربری‌های شهری، مشخصات جریان گاز بدون تغییر در اجزای شیمیایی و بدون ترکیب و یا رقیق‌سازی با سایر سوخت‌های گازی عینا وارد دستگاه آزمایش مشعل کم‌چرخش شده و احتراق انجام می‌گیرد. دبی جریان گاز توسط دبی‌سنج با نام تجاری FL-3096SA و ساخت شرکت Omega اندازه‌گیری می‌شود که دارای حداکثر ظرفیت اندازه‌گیری ۸ لیتر بر دقیقه و دارای حداکثر خطای ۲ درصد (در حداکثر ظرفیت اندازه‌گیری) است. فشار هوای عبوری توسط گیج فشار با نام تجاری ST-60 و ساخت شرکت STL با رنج اندازه‌گیری ۰/۰۱ بار تا ۱ بار اندازه‌گیری شده و دارای خطای حداکثر ۱ درصد است. کنترل دبی جریان با حداقل میزان تغییرات دلخواه توسط تنظیم‌کننده دبی عبوری با نام تجاری HPC-34 و ساخت شرکت HPC انجام شده که با کمترین افت فشار قابلیت تعیین دبی دلخواه عبوری را دارد.

نتایج

تاثیر نسبت انسداد بر حد خاموشی شعله

کمترین نسبت هم‌ارزی، که شعله در آن پایدار است، به‌عنوان حد خاموشی شناخته می‌شود. برای تعیین حد خاموشی به این صورت عمل می‌شود که پس از تشکیل یک شعله پایدار میزان سوخت ورودی به‌صورت پلکانی کاهش یافته که این کاهش سوخت ورودی متناظر با کاهش نسبت هم‌ارزی است و با ادامه روند کاهش سوخت ورودی خاموشی شعله اتفاق افتاده و نسبت هم‌ارزی متناظر با آن مشخص می‌شود[۲۳،۲۲،۷]. در طی آزمایش‌های تجربی حد خاموشی شعله در دو حالت به‌دست آمده

است. یک حالت در زمانی که یک شعله پایدار شکل گرفته و با کم‌کردن میزان سوخت ورودی و رساندن شعله به مرز خاموشی، حد خاموشی متناظر به‌دست می‌آید و دیگری زمانی که هنوز شعله‌ای تشکیل نشده و با افزایش میزان سوخت در جریان ورودی و انجام جرقه‌زنی شعله اولیه تشکیل و احتراق شروع می‌شود. نسبت هم‌ارزی‌های به‌دست‌آمده از دو حالت متفاوت به‌نوعی کمترین نسبت هم‌ارزی شعله پایدار را نشان می‌دهند. مقادیر خاموشی مربوط‌به لحظه خاموش‌کردن شعله در نمودار شکل‌های ۶ و ۷ با اختصاص نماد D (ابتدای واژه Decreasing)، که اشاره به روند کاهش میزان سوخت برای به‌دست‌آوردن حد خاموشی است، نشان داده شده است. برای روند افزایشی در نمودارهای شکل‌های ۶ و ۷ از نماد I استفاده شده است.

با بررسی نمودارها مشخص شد که حد خاموشی در لحظه روشن‌کردن شعله بیش از حد خاموشی در لحظه خاموش‌کردن شعله است. علت این تفاوت در لحظه برقراری تعادل دمایی بین واکنش‌دهنده‌ها و محصولات احتراق است. در لحظه روشن‌کردن شعله، به‌دلیل عدم وجود تعادل دمایی در ناحیه احتراق، نیاز به جرقه‌زنی در نسبت هم‌ارزی بالاتری است تا انرژی بیشتری آزاد شده و تعادل دمایی مطلوب در ناحیه شعله به‌دست آید. پس از تشکیل شعله، برقراری واکنش و شکل‌گیری تعادل دمایی، امکان تشکیل شعله در نسبت‌های هم‌ارزی کمی پایین‌تر از میزان روشن‌شدن شعله فراهم می‌شود. در شکل‌های ۶ و ۷، مقادیر حد خاموشی مربوط به هر چرخاننده بر اساس عدد چرخش هندسی ترسیم شده است. عدد چرخش‌های مربوطه از رابطه (۲) به‌دست آمده‌اند. ذکر این نکته لازم است که رابطه (۲) بر اساس هندسه چرخاننده کم‌چرخش به‌دست آمده و به عنوان عدد چرخش هندسی شناخته می‌شود که تنها برای اندازه‌گیری و مقایسه شدت چرخش جریان بین چرخاننده‌های کم‌چرخش به‌کار می‌رود. این رابطه درواقع بیانگر نسبت سهم بخش چرخشی جریان به بخش محوری است و به همین دلیل در زوایای پره زیاد (به‌دلیل بالابودن شدت چرخش جریان) و در نسبت انسدادهای بالا (به‌دلیل ضعیف‌بودن جریان محوری) عدد چرخش جریان بالا می‌رود. به‌همین دلیل، مشاهده می‌شود ضمن اینکه عدد چرخش بعضی چرخاننده‌های این مطالعه بیش از ۰/۶ است، به‌دلیل اینکه ماهیت و مشخصات میدان جریان و مکانیزم پایداری شعله در آن‌ها برمبنای میدان جریان احتراق کم‌چرخش است، جزء چرخاننده‌های کم‌چرخش به‌حساب می‌آیند. خطای عدم قطعیت داده‌ها ناشی ازخطای سیستماتیک در اندازه‌گیری داده‌ها، که به‌دلیل ابزار و تجهیزات اندازه‌گیری است، از طریق روابط مربوطه محاسبه می‌شود که میزان آن در این بخش کمتر از ۴ درصد محاسبه شده است.

