



Experimental Investigation of the Effects of Burner Nozzle Length Changes on Combustion Characteristics of a Swirl Premixed Flame

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Heshmati N.^{*1} MSc,

Misajedi S.M.¹ PhD

How to cite this article

Heshmati N, Misajedi S.M. Experimental Investigation of the Effects of Burner Nozzle Length Changes on Combustion Characteristics of a Swirl Premixed Flame. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(10):2509-2515.

¹Aerospace Engineering Department, New Science & Technologies Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Shahid Beheshti University, Daneshju Blvd, Yaman St, Chamran Hwy, Tehran, Iran. Postal Code: 1983963113
Phone: +982122431781
Fax: +982122431781
na.heshmati@mail.sbu.ac.ir

Article History

Received: May 17, 2020

Accepted: August 18, 2020

ePublished: October 21, 2020

ABSTRACT

In this study, the effects of burner nozzle length changes on combustion characteristics of a swirl premixed flame are investigated. Three nozzles with different lengths (2.5, 4.5, and 7 cm) have been used. Also, in order to investigate the effect of swirler geometry on the combustion characteristics of flame along with changes in nozzle length, 7 swirlers with different geometries were examined. In the study of flame stability, certain values of the bulk velocity were selected, which in these values the equivalence ratio of the fuel-air mixture was changed to determine the unfavorable flame condition such as blow-off and flame attachment to the nozzle. By determining these limits, the flame stability map was obtained in a range of different swirlers geometries, different burner nozzle lengths, and different flow mass velocities. The results showed that by increasing the swirlers radius ratio, the blow-off limit of swirlers decreases so that by increasing the radius ratio from 0.57 to 0.71, the blow-off limit decreases about 15%, and the stability of the flame is improved. Reducing the length of the nozzle increases the flame resistance against blow-off. The amount of NO_x increased with equivalence ratio and the slope of the increase in NO_x increased for the swirler with a higher radius ratio and the in a certain equivalence ratio, the amount of NO_x of swirler with a radius ratio of 0.57, which is the lowest radius ratio among other swirlers (about 30%).

Keywords Low-Swirl Combustion; Flame Stability; Radius Ratio; Nozzle Length

CITATION LINKS

[1] The dynamic plastic behavior of fully clamped rectangular ... [2] A theoretical study of the dynamic plastic behavior of beams and plates with ... [3] Deformation and rupture of blast loaded square plates-predictions and ... [4] Response of clamped single and double stiffened rectangular plates subjected to blast ... [5] The deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads-an ... [6] Scaling aspects of quadrangular plates subjected to localised blast loads-experiments ... [7] Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened ... [8] The effect of welded boundaries on the response of rectangular hot-rolled mild steel plates subjected to localised ... [9] Predictions of transverse deflections and in-plane strains in impulsively loaded thin ... [10] Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review: Part I ... [11] Deformation of thin plates subjected to impulsive loading—a review part II: Experimental ... [12] A new bound solution for quadrangular plates subjected to impulsive ... [13] Dynamic response and failure of fully clamped circular plates under impulsive ... [14] On dimensionless numbers for dynamic plastic response of structural ... [15] Simple design formulae for predicting the residual damage of unstiffened and stiffened plates under ... [16] Dynamic inelastic response of strain rate sensitive ductile plates due to large impact ... [17] Theoretical analysis on the effect of uniform and localized impulsive loading on the ... [18] Closed-form analytical analysis on the effect of coupled membrane and bending strains on the dynamic plastic behaviour of fully clamped thin quadrangular plates due to ... [19] Deformation of thin plates subjected to impulsive load: Part III—an update ... [20] Experimental and numerical investigation important parameters in deep drawing square ... [21] Friction surfacing of AA7075-T6 deposition on AA2024-T351; Statistical modeling using ... [22] Experimental and numerical analysis and multi-objective optimization of quasi-static compressive test on thin-walled ... [23] On dimensionless numbers for the dynamic plastic response of quadrangular mild ... [24] The influence of gas mixture detonation loads on large plastic deformation of thin quadrangular plates: Experimental ... [25] Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture ... [26] Experimental and theoretical study on large ductile transverse deformations of rectangular plates ...

بررسی آزمایشگاهی اثر تغییرات طول نازل مشعل بر مشخصه‌های احتراقی شعله پیش‌آمیخته چرخشی

نوید حشمتی^{*} MSc

گروه مهندسی هوافضا، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

سیدمهدی میرساجدی PhD

گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی و فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

در این مطالعه، تاثیر تغییرات طول نازل مشعل بر مشخصه‌های احتراقی شعله پیش‌آمیخته چرخشی به‌طور تجربی بررسی شده است. از سه نازل متفاوت با طول‌های ۲/۵، ۴/۵ و ۷ سانتی‌متر استفاده شد و علاوه بر این، هفت چرخاننده با هندسه متفاوت نیز به‌منظور بررسی تاثیر هندسه چرخاننده در همراهی با تغییرات طول نازل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مطالعه پایداری، مقادیر مشخصی از سرعت توده جریان انتخاب شده و میزان نسبت هم‌آرزی مخلوط سوخت و هوا تغییر داده شد تا حالات نامطلوب شعله نظیر خاموشی و اتصال شعله به نازل تعیین شود. با تعیین این حدود، محدوده پایداری شعله در گستره‌ای از هندسه‌های متفاوت چرخاننده، طول‌های مختلف نازل مشعل و سرعت‌های توده جریان متفاوت حاصل گشت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که کاهش طول نازل سبب افزایش میزان مقاومت شعله در برابر خاموشی شده و عملکرد شعله را در خاموشی بهبود می‌بخشد. با افزایش نسبت شعاع چرخاننده، حد خاموشی کاهش پیدا می‌کند به‌طوری که با افزایش نسبت شعاع از ۵/۷ به ۷/۱ میزان حد خاموشی تا حدود ۱۵٪ کاهش می‌یابد. میزان آلایندگی اکسیدهای نیتروژن به‌صورت افزایشی با نسبت هم‌آرزی افزایش پیدا کرده و شیب افزایش آن برای چرخاننده با نسبت شعاع بالاتر، بیشتر است و چرخاننده با نسبت شعاع ۵/۷ (کمترین نسبت شعاع میان چرخاننده‌های دیگر)، دارای کمترین میزان آلایندگی در میان سه چرخاننده دیگر است. به‌طوری که در یک نسبت هم‌آرزی مشخص، میزان آلایندگی اکسیدهای نیتروژن در این چرخاننده حدود ۳۰٪ کمتر از سایر چرخاننده‌ها است.

کلیدواژه‌ها: احتراق کم‌چرخش، پایداری شعله، نسبت شعاع، طول نازل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۲۸

*نویسنده مسئول: na.heshmati@mail.sbu.ac.ir

مقدمه

امروزه با توجه به گرمایش جهانی و افزایش انتشار آلودگی‌های ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی، ملاحظات زیست‌محیطی در این زمینه افزایش پیدا کرده است. طبق قوانین و مقررات جدیدی که در این زمینه در حال تدوین است، میزان آلایندگی‌های تولیدی احتراق از جمله هیدروکربن‌های نسوخته و اکسیدهای نیتروژن باید تا حد قابل توجهی کاهش یابد. به همین دلیل مطالعه بر روی روش‌های متفاوت احتراق که آلایندگی کمتری دارند در حال افزایش است. یکی از این روش‌ها، استفاده از احتراق کم‌چرخش است. ایده اصلی استفاده از جریان با چرخش کم برای پایدارسازی