در تعیین خطای ناشی از تکرار آزمایش‌های تجربی نیز به این صورت عمل شد که برای به‌دست‌آوردن هر داده، آزمایش‌ها به تعداد ۵ بار تکرار شده و سپس با میانگین‌گیری از این ۵ مقدار، میانگین آن‌ها در نمودار رسم می‌شود. میزان بیشترین اختلاف بین این ۵ مقدار با میانگین حساب‌شده به‌عنوان خطای ناشی از تکرار آزمایش‌ها درنظر گرفته شده و در نمودارها به‌صورت ناحیه خطا نشان داده شده است. در این آزمایش، بیشترین اختلاف بین داده‌ها و میانگین‌های حساب‌شده کمتر از ۵ درصد بوده که به همین علت میزان خطای تصادفی ناشی از تکرار آزمایش‌ها ۵ درصد درنظر گرفته شده که به صورت دامنه خطا در نمودار نشان داده شده و مقادیر خاموشی با اطمینان ۹۵٪ نسبت‌به تکرار آزمایش‌ها در نمودارهای شکل ۶ و ۷ رسم شده‌اند. در این نمودارها مشاهده می‌شود که حد خاموشی برای چرخاننده با عدد چرخش بیشتر، پایین‌تر از سایر چرخاننده‌ها قرار گرفته است که می‌توان نتیجه گرفت چرخاننده با نسبت انسداد بیشتر نسبت‌به خاموشی مقاوم‌تر است. دلیل آن نیز این است که همان‌طور که در بخش معرفی عدد چرخش بیان شد، نسبت انسداد بالاتر سبب می‌شود که عدد چرخش برای این چرخاننده بیشتر شود و شدت چرخش جریان در زاویه بالاتر بیشتر است و چرخش بیشتر سبب مقاومت بیشتر شعله مربوط‌به چرخاننده نسبت‌به سایر چرخاننده‌ها شده است. در مقایسه نمودارهای حد خاموشی در دو سرعت توده متفاوت 30 LPM و 50 LPM مشاهده می‌شود که حد خاموشی شعله با افزایش سرعت توده کاهش یافته است و رفتار شعله در برابر خاموشی را بهبود بخشیده است که دلیل آن افزایش شدت چرخش جریان همراه با افزایش سرعت توده جریان است. افزایش شدت چرخش جریان به پایداری بیشتر شعله در برابر خاموشی کمک می‌کند.

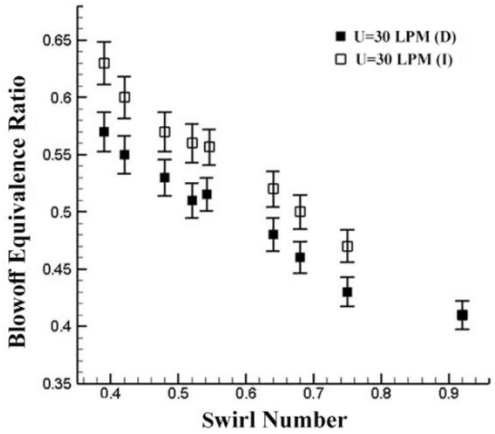

Figure 6- Lean blowoff limits of swirlers in U=30LPM

شکل ۶- حد خاموشی چرخاننده‌ها براساس عدد چرخش در سرعت توده ۳۰ لیتر بر دقیقه

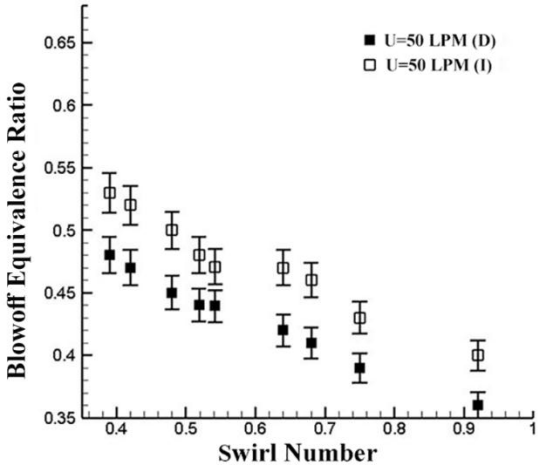

Figure 7- Lean blowoff limits of swirlers in U=50LPM

شکل ۷- حد خاموشی چرخاننده‌ها براساس عدد چرخش در سرعت توده ۵۰ لیتر بر دقیقه

رژیم‌های احتراقی شعله

مطالعات تجربی انجام‌گرفته بر روی پدیده برگشت شعله نشان داده است که با افزایش نسبت هم‌ارزی مخلوط سوخت و هوا، که افزایش نرخ سوزش شعله را به‌همراه دارد، شعله تمایل به حرکت به سمت بالادست جریان پیدا کرده و در نسبت‌های هم‌ارزی مشخصی جبهه شعله به سمت دهانه نازل مشعل حرکت کرده و حتی وارد نازل مشعل و بدنه مشعل می‌شود که در مواردی آسیب به بدنه مشعل و تخریب سامانه احتراقی را به‌همراه دارد. این پدیده از لحاظ ایمنی بسیار با اهمیت است و دامنه کاری مشعل به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که از برگشت شعله جلوگیری شود. در مطالعه حاضر، با افزایش نسبت هم‌ارزی، شعله یک حالت گذار را طی کرده که در آن از حالت Vشکل (کاسه‌ای‌شکل) متدوال شعله‌های کم‌چرخش به شعله‌ای گردابه‌ای‌شکل و متصل به دهانه مشعل تبدیل می‌شود. شعله Vشکل در حالت پایدار در شکل ۸ مشاهده می‌شود. برای بررسی تاثیر افزایش نسبت هم‌ارزی بر روی احتراق شعله کم‌چرخش این گونه عمل می‌شود که با برقرارکردن یک شعله Vشکل، که در حالت پایدار خود است، میزان نسبت هم‌ارزی را افزایش داده تا شعله فرایند گذار خود را آغاز کند. سپس، مشاهده شد که شعله در یک نسبت هم‌ارزی مشخص رفتار گذار خود را آغاز کرده و در ابتدا تمایل دارد که به حالت Mشکل دربیاید که در شکل ۹ این حالت از شعله مشاهده می‌شود.

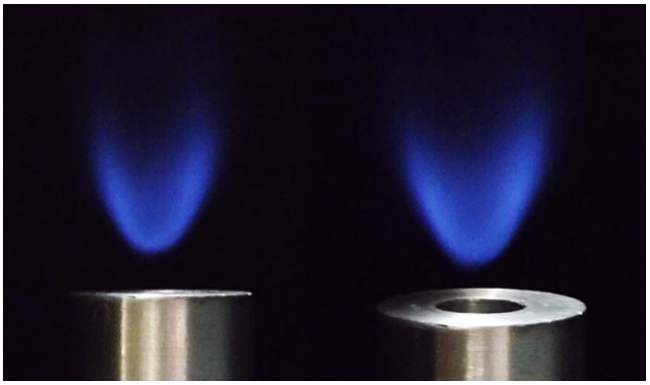

Figure 8- Lifted stable flame of swirler-1
شکل ۸- شعله معلق پایدار مربوطبه چرخاننده شماره ۱

Figure 9- Lifted flame in M-Shape condition
شکل ۹- شعله در حالت Mشکل

با افزایش بیشتر نسبت هم‌ارزی شکل شعله از حالت Mشکل به حالت گردابه‌ای‌شکل درآمده که جبهه شعله محیط این شکل گردابه‌ای است. در این حالت، جبهه شعله تمایل بسیاری به اتصال به دهانه خروجی مشعل دارد که این اتصال جبهه شعله به دهانه مشعل در یک نسبت هم‌ارزی مشخص ابتدا به‌صورت جزئی اتفاق می‌افتد که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود و با افزایش بیشتر نسبت هم‌ارزی جبهه شعله به‌طور کامل به دهانه نازل متصل می‌شود که در شکل ۱۱ این اتصال کامل مشاهده می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که به‌دلیل دمای پایین نازل مشعل نسبت‌به شعله، اتصال فیزیکی بین جبهه شعله و نازل وجود ندارد و فاصله بسیار کمی بین ابتدای جبهه شعله و نازل مشعل وجود دارد و به‌دلیل وجود همین فاصله اندک بدنه مشعل تحت تاثیر شعله گرم نمی‌شود که با اندازه‌گیری دمای نازل مشخص شد که دمای آن در طی زمان ثابت باقی می‌ماند. در این مطالعه مشاهده شد که با افزایش بیشتر نسبت هم‌ارزی تنها بر قطر و دامنه طولی شعله گردابه‌ای‌شکل افزوده می‌شود و شعله به داخل مشعل برنمی‌گردد.