شعله پیش‌آمیخته توسط چان و همکاران معرفی شد^[1]. مطالعات بسیاری بر روی ویژگی‌ها و مشخصه‌های احتراقی شعله احتراق کم‌چرخش توسط چنگ و همکاران انجام شده است که در حقیقت بیشترین نقش را در توسعه این مشعل‌ها ایفا کردند^[2-4]. آزمایش‌های اخیر تطبیق‌پذیری مشعل کم‌چرخش در توربین گازه‌ای صنعتی سبب شده که مشعل کم‌چرخش به‌عنوان روشی مناسب برای کاهش آلایندگی‌های اکسیدهای نیتروژن به‌حکمتر از ۵۰٪ در میلیون پیشنهاد شود^[5, 6]. جانسون و همکاران^[7] مطالعه‌ای را بر روی مقایسه عملکرد مشعل کم‌چرخش با مشعل پرچرخش انجام دادند. آنها در این مطالعه مشاهده کردند که در میدان جریان مربوط به مشعل کم‌چرخش، ناحیه بازگردشی قوی وجود ندارد که این مورد را می‌توان تفاوت عمده بین مشعل کم‌چرخش با مشعل پرچرخش دانست. ناحیه بازگردشی در مشعل‌های پرچرخش نقش اصلی را در پایداری شعله ایفا می‌کند و با بازگرداندن محصولات احتراق با دمای بالا به سمت واکنش‌دهنده‌ها و فراهم کردن انرژی واکنش، یک احتراق پایدار را ایجاد می‌کند اما این ناحیه بازگردشی سبب افزایش زمان ماند محصولات احتراق در ناحیه احتراق شده و باعث افزایش آلایندگی به‌خصوص اکسیدهای نیتروژن می‌شود. در مشعل کم‌چرخش این ناحیه بازگردشی وجود نداشته و مکانیزم پایداری شعله آیرودینامیکی است، عدم حضور ناحیه بازگردشی سبب کاهش آلایندگی در مشعل‌های کم‌چرخش نسبت به مشعل‌های پرچرخش می‌شود. تطبیق‌پذیری احتراق کم‌چرخش با انواع مختلف سوخت‌های گازی مشاهده شده است^[8-10]. همچنین مطالعات تجربی نشان داده رقیق‌سازی سوخت‌های گازی با هیدروژن سبب بهبود پایداری مشعل کم‌چرخش می‌شود^[11, 12]. ترکلس و همکاران^[13] مطالعه‌ای جامع بر روی نحوه تاثیر پارامترهای هندسی چرخاننده بر پایداری شعله انجام دادند. پارامترهای مورد بررسی شامل زاویه پره و نسبت شعاع و نسبت انسداد چرخاننده بوده و نتایج این مطالعه سبب شد که تاثیر کلی تغییر هر پارامتر بر پایداری و عملکرد شعله مشخص شود. به‌طور نمونه مشخص شد که افزایش زاویه پره چرخاننده سبب کاهش حد خاموشی شعله مربوط به چرخاننده‌ها می‌شود. همچنین مشاهده شد که نسبت شعاع و نوع پره بر آفت فشار در طول چرخاننده موثر بوده و افزایش نسبت شعاع سبب افزایش پسای چرخاننده شده که این مورد در به‌کارگیری حالت بهینه چرخاننده در توربین گازها اهمیت پیدا می‌کند.

ببیر و همکاران^[14] تاثیر تغییرات فشار ورودی، دمای ورودی، دمای شعله و نرخ ورودی سوخت را در یک محفظه احتراق شبیه‌سازی‌شده توربین گاز بررسی کرد. مشاهده شد که افزایش دبی عبوری از بخش مرکزی چرخاننده سبب افزایش ارتفاع قرارگیری شعله شده و احتمال بروز برگشت شعله در محفظه احتراق را کاهش می‌دهد. همچنین مشاهده شد که افزایش فشار ورودی سبب قرارگیری نزدیک‌تر شعله به دهانه نازل شده و

که قطر مشعل مورد استفاده ۱۴ میلی‌متر است که نسبت به ابعاد معمول این مشعل‌ها کمتر است. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه مشخصه‌های احتراق مشعل‌های کم‌چرخش انجام شده است اما مطالعات بیشتری نیاز است تا به شناسایی عملکرد مشعل در مقیاس پایین به‌خصوص نحوه تاثیر پارامترهای هندسی بر پایداری و عملکرد شعله، کمک کرده و مشخص کند که آیا نتایج به‌دست‌آمده در مطالعات گذشته مربوط به قطرهای بزرگ‌تر مشعل کم‌چرخش، در ابعاد کوچک نیز برقرار است یا خیر و چه تفاوت‌هایی در این روند کوچک‌سازی وجود دارد. یکی از دلایل بررسی تطبیق‌پذیری مشعل کم‌چرخش در سامانه‌های احتراقی مقیاس پایین این است که در سال‌های اخیر استفاده از سامانه‌های احتراقی مقیاس پایین همچون میکروتوربین به‌دلیل استقلال عملکرد بیشتر و هزینه تعمیر و نگهداری پایین‌تر و آلودگی کمتر روزه‌روز افزایش یافته و بنابراین اهمیت تطبیق روش‌های احتراقی متفاوت همچون احتراق کم‌چرخش با این نوع سامانه‌ها به‌منظور کاهش بیش‌ازپیش آلودگی احتراق افزایش یافته است. دلیل دیگر آن است که پیشرفت روش‌ها و فناوری‌های ساخت و تولید قطعات، همچون فناوری چاپ سه‌بعدی قطعات، امکان ساخت قطعاتی با هندسه پیچیده همچون چرخاننده کم‌چرخش در ابعاد کوچک را با کیفیت و دقت مناسب و هزینه مناسب فراهم کرده است، قابلیت‌هایی که در گذشته حتی در صورت امکان، توجیه اقتصادی نداشت. بنابراین با رویکرد به‌کارگیری مشعل کم‌چرخش در سامانه‌های احتراقی مقیاس پایین قطر مشعل مورد استفاده ۱۴ میلی‌متر انتخاب شده است. تنها مطالعه صورت‌گرفته در زمینه تطبیق مشعل کم‌چرخش در سامانه‌های احتراق با ابعاد کوچک توسط فراتک و همکاران [25] انجام شده است که تغییرات میدان جریان در اثر کوچک‌سازی قطر مشعل از قطر ۱۲ تا ۲۵/۴ میلی‌متر بررسی و تطبیق‌پذیری مشعل کم‌چرخش با یک محفظه احتراق مقیاس پایین میکروتوربین مشاهده شد. در مطالعه احتراق چرخشی مهم‌ترین پارامتر، عدد چرخش است. عدد چرخش عددی بی‌بعد است که بیانگر شدت چرخش جریان است که اولین بار توسط سیرد و بییر [26] به‌صورت زیر تعریف شد:

$$S = \frac{\int_0^R UWr^2 dr}{R \int_0^R U^2 r dr} \quad (1)$$

در رابطه ۱، U میانگین سرعت مولفه محوری و W میانگین سرعت مولفه مماسی است. با اعمال هندسه انژکتور کم‌چرخش، رابطه عدد چرخش مربوط به مشعل کم‌چرخش به‌دست می‌آید که تحت عنوان عدد چرخش هندسی شناخته می‌شود و توسط بییر و چیگییر [27] برای محاسبه عدد چرخش مشعل‌های کم‌چرخش ارائه شده است:

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

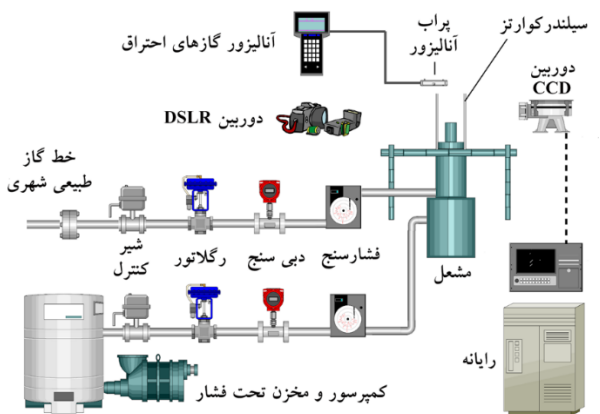
که R نسبت شعاع کانال مرکزی چرخاننده به شعاع چرخاننده و α زاویه پره‌های چرخاننده و m نسبت دبی جرمی گذرنده از بخش

احتمال بروز برگشت شعله را افزایش می‌دهد. وریبک و همکاران [15, 16] تاثیر الگوی هندسی صفحه آشفته‌کننده متداول چرخاننده با سوراخ‌های دایروی شکل را با یک نمونه صفحه فراکتال با پایه هندسی ضربدری شکل بر روی عملکرد شعله مقایسه کرده و نتیجه گرفتند آشفتنی در جریان با استفاده از صفحه فراکتال بیشتر بوده و این آشفتنی بیشتر سبب افزایش چین‌خوردگی و چروکیدگی جبهه شعله شده و از این طریق نرخ سوزش شعله افزایش می‌یابد. دنگ و همکاران [17] در مطالعه‌ای تجربی دریافتند که شکل شعله و هندسه جبهه شعله تا حد زیادی تحت تاثیر نسبت هم‌ارزی مخلوط سوخت و هوا است، و حالت شعله با افزایش نسبت هم‌ارزی می‌تواند از یک شعله معلق به یک شعله متصل به نازل تبدیل شود. ژیاو و همکاران [18] حدود پایداری یک مشعل کم‌چرخش را بررسی کردند. در این مطالعه تجربی سه حالت متفاوت برای شعله تعیین شد که شامل شعله W شکل در حالت متصل و غیرمتصل و همچنین شعله V شکل است که حالت مطلوب در احتراق کم‌چرخش از نظر پایداری و آلودگی شعله V شکل است که عدد چرخش مربوط به چرخاننده‌ها و همچنین میزان دبی هوای ورودی نقش مهمی در تعیین حدود احتراقی این حالت شعله ایفا می‌کنند. فرشچی و توحیدی [19] پایداری شعله و آلودگی‌های مشعل کم‌چرخش را به‌طور تجربی بررسی کرده و مشاهده نمودند که در محدوده جریان کم‌چرخش، شعله معلق بوده و اتصالی به بدنه ندارد و به همین علت بدنه مشعل سرد باقی می‌ماند و به‌دلیل پایین‌بودن دمای نازل مشعل، می‌توان مشعل را از جنس سبک و ارزان‌قیمت همچون پی‌وی‌سی تهیه نمود. قاضی‌خانی و همکاران [20] مطالعه‌ای تجربی و عددی را بر روی اثر تغییر پارامترهای عملکردی بر رفتار شعله کم‌چرخش با تمرکز بر روی فاصله درنگ انجام داده و نتیجه گرفتند که میزان برخاستگی شعله با فاصله درنگ به‌طور مستقیم در ارتباط بوده و در یک عدد چرخش ثابت اگر میزان فاصله درنگ از یک میزان مشخص افزایش یابد، شعله در دامنه‌ای از نسبت هم‌ارزی‌های متفاوت به‌صورت معلق و پایدار باقی خواهد ماند. مطالعه نحوی و همکاران [21] نشان داد که افزایش عدد چرخش مربوط به چرخاننده‌ها سبب افزایش عرض هندسی شعله می‌شود و ناحیه احتراقی شعله را گسترده‌تر می‌کند که این امر سبب کاهش دمای ناحیه احتراق شده و میزان تولید آلاینده اکسیدهای نیتروژن را کاهش می‌دهد.

تشریح مساله

به بررسی تاثیر طول نازل مشعل بر مشخصه‌های احتراقی شعله پرداخته می‌شود. به‌منظور انجام آزمون‌های تجربی یک بستر آزمایش مشعل کم‌چرخش در آزمایشگاه احتراق دانشگاه شهید بهشتی طراحی و ساخته شد [22-24]. ویژگی مشعل مورد استفاده قطر کم مشعل نسبت به سایر مشعل‌های کم‌چرخش مورد مطالعه در گذشته است. در اکثر مطالعات انجام‌گرفته در زمینه مشعل‌های کم‌چرخش قطر نازل خروجی بیش از ۳۸ میلی‌متر است در حالی

که با کمترین اُفت فشار قابلیت تعیین دبی دل‌خواه عبوری را دارا است. در این آزمایش تجربی از گاز طبیعی شهری به‌عنوان سوخت استفاده شده است. به جهت مشخص‌کردن امکان استفاده از مشعل کم‌چرخش در کاربری‌های شهری، مشخصات جریان گاز ورودی بدون تغییر و ترکیب در اجزای شیمیایی آن وارد دستگاه آزمایش مشعل کم‌چرخش شده و احتراق انجام می‌گیرد. دبی گاز توسط فلومتر با نام تجاری FL-3096SA (شرکت Omega) اندازه‌گیری می‌شود که دارای حداکثر ظرفیت اندازه‌گیری ۸ لیتر بر دقیقه و دارای حداکثر خطای ۲٪ (در حداکثر ظرفیت اندازه‌گیری) است. فشار گاز عبوری توسط گیج‌فشار با نام تجاری ST-60 (شرکت STL) با رنج اندازه‌گیری ۰/۱ تا یک بار اندازه‌گیری شده و دارای خطای حداکثر یک درصد است. کنترل دبی جریان با حداقل میزان تغییرات دل‌خواه توسط تنظیم‌کننده دبی عبوری با نام تجاری HPC-34 (شرکت HPC) انجام شده که با کمترین اُفت فشار قابلیت تعیین دبی دل‌خواه عبوری را دارا است.



شکل ۲) شماتیک اجزای آزمایش

چرخاننده

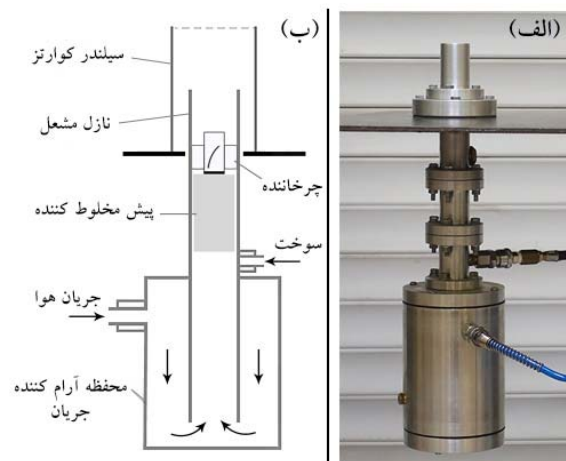
به‌منظور بررسی تاثیر هندسه چرخاننده بر مشخصه‌های احتراقی شعله، هفت چرخاننده با هندسه متفاوت مورد بررسی قرار گرفتند تا تاثیر هندسه چرخاننده در همراهی با تغییرات طول نازل مشخص شود. تعیین مشخصات هندسی چرخاننده‌ها براساس چرخاننده‌های مورد استفاده در مطالعات پیشین در زمینه مشعل کم‌چرخش در این زمینه صورت گرفت. به‌طور نمونه مطالعات پیشین^[22-24] با چرخاننده‌های مشابه مشخص کرد که در یک هندسه چرخاننده، اگر زاویه پره چرخاننده کمتر از حدی مشخص باشد، چرخش لازم برای ایجاد میدان جریان کم‌چرخش ایجاد نمی‌شود و شعله کم‌چرخش شکل نمی‌گیرد و همچنین در زوایای پره زیاد شدت چرخش به حدی بالا می‌رود که رژیم جریان خارج از حدود کم‌چرخش است. علاوه بر این اُفت فشار در طول چرخاننده به حدی بالا می‌رود که استفاده از آن توجیه فنی و کاربردی ندارد. به این ترتیب و براساس حدود به‌دست‌آمده، هفت چرخاننده با هندسه متفاوت که مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است

چرخشی به بخش غیرچرخشی چرخاننده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود عدد چرخش هندسی تابعی از پارامترهای هندسی چرخاننده است که این سه پارامتر اصلی چرخاننده عبارتند از نسبت شعاع (R)، زاویه پره (α)، نسبت انسداد (B) که تغییر هر کدام از این سه پارامتر سبب تغییر در عدد چرخش می‌شود و مشخصات عملکردی شعله را تغییر می‌دهد. به بررسی تاثیر طول نازل مشعل کم‌چرخش و نسبت شعاع چرخاننده بر مشخصه‌های احتراقی شعله پرداخته می‌شود.