در این مطالعه، با توجه به مشاهدات تجربی و برای بررسی تغییر حالات شعله در نسبت هم‌ارزی‌های متفاوت، سه رژیم احتراقی برای شعله قابل تعریف است که عبارت‌اند از: شعله پایدار Vشکل، شعله در حالت اتصال جزئی و شعله در حالت متصل به دهانه نازل مشعل که ناحیه کاری این سه رژیم را می‌توان به‌صورت سه ناحیه احتراقی برحسب نسبت هم‌ارزی و در سرعت‌های ورودی سوخت و هوای متفاوت نشان داد. در این مطالعه، نسبت هم‌ارزی متناظر با لحظه اولین اتصال جزئی جبهه شعله به دهانه نازل مشعل به‌عنوان حد پایین ناحیه رژیم احتراقی شعله نیمه‌متصل درنظر گرفته شده و نسبت هم‌ارزی متناظر

با اتصال کامل شعله به دهانه نازل به‌عنوان حد پایین ناحیه رژیم احتراقی کاملا متصل شعله درنظر گرفته می‌شود. برای بررسی و مقایسه بهتر نحوه تاثیر تغییر نسبت انسداد بر روی تغییرات رژیم‌های احتراقی شعله مقادیر نسبت هم‌ارزی‌های شعله نیمه‌متصل و همچنین شعله کاملامتصل برای سه نسبت انسداد متفاوت با زاویه پره یکسان ۳۴ درجه در نمودارهای شکل ۱۲ تا ۱۴ برحسب عدد رینولدز محاسبه‌شده از قطر دهانه خروجی مشعل مشاهده می‌شود.

Figure 10- Partially attached flame
شکل ۱۰- شعله در حالت اتصال جزئی

Figure 11- Fully attached flame
شکل ۱۱- شعله در حالت اتصال کامل به دهانه نازل مشعل

در این مطالعه، با توجه به مشاهدات تجربی و برای بررسی تغییر حالات شعله در نسبت هم‌ارزی‌های متفاوت، سه رژیم احتراقی برای شعله قابل تعریف است که عبارت‌اند از: شعله پایدار Vشکل، شعله در حالت اتصال جزئی و شعله در حالت متصل به دهانه نازل مشعل که ناحیه کاری این سه رژیم را می‌توان به‌صورت سه ناحیه احتراقی برحسب نسبت هم‌ارزی و در سرعت‌های ورودی سوخت و هوای متفاوت نشان داد. در این مطالعه، نسبت هم‌ارزی متناظر با لحظه اولین اتصال جزئی جبهه شعله به دهانه نازل مشعل به‌عنوان حد پایین ناحیه رژیم احتراقی شعله نیمه‌متصل درنظر گرفته شده و نسبت هم‌ارزی متناظر با اتصال کامل شعله به دهانه نازل به‌عنوان حد پایین ناحیه رژیم احتراقی کاملا متصل شعله درنظر گرفته می‌شود. برای بررسی و مقایسه بهتر نحوه تاثیر تغییر نسبت انسداد بر روی تغییرات رژیم‌های احتراقی شعله مقادیر نسبت هم‌ارزی‌های شعله نیمه‌متصل و همچنین شعله کاملامتصل برای سه نسبت انسداد متفاوت با زاویه پره یکسان ۳۴ درجه در نمودارهای شکل ۱۲ تا ۱۴ برحسب عدد رینولدز محاسبه‌شده از قطر دهانه خروجی مشعل مشاهده می‌شود.

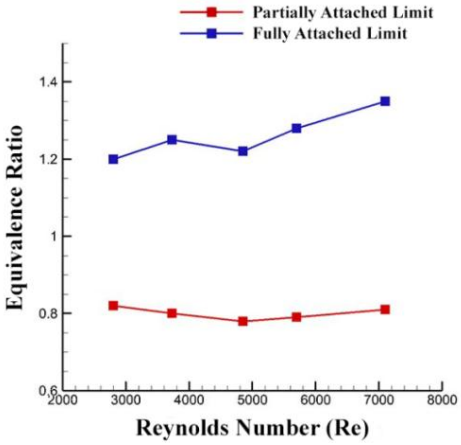

Figure 12- Flame regimes of swirler-1

شکل ۱۲- نمودار حدود رژیم های احتراقی شعله براساس عدد رینولدز مربوطبه چرخاننده شماره ۱

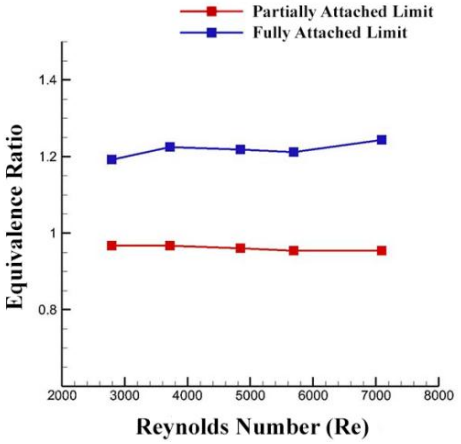

Figure 13- Flame regimes of swirler-4

شکل ۱۳- نمودار حدود رژیم های احتراقی شعله براساس عدد رینولدز مربوطبه چرخاننده شماره ۴