معرفی دستگاه و تجهیزات آزمایش

دستگاه آزمایش

دستگاه مشعل کم‌چرخش از ابزار اندازه‌گیری و کنترل و بررسی مرتبط با بستر آزمایش تشکیل شده است. مشعل کم‌چرخش استفاده‌شده شامل پنج بخش اصلی است که شامل محفظه آرام‌کننده جریان، بخش تزریق سوخت به جریان، بخش اختلاط سوخت و هوا، چرخاننده و نازل مشعل است. در شکل ۱ مشعل کم‌چرخش مشاهده می‌شود.



شکل ۱) الف) مشعل کم‌چرخش مورد مطالعه، ب) اجزای مشعل کم‌چرخش

مشخصات جریان‌های ورودی سوخت و هوا توسط دبی‌سنج‌های متفاوت برای هر خط جریان عبوری و همچنین دماسنج‌ها و فشارسنج‌ها اندازه‌گیری شده و کنترل میزان این مشخصات جریان توسط شیرهای کنترلی و رگلاتور تنظیم فشار انجام می‌شود. در شکل ۲ شماتیک اجزای اصلی اجزای آزمایش مشاهده می‌شود. دبی جریان عبوری توسط فلومتر با نام تجاری Rate Master (شرکت Dwyer) اندازه‌گیری می‌شود که دارای حداکثر ظرفیت اندازه‌گیری ۹۴ لیتر بر دقیقه و دارای حداکثر خطای ۲٪ (در حداکثر ظرفیت اندازه‌گیری) است. فشار هوای عبوری توسط گیج‌فشار با نام تجاری ST-100 (شرکت STL) با رنج اندازه‌گیری ۰/۱ تا ۱۰ بار اندازه‌گیری شده و دارای خطای حداکثر یک درصد است. کنترل دبی جریان با حداقل میزان تغییرات دل‌خواه توسط تنظیم‌کننده دبی عبوری با نام تجاری HPC-312 (شرکت HPC) انجام شده

۷ سانتی‌متر است که تصویر سه نازل در کنار هم در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

جدول ۲) مشخصات نازل‌های مشعل

نازل	طول نازل (cm)	نسبت فاصله درنگ (L/Rc)
۱	۷	۱۰
۲	۴/۵	۶/۴۲
۳	۲/۵	۳/۵۷



شکل ۴) تصویر سه نازل مورد استفاده به ترتیب به افزایش نسبت فاصله درنگ (از راست به چپ)

نتایج

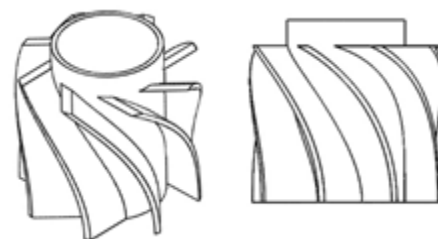
پایداری شعله

دامنه کاری مشعل عموماً در محدوده پایداری شعله تعریف می‌شود که این محدوده توسط حدود نامطلوب احتراقی شعله نظیر خاموشی و برگشت شعله و یا اتصال شعله به نازل مشخص می‌شود. حد خاموشی شعله بیانگر کمترین نسبت هم‌ارزی است که شعله دارای احتراق پایدار است. معمولاً در هنگام خاموشی، شعله از دهانه خروجی مشعل فاصله گرفته و ارتفاع می‌گیرد. هر گونه کاهش میزان سوخت در جریان سبب حرکت جبهه شعله به سمت پایین دست می‌شود که در یک نقطه مشخص شعله به‌طور کامل خاموش می‌شود که نسبت هم‌ارزی متناظر با آن را حد خاموشی شعله در نظر می‌گیرند. برای به‌دست‌آوردن نسبت هم‌ارزی خاموشی با کم‌کردن میزان سوخت ورودی و یا به‌عبارتی پایین‌آوردن نسبت هم‌ارزی جریان در یک جریان ورودی ثابت هوا، شعله را به سمت خاموشی پیش برده و در لحظه خاموشی، نسبت هم‌ارزی متناظر آن ثبت می‌شود. در آزمایش‌های مربوط به بررسی تأثیرات هندسه چرخاننده بر حد خاموشی در شرایط شعله‌های باز آزمایشگاهی به‌طور معمول از این روش جهت تعیین حد خاموشی شعله استفاده می‌شود [7, 11]. در آزمون‌های مربوط به حد خاموشی شعله، تأثیر تغییرات طول سه نازل مورد مطالعه در همراهی با تمامی چرخاننده‌های مطالعه آزمایش شد تا علاوه بر بررسی تأثیر طول نازل نحوه تأثیرگذاری هندسه چرخاننده بر پایداری شعله نیز مشخص شود. با این توضیحات، به جهت تعیین حد خاموشی، دبی حجمی جریان ورودی هوا در دو حالت متمایز ۲۵ و ۳۵ لیتر بر دقیقه ثابت شده و سپس با کاهش میزان سوخت ورودی، خاموشی شعله رخ داده و نسبت هم‌ارزی متناظر آن ثبت می‌شود. در نمودارهای ۱ و ۲ مقادیر حد خاموشی مربوط به هر چرخاننده در دو سرعت متفاوت ورودی در شرایط دما و فشار استاندارد (STP)

مورد استفاده قرار گرفت. قطر تمامی چرخاننده‌های کم‌چرخش ۱۴ میلی‌متر است و تعداد پره‌ها در تمامی چرخاننده‌ها ۸ عدد است که نمای گرافیکی چرخاننده شماره یک در شکل ۳- الف به نمایش درآمده است. کانال مرکزی توسط یک صفحه سوراخ‌دار آشفته‌کننده پوشیده شده است که برای نسبت انسداد ۰/۷۶، ۵۲ و ۰/۴۳ این صفحه به‌ترتیب دارای ۱۹، ۱۲ و ۷ سوراخ با قطر ۰/۹ میلی‌متر است. تمامی چرخاننده‌های کم‌چرخش با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی ساخته شده‌اند که نمونه چاپ سه‌بعدی شده چرخاننده شماره یک در شکل ۳- ب مشاهده می‌شود.

جدول ۱) مشخصات هندسی چرخاننده‌ها

شماره چرخاننده	زاویه پره (درجه)	نسبت شعاع (درصد)	نسبت انسداد (درصد)	عدد چرخش
۱	۳۴	۰/۶۴	۷۶	۰/۵۲
۲	۴۰	۰/۶۴	۷۶	۰/۶۴
۳	۵۰	۰/۶۴	۷۶	۰/۹۲
۴	۴۰	۰/۷۱	۷۶	۰/۶۱
۵	۴۰	۰/۵۷	۷۶	۰/۶۶
۶	۳۴	۰/۶۴	۵۲	۰/۴۲
۷	۴۰	۰/۶۴	۴۳	۰/۴۸



(الف)



(ب)

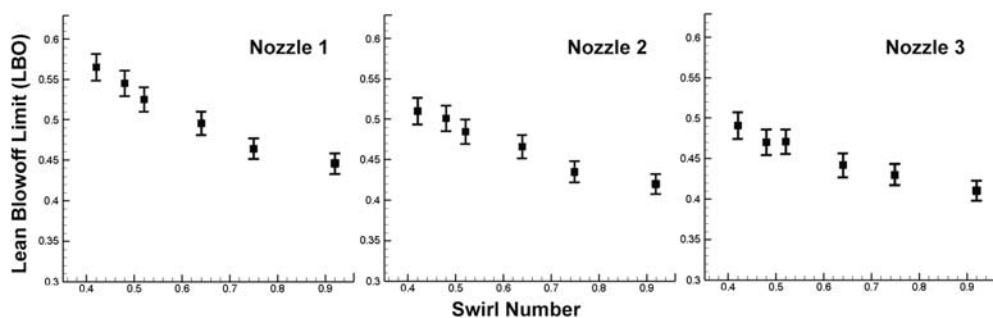
شکل ۳) الف) نمای گرافیکی چرخاننده شماره یک، ب) نمونه چاپ سه‌بعدی شده چرخاننده شماره یک

نازل مشعل

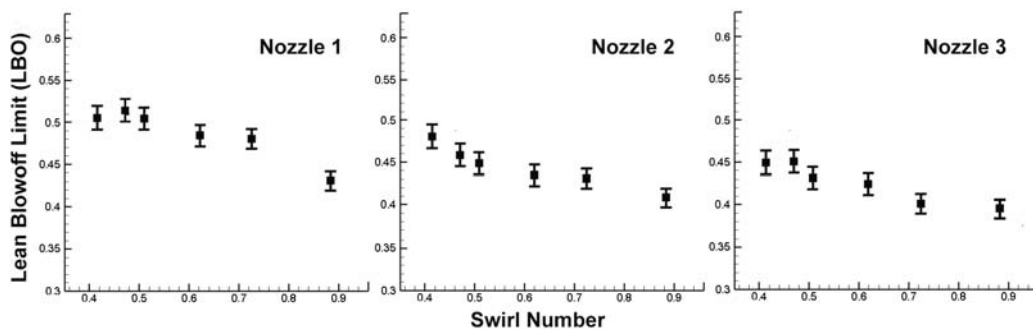
نازل مشعل و یا به‌عبارتی دهانه خروجی مشعل بخشی است که چرخاننده کم‌چرخش را در خود جای داده و هندسه خروجی آن بسیار بر روی فیزیک و مشخصات شعله و عملکرد مشعل موثر است. با هدف بررسی اثر طول نازل بر مشخصات و عملکرد شعله، سه نازل با طول‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفته است که هر سه دارای خروجی ۹۰ درجه (انبساط سریع) هستند. مشخصات نازل‌های مورد استفاده در جدول ۲ آمده است. نازل‌ها دارای قطر داخلی ۱۴ میلی‌متر بوده که طول آنها در سه اندازه ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸

تکرارپذیری به دست آمده در آزمایش برابر ۶٪ بوده است و مقادیر خاموشی با اطمینان ۹۴٪ در نمودارهای ۱ و ۲ رسم شده‌اند. در این نمودارها مشاهده می‌شود که حد خاموشی برای چرخاننده با عدد چرخش بیشتر، پایین‌تر از سایر چرخاننده‌ها قرار گرفته است و می‌توان نتیجه گرفت که چرخش بیشتر سبب مقاومت بیشتر شعله است. در مقایسه نمودارهای حد خاموشی در دو سرعت توده متفاوت ۲۵ و ۳۵ لیتر بر دقیقه مشاهده می‌شود که افزایش سرعت توده، سبب کاهش حد خاموشی می‌شود و عملکرد آن را بهبود می‌بخشد. این بهبود عملکرد نیز به دلیل افزایش شدت چرخش در سرعت‌های بالاتر است. همچنین افزایش سرعت توده جریان ورودی به معنی نرخ سوزش بالاتر مشعل است. نرخ سوزش مشعل عموماً به صورت حاصل ضرب دبی جرمی جریان سوخت در ارزش حرارتی آن به دست می‌آید. دامنه تغییرات حد خاموشی چرخاننده‌ها بین ۰/۴۵ تا ۰/۶ است و نرخ سوزش مشعل متناسب آن در سرعت توده ۲۵ لیتر بر دقیقه بین ۰/۶ تا ۰/۷۵ کیلووات است که این دامنه نرخ سوزش با بالارفتن سرعت توده جریان به ۳۵ لیتر بر دقیقه بالاتر رفته و محدوده آن بین ۰/۸۳ تا ۱/۳ کیلووات می‌شود. به طور نمونه در نسبت هم‌ارزی یکسان ۰/۴۵ مشعل در سرعت توده ۲۵ لیتر بر دقیقه کمتر از ۶۰۰ ژول بر ثانیه انرژی در ناحیه احتراق آزاد می‌کند که این نرخ در سرعت توده ۳۵ لیتر بر دقیقه به بیش از ۸۵۰ ژول بر ثانیه می‌رسد که این مورد سبب آزادسازی انرژی و حرارت بیشتر در ناحیه احتراق شده و به عملکرد شعله در برابر خاموشی کمک می‌کند. در هر یک از نمودارهای ۱ و ۲ از یک نازل مشخص استفاده شده است.

و با استفاده از سه نازل متفاوت ترسیم شده است که در مجموع ۶ نمودار را تشکیل می‌دهند. در این نمودارها حد خاموشی براساس عدد چرخش هندسی نمایش داده شده است. عدد چرخش‌های مربوطه از رابطه ۲ به دست آمده‌اند. خطای مربوط به ابزار و تجهیزات اندازه‌گیری در بخش معرفی تجهیزات آزمایش بیان شد اما در این بخش برای تعیین میزان صحت داده‌های اندازه‌گیری شده لازم است خطاهای مربوط به آزمایش‌های تجربی بیان شوند. برای تعیین خطای مربوط به عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده ناشی از خطای ابزار و تجهیزات اندازه‌گیری، از خطای هر یک از آنها استفاده شده و براساس روابط مربوطه میزان عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده کمتر از ۴٪ به دست آمد. همچنین برای تعیین خطای ناشی از تکرارپذیری آزمایشات تجربی مربوط به پایداری و حد خاموشی شعله از روش مورد استفاده در منابع معتبر مرتبط استفاده شد^[15]، به این صورت که برای به دست آوردن هر داده عددی، آزمایش تجربی پنج بار تکرار شده و سپس با میانگین‌گیری از مقادیر به دست آمده، میانگین آنها در نمودار رسم شده و میزان بیشترین اختلاف بین این پنج مقدار با میانگین حساب شده به عنوان خطای ناشی از تکرارپذیری در نظر گرفته شده و در نمودار به صورت ناحیه خطا نمایش داده می‌شود. در این آزمایش بیشترین اختلاف بین داده‌ها و میانگین‌های حساب شده کمتر از ۶٪ بوده و لازم به ذکر است که در آزمایشات تجربی مشاهده شد که تکرار آزمایش بیش از پنج بار تغییراتی در میزان خطای ناشی از تکرارپذیری ندارد و به همین علت پنج مرتبه تکرار آزمایش به عنوان مبنای تعداد تکرار آزمایش محاسبه خطای تکرارپذیری در نظر گرفته شده است. میزان خطای



نمودار (۱) حد خاموشی چرخاننده‌ها براساس عدد چرخش در سرعت توده ۲۵ لیتر بر دقیقه

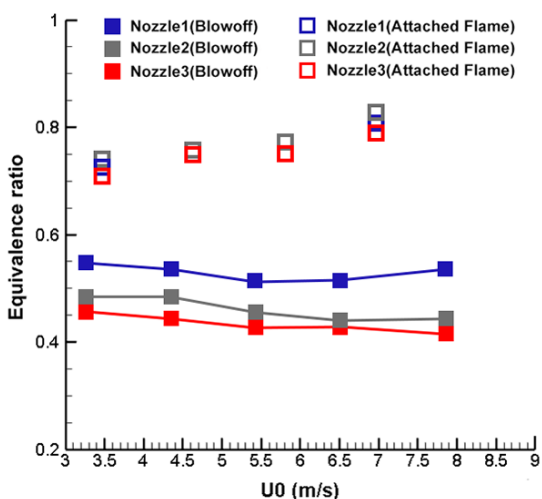


نمودار (۲) حد خاموشی چرخاننده‌ها براساس عدد چرخش در سرعت توده ۳۵ لیتر بر دقیقه

تغییرات طول نازل بین ۳ تا ۸ متر بر ثانیه است و شرایط جریان‌های ورودی سوخت و هوا STP است. در نمودار ۳ تغییرات محدوده پایداری براساس تغییر طول نازل مشعل برای چرخاننده شماره ۲ مشاهده می‌شود. افزایش طول نازل سبب کاهش خط خاموشی شده و مقاومت شعله در برابر خاموشی را افزایش می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که محدوده تغییرات حد بالای پایداری کمتر از ۵٪ است و می‌توان نتیجه گرفت که افزایش طول نازل تاثیر مشخصی بر نسبت هم‌ارزی حد بالای محدوده پایداری نداشته و نمی‌توان نتیجه منطقی از آن استخراج کرد و باید حد بهینه‌ای برای طول نازل در این زمینه برای هر هندسه مشخص تعیین کرد و بنابراین تنها تاثیر مشخص افزایش طول نازل بهبود عملکرد شعله در خاموشی است. نحوه تاثیر طول نازل بر محدوده پایداری تمامی چرخاننده‌ها مشابه یکدیگر بوده و در این قسمت به‌منظور جلوگیری از تکرار ارایه نتایج مشابه، محدوده پایداری چرخاننده شماره ۲ به نمایش درآمده است.