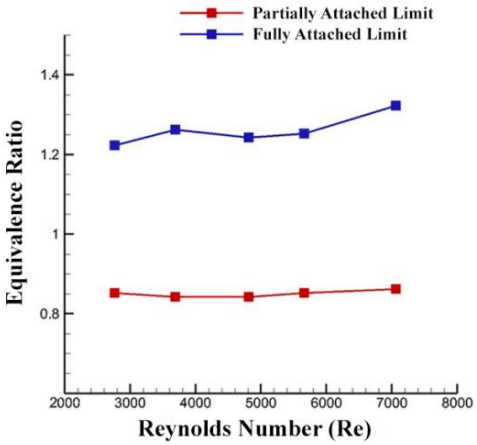

Figure 14- Flame regimes of swirler-7

شکل ۱۴- نمودار حدود رژیم های احتراقی شعله براساس عدد رینولدز مربوطبه چرخاننده شماره ۷

آلاینده‌های احتراق

اندازه‌گیری و آنالیز گازهای آلاینده حاصل از احتراق توسط آنالیزور دود (KANE-452) انجام شده است که مشخصات اندازه‌گیری و دقت دستگاه در جدول ۲ آورده شده است. برای اندازه‌گیری میزان آلایندگی شعله مربوطبه هر چرخاننده یک سیلندر کوارتز در جداره بیرونی نازل قرار گرفته و پراپ نمونه‌برداری دستگاه آنالیزور در انتهای سیلندر کوارتز قرار می‌گیرد و مقادیر آلاینده NO_x اندازه‌گیری می‌شود. استفاده از سیلندر کوارتز باعث تجمیع جریان گازهای خروجی احتراق می‌شود و با جلوگیری از ورود هوای محیط به ناحیه احتراق و جلوگیری از پایین‌آمدن غلظت آلایندها در نمونه‌های گازهای احتراق باعث بالارفتن دقت اندازه‌گیری شده و مقادیر به‌دست‌آمده را به حالت احتراق شعله در محفظه احتراق نزدیک‌تر می‌کند.

جدول ۲- دامنه اندازه‌گیری NOx دستگاه آنالیزور Kane-452
Table 2- Analyser Kane-452 Nox measuring ranges

Contaminant	Range	Label spacing	Accuracy
Nox	0 – 100 ppm 1500 ppm	1 ppm	(+/-) 2 ppm ≤ 30 ppm (+/-) 5 ppm ≤ 100 ppm

هم‌زمان با اندازه‌گیری NO_x میزان اکسیژن اضافی احتراق، که در گازهای خروجی احتراق موجود است، نیز توسط دستگاه آنالیزور اندازه‌گیری می‌شود تا در گزارش میزان آلایندگی شعله به‌کار برده شود، زیرا میزان اندازه‌گیری‌شده آلاینده NO_x معمولا براساس نسبت تصحیح O_2 بیان می‌شود. دلیل این امر این است که حضور اکسیژن اضافی در گازهای احتراق باعث تاثیرگذاری بر مقادیر آلاینده‌ها می‌شود و از امکان مقایسه نتایج جلوگیری می‌کند. از این رو، مقادیر NO_x اندازه‌گیری‌شده و مقادیر اکسیژن اضافی احتراق اندازه‌گیری‌شده با استفاده از رابطه (۶) به یک نسبت تصحیح اکسیژن استاندارد تبدیل می‌شود تا امکان مقایسه نتایج مطالعات فراهم شود.

ویژگی اصلی مشعل کم‌چرخش توانایی در پایدارکردن شعله رقیق‌شده با هوای اضافی به‌دلیل پایین‌آوردن میزان آلایندگی است. به همین دلیل احتراق آن عموما در نسبت هم‌ارزی‌های پایین انجام می‌شود. از این رو، اکثر مطالعات در زمینه احتراق کم‌چرخش میزان ناکس اندازه‌گیری‌شده را در نسبت تصحیح اکسیژن ۱۵٪ گزارش می‌کنند[۲۵،۲۴،۱۷،۱۲]. در این مطالعه نیز، به‌دلیل فراهم‌کردن امکان مقایسه‌های آتی نتایج، میزان ناکس اندازه‌گیری‌شده با استفاده از رابطه (۶) به اکسیژن ۱۵٪ تصحیح و تبدیل شده و سپس در نمودارها ذکر می‌شوند.

$$NO_{Corrected} = NO_{Measured} \frac{(1 - \frac{0/15}{0/21})}{(1 - \frac{O_{2Measured}}{0/21})} \qquad (۶)$$

در رابطه بالا، میزان اندازه‌گیری‌شده NO_x و اکسیژن اضافی قرار گرفته و آلایندگی تصحیح‌شده در ۱۵ درصد اکسیژن اضافی حساب می‌شود. در شکل ۱۵، میزان آلاینده‌های NO_x احتراق چرخاننده‌های ۱ تا ۳ در برابر نسبت هم‌ارزی رسم شده است.