شکل ۵ (الف) شعله متصل به دهانه نازل مشعل، (ب) شعله معلق پایدار



نمودار ۳) محدوده پایداری چرخاننده شماره ۲ تحت تاثیر تغییرات طول نازل

موقعیت قرار گیری شعله

همان طور که ذکر شد شعله در احتراق کم‌چرخش به‌صورت معلق بوده و به بدنه مشعل و دهانه نازل اتصال فیزیکی ندارد. تعیین

در این بخش تاثیر نازل‌ها بر حد خاموشی نیز قابل مشاهده است و از بررسی نمودارها می‌توان نتیجه گرفت افزایش طول نازل سبب افزایش در حد خاموشی شده و مقاومت شعله نسبت به خاموشی را پایین می‌آورد. افزایش طول نازل از ۲/۵ به ۷ سانتی‌متر میزان حد خاموشی شعله را تا ۱۵٪ افزایش می‌دهد. دلیل کاهش مقاومت شعله در برابر خاموشی با افزایش طول نازل به‌دلیل کاهش شدت چرخش جریان با افزایش طول نازل است. به بیان دقیق‌تر هنگامی که جریان چرخشی ایجاد شده توسط چرخاننده‌ها در طول مجرای نازل با جریان محوری خروجی از کانال مرکزی چرخاننده همراه می‌شود، بخشی از مومنتوم چرخشی جریان در تقابل با جریان محوری از دست می‌رود و از شدت چرخش کاسته می‌شود. بنابراین هر چه میزان حضور جریان چرخشی در همراهی جریان محوری بیشتر باشد این اُفت شدت چرخش بیشتر می‌شود، با این نتیجه هر چه طول نازل افزایش یابد میزان اُفت شدت چرخش جریان افزایش یافته که این کاهش شدت چرخش جریان باعث افزایش حد خاموشی می‌شود. نسبت هم‌ارزی متناظر حد خاموشی چرخاننده‌ها عموماً کمتر از ۰/۶ بوده که این میزان در نازل‌های شماره ۲ و ۳ کمتر از ۰/۵ است. با بررسی هم‌زمان میزان آلاینده‌گی مشعل مشاهده می‌شود که در نسبت هم‌ارزی‌های کمتر از ۰/۶ و نزدیک حد خاموشی، میزان آلاینده‌گی اکسیدهای نیتروژن مشعل به کمتر از ۱۰ بخش در میلیون می‌رسد که نشان‌دهنده امکان احتراق پایدار مشعل با سطح تولید آلاینده‌گی کم است که این نکته بیانگر توجه فنی و کاربردی بودن مشعل کم‌چرخش مقیاس پایین از نظر سطح آلاینده‌گی پایین است. حد پایین ناحیه پایداری شعله که همان حد خاموشی است مورد بحث قرار گرفت، حد بالای ناحیه پایداری، بیشترین نسبت هم‌ارزی است که شعله در آن پایدار است. در مشعل مورد مطالعه، با افزایش نسبت هم‌ارزی شکل شعله از حالت پایدار کاسه‌ای شکل معلق که در شکل ۵-ب دیده می‌شود به سمت یک شعله گردابه‌ای شکل متصل به دهانه نازل که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود پیش رفته که این تغییر حالت در طی یک فرآیند گذار انجام می‌شود و شکل شعله در طی چند گام تغییر کرده تا از حالت پایدار معلق به حالت متصل به نازل تبدیل شود. به‌دلیل اینکه برگشت شعله اتفاق نمی‌افتد، معیار دیگری برای مقایسه تاثیر تغییرات طول نازل بر محدوده پایداری شعله تعیین می‌شود و به این صورت است که لحظه شروع فرآیند گذار شعله و خروج از حالت پایدار کاسه‌ای شکل به‌عنوان معیاری برای بررسی و مقایسه حد بالای محدوده پایداری شعله در این مطالعه، تعیین می‌شود. روش به‌دست‌آوردن حد بالای محدوده پایداری شعله نیز مشابه حد خاموشی است با این تفاوت که بعد از ثابت‌نگه‌داشتن دبی جریان ورودی هوا، میزان سوخت ورودی افزایش یافته تا شعله فرآیند گذار خود را آغاز کرده و بدین ترتیب حد بالای پایداری به‌دست آید. محدوده تغییرات میزان سرعت جریان ورودی هوا در آزمون‌های مربوط به تعیین محدوده پایداری چرخاننده‌ها تحت اثر

کوارتز به قطر ۷ سانتی‌متر در جداره بیرونی نازل قرار می‌گیرد. دلیل استفاده از کوارتز تجمیع جریان خروجی نازل است به گونه‌ای که اندازه‌گیری آلاینده‌ها را دقیق‌تر کرده و اعداد به‌دست‌آمده نزدیک به حالت استفاده از محفظه احتراق و دودکش است. این روش، روشی استاندارد به جهت اندازه‌گیری آلاینده‌های شعله‌های آزمایشگاهی و شعله‌های باز است که در تمامی مطالعات مربوط به اندازه‌گیری آلاینده‌های احتراق مورد استفاده قرار می‌گیرد [13, 25].

بررسی‌کننده دود دارای یک پراپ اندازه‌گیری بوده که این پراپ اندازه‌گیری در انتهای سیلندر کوارتز قرار گرفته و مقادیر آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن اندازه‌گیری می‌شود. میزان اندازه‌گیری‌شده آلاینده اکسیدهای نیتروژن معمولاً براساس نسبت تصحیح اکسیژن بیان می‌شود تا امکان مقایسه بین داده‌های مطالعات مختلف فراهم شود. این نسبت تصحیح عموماً در اکسیژن مازاد احتراق ۱۵٪ در نظر گرفته می‌شود [11]. بنابراین اعداد اندازه‌گیری‌شده در فرمول تصحیح محاسبه شده و سپس در نمودار ذکر می‌شوند. اصول اندازه‌گیری آلاینده‌های احتراق معمولاً براساس قوانین محیط زیستی و روش‌های مورد تایید ناشی از این قوانین تعیین می‌شود و یک اصل مهم در اندازه‌گیری آلاینده‌های سامانه‌های احراقی نمونه‌گیری تصادفی در شرایط متفاوت احتراق مشعل و همچنین هندسه‌های متفاوت مشعل است. در نمودار ۵ میزان آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن ناشی از احتراق برای سه چرخاننده با نسبت شعاع متفاوت در برابر نسبت هم‌ارزی رسم شده است. همچون سایر مطالعات پیشین انجام گرفته در زمینه‌های آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن شعله‌های کم‌چرخش، میزان اکسیدهای نیتروژن با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود شیب افزایش اکسیدهای نیتروژن برای چرخاننده با نسبت شعاع بالاتر، بیشتر است و چرخاننده شماره ۵ با نسبت شعاع ۰/۵۷ که کمترین نسبت شعاع میان چرخاننده‌های دیگر است، دارای کمترین میزان آلاینده‌گی در میان سه چرخاننده دیگر است. مطالعات پیشین نشان داده است که افزایش نسبت شعاع سبب افزایش پسای چرخاننده شده و اُفت فشار در طول چرخاننده را افزایش می‌دهد [13]، با استفاده از این نتیجه می‌توان علت افزایش آلاینده‌گی با افزایش نسبت شعاع را این‌گونه توضیح داد که اُفت فشار بیشتر جریان در طول چرخاننده باعث می‌شود میانگین سرعت میدان جریان واگرایی خروجی مشعل کاهش یافته و در نهایت سبب افزایش زمان ماند محصولات احتراق در ناحیه احتراق شده و میزان تشکیل آلاینده اکسیدهای نیتروژن افزایش یابد.