در نمودارهای شکل ۱۶ و ۱۷ مربوطبه چرخاننده‌های شماره ۴ تا ۹ نیز مشاهده می‌شود که افزایش نسبت هم‌ارزی سبب افزایش میزان NO_x شده و این مطلب نشان می‌دهد برای داشتن بیش از پیش کمترین نرخ آلاینده ناکس باید احتراق در شرایط رقیق‌شده با هوای اضافی انجام شود. خط‌چین قرمزرنگ در نمودارهای شکل ۱۵ تا ۱۷ نمایانگر خط خاموشی شعله است که در مقادیر نسبت هم‌ارزی کمتر از آن شعله امکان تشکیل ندارد.

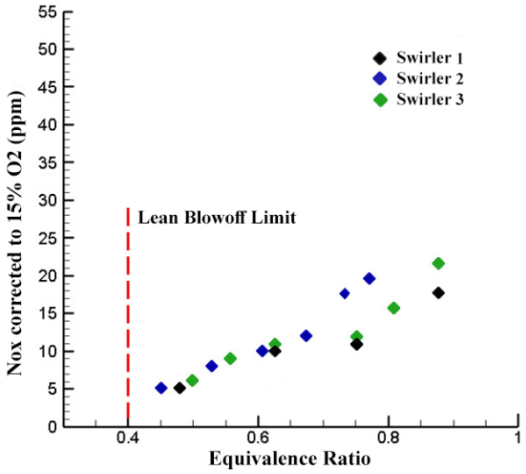

Figure 15- Nox emissions of swirlers as a function of equivalence ratio

شکل ۱۵- میزان آلاینده Nox چرخاننده‌های مختلف برحسب نسبت هم‌ارزی

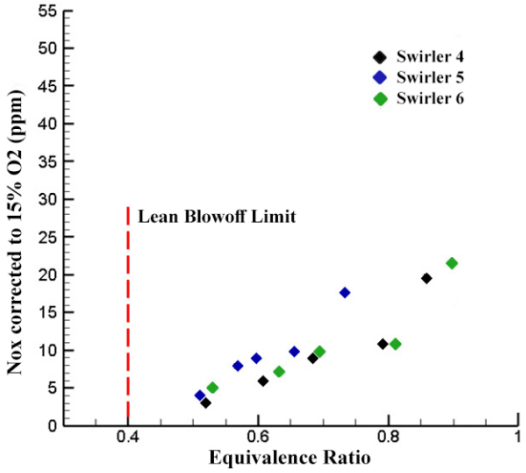

Figure 16- Nox emissions of swirlers as a function of equivalence ratio

شکل ۱۶- میزان آلاینده Nox چرخاننده‌های مختلف برحسب نسبت هم‌ارزی

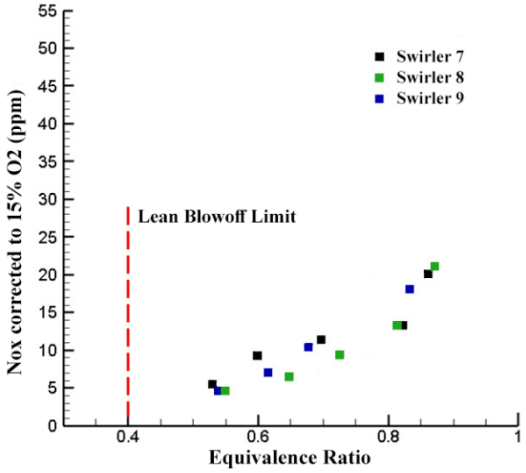

Figure 17- Nox emissions of swirlers as a function of equivalence ratio

شکل ۱۷- میزان آلاینده Nox چرخاننده‌های مختلف برحسب نسبت هم‌ارزی

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به بررسی تاثیر نسبت انسداد انژکتور کم‌چرخش بر حدود پایداری و رژیم‌های احتراقی شعله با استفاده از یک مشعل کم‌چرخش پرداخته می‌شود. نسبت انسداد یکی از پارامترهای اصلی چرخاننده کم‌چرخش است که تاثیر مهمی بر پایداری شعله کم‌چرخش دارد. به‌منظور بررسی تاثیر نسبت انسداد کانال مرکزی چرخاننده بر پایداری، سه نسبت انسداد متفاوت بررسی شد. تغییر نسبت انسداد چرخاننده‌ها از طریق تغییر مساحت موثر کانال مرکزی امکان‌پذیر است که در این تحقیق سه نسبت انسداد برابر با ۰/۷۶، ۰/۵۲ و ۰/۴۳ انتخاب شد و برای هرکدام از این نسبت‌ها سه زاویه پره نیز درنظر گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت انسداد حد خاموشی چرخاننده‌ها کاهش می‌یابد، به‌طوری که با افزایش نسبت انسداد از ۴۳٪ تا ۷۶٪ میزان حد خاموشی تا حدود ۲۵٪ کاهش یافته و پایداری شعله بهبود می‌یابد. در این مطالعه مشاهده شد که با افزایش نسبت هم‌ارزی شعله یک فرایند گذار را طی کرده که در آن شعله از یک حالت Vشکل معلق پایدار تا حالت گردابه‌ای‌شکل متصل به دهانه مشعل پیش می‌رود. فرایند گذار را می‌توان به سه رژیم احتراقی متفاوت تقسیم کرد. این رژیم‌های احتراقی شامل حالت پایدار شعله معلق، شعله در حالت اتصال جزئی به دهانه مشعل و شعله در حالت اتصال کامل به دهانه مشعل‌اند که حدود این رژیم‌های احتراقی براساس نسبت هم‌ارزی و عدد رینولدز تعیین شد. در این مطالعه مشاهده شد که عملکرد شعله در خاموشی با افزایش سرعت توده تا حدی بهبود می‌یابد. همچنین، در این مطالعه برگشت شعله به داخل مشعل در هیچ شرایط ورودی و هندسه مشعل مشاهده نشد که این مورد را می‌توان به‌عنوان یکی از اثرات کوچک‌سازی مشعل‌های کم‌چرخش درنظر گرفت. زیرا، در مطالعات انجام‌شده در گذشته، در شرایط مشخصی، شعله به درون مشعل وارد شده و سبب آسیب به بدنه مشعل می‌شود، اما در این مطالعه برگشت شعله مشاهده نشد. بررسی میزان آلایندگی چرخاننده نشان داد که میزان آلاینده NO_x حاصل از احتراق با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد و در نسبت‌های هم‌ارزی نزدیک به ۱ میزان NO_x در حدود ۲۰ppm (در میزان تصحیح‌شده با ۱۵٪ اکسیژن اضافی) است که این میزان با نتایج مطالعات گذشته در زمینه مشعل‌های کم‌چرخش همخوانی داشته و نشان می‌دهد که آلاینده‌های NO_x در احتراق با هوای اضافی تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابند و می‌توان مشعل کم‌چرخش را به‌عنوان راهکاری برای کاهش آلاینده‌های NO_x در سامانه‌های احتراقی به‌کار گرفت.