به جهت تعیین نحوه تاثیر طول نازل بر میزان آلاینده‌گی مشعل کم‌چرخش، آزمون این بخش تحت شرایط STP در مقدار سرعت توده جریان ۳۵ لیتر بر دقیقه انجام شده است. نمودار ۶ میزان تاثیر طول نازل بر اکسیدهای نیتروژن تولیدی را نشان می‌دهد که برای سه چرخاننده متمایز یک، ۲ و ۳ براساس عدد چرخش هر چرخاننده رسم شده است. با بررسی نمودار می‌توان نتیجه گرفت

ارتفاع شعله از دهانه نازل به جهت ملاحظات پایداری به‌خصوص به‌کارگیری مشعل کم‌چرخش در محفظه احتراق توربین‌های گازی اهمیت پیدا می‌کند. در نمودار ۴ موقعیت ارتفاع شعله با توجه به عدد چرخش چرخاننده‌ها برای سه نازل متفاوت مشاهده می‌شود. این مقادیر برای تمامی چرخاننده‌ها و نازل‌ها در سرعت یکسان ۳۵ لیتر بر دقیقه به‌دست آمده است. به این صورت که با تثبیت جریان‌های ورودی هوا و سوخت در شرایط STP و تشکیل یک شعله پایدار، ارتفاع قرارگیری شعله مربوط به آن مشخص می‌شود. برای تعیین موقعیت شعله، بیشترین گرادیان درخشندگی جبهه شعله بر روی خط مرکزی نازل به‌عنوان موقعیت و ارتفاع آن در نظر گرفته شده است. در نمودار ۴ مشاهده می‌شود که افزایش عدد چرخش سبب کاهش ارتفاع قرارگیری شعله می‌شود. این رفتار را می‌توان براساس ماهیت و فیزیک عدد چرخش توضیح داد که افزایش عدد چرخش سبب نزدیک‌شدن رفتار مشعل به یک مشعل پرچرخش شده و همان‌طور که در مشعل‌های پرچرخش ارتفاع شعله بسیار نزدیک به دهانه مشعل و حتی متصل به آن است، شعله احتراق کم‌چرخش با عدد چرخش بالا نیز دارای ارتفاع قرارگیری پایین‌تری نسبت به سایر عدد چرخش‌های کمتر از خود است. در جریان‌های پرچرخش افزایش شدت چرخش جریان سبب تولید جریان‌های بازگردشی شده و این جریان‌ها ارتفاع شعله را پایین می‌آورند که مکانیزم اصلی پایداری مشعل‌های پرچرخش است. برخلاف تاثیر افزایش عدد چرخش که سبب کاهش ارتفاع قرارگیری شعله می‌شود، افزایش طول نازل باعث افزایش ارتفاع قرارگیری شعله می‌شود و همان‌طور که در نمودار ۴ مشاهده می‌شود موقعیت شعله‌ها با افزایش طول نازل، افزایش پیدا کرده است. علت این کاهش موقعیت شعله این است که افزایش طول نازل باعث افزایش زمان قرارگیری جریان چرخشی و محوری خروجی از چرخاننده در کنار هم می‌شود و این امر سبب تضعیف جریان چرخشی شده و باعث می‌شود جریان خروجی از نازل مشعل دارای قدرت چرخشی کمتری باشد و همین کاهش چرخش جریان، جبهه شعله را از دهانه نازل دور می‌کند و باعث افزایش موقعیت قرارگیری شعله می‌شود.

آلاینده‌های احتراق

ویژگی اصلی مشعل‌های کم‌چرخش میزان پایین آلاینده‌گی اکسیدهای نیتروژن آنها است که این مطلب در طی تحقیقات بسیاری ثابت شده است. اما به‌منظور بررسی نحوه تاثیر طول نازل و همچنین نسبت شعاع چرخاننده بر نرخ تولید اکسیدهای نیتروژن در این بخش، نتایج حاصل از اندازه‌گیری اکسیدهای نیتروژن ارائه می‌شود. اندازه‌گیری گازهای حاصل از احتراق توسط بررسی‌کننده دود KANE 452 انجام شده است که وضوح اندازه‌گیری آن یک بخش در میلیون و دقت دستگاه برای مقادیر کمتر از ۱۰۰ دارای خطای ۵٪ بخش در میلیون و برای مقادیر کمتر از ۳۰ دارای خطای ۲٪ بخش در میلیون است. برای اندازه‌گیری اکسیدهای نیتروژن شعله مربوط به هر چرخاننده، یک سیلندر

نتیجه‌گیری

تاثیر طول نازل مشعل کم‌چرخش و نسبت شعاع چرخاننده بر پایداری شعله و آلاینده‌گی شعله به‌طور تجربی بررسی شد. از سه نازل متفاوت با قطر داخلی ۱۴ میلی‌متر و طول ۲/۵، ۴/۵ و ۷ سانتی‌متر استفاده شد. به‌منظور بررسی تاثیر هندسه چرخاننده بر مشخصه‌های احتراقی شعله، هفت چرخاننده با هندسه متفاوت نیز مورد بررسی قرار گرفتند تا تاثیر هندسه چرخاننده در همراهی با تغییرات طول نازل مشخص شود. نسبت شعاع نیز یکی از پارامترهای اصلی چرخاننده است که تاثیر مهمی بر پایداری شعله کم‌چرخش دارد. به‌منظور بررسی تاثیر نسبت شعاع چرخاننده بر پایداری، سه نسبت شعاع متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به شرح زیر است:

۱- کاهش طول نازل سبب افزایش میزان مقاومت شعله در برابر خاموشی شده و عملکرد شعله را در خاموشی بهبود می‌بخشد.
 ۲- با افزایش نسبت شعاع حد خاموشی چرخاننده‌ها کاهش می‌یابد به‌طوری که با افزایش نسبت شعاع از ۵۷٪ تا ۷۱٪ میزان حد خاموشی تا حدود ۱۵٪ کاهش پیدا می‌کند و پایداری شعله را بهبود می‌بخشد.

۳- با افزایش نسبت هم‌ارزی، شکل شعله از حالت پایدار کاسه‌ای شکل معلق به سمت یک شعله گردابه‌ای شکل متصل پیش می‌رود که این تغییر حالت در طی یک فرآیند گذار انجام می‌شود و شکل شعله در طی چند گام تغییر کرده تا از حالت پایدار معلق به حالت متصل تبدیل شود. مشاهده شد با تغییرات طول نازل تاثیر مشخصی بر حد بالای ناحیه پایداری هر چرخاننده ندارد اما افزایش طول نازل سبب کاهش گستردگی ناحیه پایداری شعله مربوط به هر چرخاننده می‌شود.

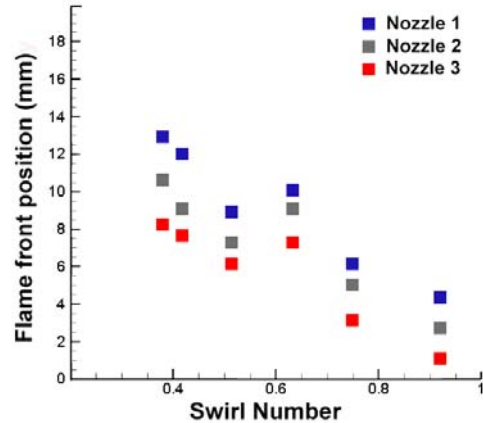
۴- همچنین افزایش سرعت توده جریان سبب افزایش نرخ سوزش مشعل شده و با افزایش میزان انرژی آزادشده در ناحیه احتراق و همچنین افزایش میزان شدت چرخش جریان، مقاومت شعله در برابر خاموشی تا حدودی بهبود می‌یابد.