منابع

1. D. T. Yegian and R. K. Cheng, "Stability characteristics and emission levels of a laboratory hot water heater utilizing a weak-swirl burner," *American Flame Research Council Fall International Symposium*, Berkeley, California, USA, 1995.
2. N. Syred and J. M. Beér, "Combustion in swirling flows: A review," *Combustion and Flame*, 23, No. 2, 1974, pp. 143-201.
3. C. K. Chan, K. S. Lau, W. K. Chin and R. K. Cheng RK, "Freely propagating open premixed turbulent flames stabilized by swirl," *Symposium (International) on Combustion*, 24, No. 1, 1992, pp. 511–518.
4. D. T. Yegian and R. K. Cheng, *Development of a vane-swirler for use in a low NOx weak-swirl burner*, Office of Scientific and Technical Information (OSTI), Technical Report, DE97001252, 1996.
5. D. T. Yegian, R. K. Cheng, "Scaling the weak-swirl burner from 15 kW to 1 MW," *Combustion Institute meeting*, Berkely, California, United States, 1998 .
6. R. K. Cheng, D. T. Yegian, M. M. Miyasato, G. S. Samuelsen, C. E. Benson, R. Pellizzari and et al, "Scaling and development of low-swirl burners for low-emission furnaces and boilers", *Proceedings of the Combustion Institute*, 28, No. 1, 2000, pp. 1305–1313.
7. M. R. Johnson, D. Littlejohn, W. A. Nazeer, K. O. Smith and R. K. Cheng, "A comparison of the flowfields and emissions of high-swirl injectors and low-swirl injectors for lean premixed gas turbines," *Proceedings of the Combustion Institute*, 30, No. 2, 2005, pp. 2867–2874.
8. M. Farshchi and N. D. Tohidi ND, "Experimental Investigation of a lean premixed low swirl burner emissions," *3rd Fuel and Combustion Conference of Iranian Combustion Institute*, Tehran, Iran, 2010. (in Persian)
9. M. Shahsavari and M. Farshchi, "Experimental Investigation of the effects of geometrical parameters of low swirl burner on flame stability," *10th International Conference of Iranian Aerospace Society*, Tehran, Iran, 2011. (in Persian)
10. M. Shahsavari and M. Farshchi, "Stability Characteristics and NOx Emissions of Low Swirl Flames," *Fuel and Combustion*, 5, No. 2, 2013, pp. 59-75. (in Persian)
11. S. I. Pishbin, S. M. Modares Razavi and M. Ghazikhani, "Investigation of the effects of performance parameters on the flame behavior and temperature distribution and exergy analysis of low swirl premixed burners," *Modares Mechanical Engineering*, 14, 2014, pp. 27-38. (in Persian)

12. P. L. Therkelsen, D. Littlejohn and R. K. Cheng, "Parametric Study of Low-Swirl Injector Geometry on its Operability", *Volume 2: Combustion, Fuels and Emissions, Parts A and B. Presented at the ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*, Copenhagen, Denmark, 2012.
13. A. A. Verbeek, T. W. F. M. Bouten, G. G. M. Stoffels, B. J. Geurts and T. H. van der Meer, "Fractal turbulence enhancing low-swirl combustion," *Combustion and Flame*, 162, 2015, pp. 129-143.
14. A. A. Verbeek, P. A. Willems, G. G. M. Stoffels, B. J. Geurts and T. H. van der Meer, "Enhancement of turbulent flame speed of V-shaped flames in fractal-grid-generated turbulence," *Combustion and Flame*, 167, 2016, pp. 97-112.
15. G. D. ten Thij, A. A. Verbeek and T. H. van der Meer, "Application of Fractal Grids in Industrial Low-Swirl Combustion," *Flow, Turbulence and Combustion*, 96, 2016, pp. 801-818.
16. M. Nahvi, K. Mazaheri, M. M. Parsafar and A. Mohammadpour, "Experimental analysis of blockage effect on low-swirl burner combustion parameters for lean premixed natural gas-air flames," *18th Fluid Dynamics Conference*, Mashhad, Iran, 2019.
17. A. Frank, P. Therkelsen, M. Sierra Aznar, V. H. Rapp, R. K. Cheng and J. Y. Chen, "Investigation of the Down-Scaling Effects on the Low Swirl Burner and its Application to Microturbines," *ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers, Oslo, Norway, 2018.
18. J. M. Beér and N. A. Chigier, "*Combustion Aerodynamics*," New York, Halsted Press Division. Wiley, 1972.
19. R. K. Cheng, S. A. Fable, D.Schmidt, L. Arellano, K. O. Smith, "Development of a low swirl injector concept for gas turbines," *International Joint Power Conference*, 2001.
20. N. Heshmati, *Design and Development of A Premixed Low Swirl Burner with The Approach of Applying The LSB In Microturbines*, Msc Disseration, Department of New Technologies Engineering, Tehran: Shahid Beheshti University, 2019. (in Persian)
21. N. Heshmati and S. M. Mirsajedi, "Experimental Investigation of low swirl burner flame stability," *4th National Conference of Iranian Aerospace Propulsion Association*, 2018. (in Persian)
22. D. Littlejohn, R. K. Cheng, D. R. Noble and T. Lieuwen, "Laboratory Investigations of Low-Swirl Injectors Operating With Syngases," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 132, 2010, pp. 30-38.
23. D. Beerer, *Combustion characteristics and performance of low-swirl injectors with natural gas and alternative fuels at elevated pressures and temperatures*, PhD Disseration, Department of Aerospace Engineering, Irvine: University of California, 2013.
24. R. K. Cheng, D. Littlejohn, P. A. Strakey and T. Sidwell, "Laboratory investigations of a low-swirl injector with H2 and CH4 at gas turbine conditions," *Proceedings of the Combustion Institute*, 32, 2009, pp. 3001-3009.
25. R. K. Cheng, D. Littlejohn, W. A. Nazeer, K. O. Smith, "Laboratory Studies of the Flow Field Characteristics of Low-Swirl Injectors for Adaptation to Fuel-Flexible Turbines," *Volume 1: Combustion and Fuels, Education. Presented at the ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air*, Barcelona, Spain, 2006.

English Abstract

Experimental study of the effects of low swirl injector blockage ratio on stability limits and combustion regimes of natural gas flame

Navid Heshmati[1] and Seyyed Mehdi Mirsajedi[2*]

1- New Science and technologies department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Na.heshmati@mail.sbu.ac.ir
2- New Science and technologies department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, M_mirsajedi@sbu.ac.ir
*Corresponding author

(Received: 2020.05.06, Received in revised form: 2020.05.10, Accepted: 2020.05.14)

In this study, the effect of a low swirl injector blockage ratio on the flame stability limits is investigated by using a low swirl burner. The blockage ratio is one of the main geometrical parameters of the low-swirl injector which has a significant impact on the stability of the flame. In order to investigate the influence of the blockage ratio of the central channel of low swirl injector on stability, nine swirler with distinct geometries were investigated. The results showed that with increasing the blockage ratio, the flame extinction limit was reduced so that increasing the blockage ratio from 43% to 76% reduced the extinction limit to about 25% and improved flame stability. It was also observed in this study that by increasing the equivalence ratio, the flame undergoes a transition process in which the flame proceeds from a stable lifted bowl shape to a vortex shape attached to the burner nozzle. The transition process can be divided into three different combustion regimes and in this study, these limits presented based on the equivalence ratio and the Reynolds number of the burner inlet. Evaluation of NOx pollutants of swirlers showed that Nox increased with increasing equivalence ratio and at equivalence ratios near stoichiometric values, the Nox level was about 20 ppm.

Keywords: Low swirl combustion, flame stability, blockage ratio, natural gas