۵- میزان آلاینده اکسیدهای نیتروژن به‌صورت افزایشی با نسبت هم‌ارزی افزایش پیدا کرده و شیب افزایش آن برای چرخاننده با نسبت شعاع بالاتر، بیشتر است و چرخاننده شماره ۵ با نسبت شعاع ۵۷٪ که کمترین نسبت شعاع میان چرخاننده‌های دیگر است، دارای کمترین آلاینده‌گی در میان سه چرخاننده دیگر است و به‌طوری که در یک نسبت هم‌ارزی مشخص، میزان اکسیدهای نیتروژن در چرخاننده شماره ۵ حدود ۳۰٪ کمتر از چرخاننده شماره ۴ با نسبت شعاع بیشتر است.

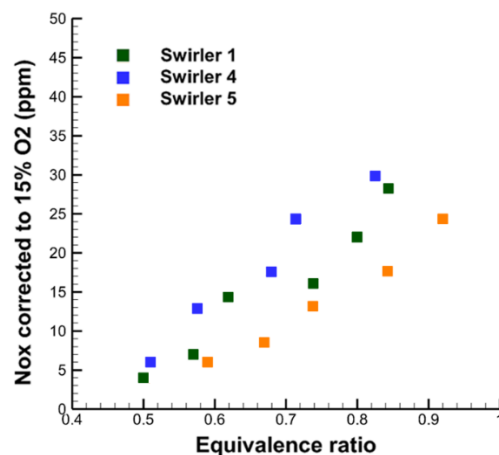
تشکر و قدردانی: نویسندگان مراتب قدردانی و تشکر خود را از کارکنان مرتبط با آزمایشگاه احتراق دانشکده فناوری‌های نوین دانشگاه شهید بهشتی اعلام می‌دارند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان اصالت و نوآوری محتوای مقاله را تایید می‌کنند.

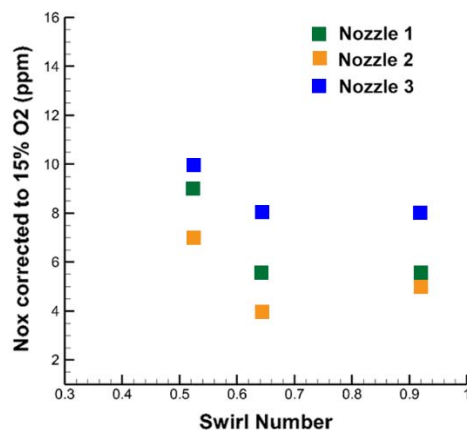
که نازل شماره ۲ دارای کمترین میزان اکسیدهای نیتروژن تولیدی است و افزایش یا کاهش کلی آلاینده‌ها با طول نازل رابطه خطی نداشته و دارای یک مقدار بهینه است که در بین سه نازل مورد استفاده، نازل شماره ۲ دارای این مقدار بهینه است.



نمودار ۴) موقعیت قرارگیری جبهه شعله از دهانه مشعل تحت تاثیر تغییرات طول نازل



نمودار ۵) مقایسه آلاینده‌گی اکسیدهای نیتروژن سه چرخاننده با نسبت شعاع متفاوت



نمودار ۶) میزان آلاینده‌گی اکسیدهای نیتروژن تحت تاثیر تغییرات طول نازل

high-swirl injectors and low-swirl injectors for lean premixed gas turbines. Proceedings of the Combustion Institute. 2005;30(2):2867-2874.

8- Littlejohn D, Cheng, RK. Fuel effects on a low-swirl injector for lean premixed gas turbines. Proceedings of Combustion Institute. 2007;31(2):3155-3162.

9- Ballachey GE, Johnson MR. Prediction of blowoff in a fully controllable low-swirl burner burning alternative fuels: Effects of burner geometry, swirl, and fuel composition. Proceedings of the Combustion Institute. 2013;34(2):3193-3201.

10- Littlejohn D, Cheng RK, Noble DR, Lieuwen T. Laboratory investigations of low-swirl injectors operating with syngases. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2010;132(1):011502.

11- Cheng RK, Littlejohn D, Strakey PA, Sidwell T. Laboratory investigations of a low-swirl injector with H₂ and CH₄ at gas turbine conditions. Proceedings of the Combustion Institute. 2009;32(2):3001-3009.

12- Emadi M, Kakow D, Salameh T, Gohil A, Ratner A. Flame structure changes resulting from hydrogen-enrichment and pressurization for low-swirl premixed methane-air flames. International Journal of Hydrogen Energy. 2012;37(13):10397-10404.

13- Therkelsen PL, Littlejohn D, Cheng RK. Parametric study of low-swirl injector geometry on its operability. ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition, 11-15 June 2012, Copenhagen, Denmark. New York: ASME; 2012.

14- Beerer D, McDonell V, Therkelsen P, Cheng RK. Flashback and turbulent flame speed measurements in Hydrogen/Methane flames stabilized by a low-swirl injector at elevated pressures and temperatures. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2014;136(3):031502.

15- Verbeek AA, Bouten TWFM, Stoffels GGM, Geurts BJ, Van der Meer TH. Fractal turbulence enhancing low swirl combustion. Combustion and Flame. 2015;162(1):129-143.

16- Verbeek AA, Willems PA, Stoffels GGM, Geurts BJ, Van der Meer TH. Enhancement of turbulent flame speed of V-shaped flames in fractal-grid-generated turbulence. Combustion and Flame. 2016;167:97-112.

17- Deng Y, Wu H, Su F. Combustion and exhaust emission characteristics of low swirl injector. Applied Thermal Engineering. 2017;110:171-180.

18- Xiao Y, Cao Z, Wang C. Flame stability limits of premixed low-swirl combustion. Advances in Mechanical Engineering. 2018;10(9):1-11.

19- Farshchi M, Tohidi ND. Experimental investigation of a lean premixed low swirl burner emissions. Proceedings of 3rd Fuel and Combustion Conference of Iranian Combustion Institute, 22 February 2010, Tehran, Iran. Tehran: Amirkabir University; 2010. [Persian]

20- Ghazikhani M, Pishbin SI, Modares Razavi MR. 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. 2014;14(14):27-38. [Persian]

21- Nahvi M, Mazaheri K, Parsafar MM, Mohammadpour A. Experimental analysis of blockage effect on low-swirl burner combustion parameters for lean premixed natural gas-air flames. Proceedings of 18th Fluid Dynamics Conference, 27-29 August 2019, Mashhad, Iran. Tehran: Tarbiat Modares University; 2019.

22- Heshmati N. Design and development of a premixed low swirl burner with the approach of applying the LSB

تعارض منابع: مقاله مستخرج از پایان نامه ارشد آقای نوید حشمتی با عنوان طراحی و ساخت مشعل کم چرخش با رویکرد به کارگیری در میکروتوربین به راهنمایی آقای دکتر سیدمهدی میرساجدی است.

سهم نویسندگان: نوید حشمتی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ سیدمهدی میرساجدی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۵۰٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

فهرست علائم

LSI	انژکتور کم چرخش
\emptyset	نسبت هم‌ارزی
NO_x	اکسیدهای نیتروژن
α	زاویه پره چرخاننده
R	نسبت شعاع چرخاننده
S	عدد چرخش
U_{Bulk}	سرعت توده جریان
U	مولفه سرعت محوری
W	مولفه سرعت مماسی
LPM	لیتر بر دقیقه
STP	شرایط دما و فشار استاندارد
m/s	متر بر ثانیه
R_i	شعاع انژکتور کم چرخش
R_c	شعاع کانال مرکزی چرخاننده
\dot{m}_{air}	دبی جرمی هوا
\dot{m}_{fuel}	دبی جرمی سوخت
ρ_{air}	چگالی هوا
ρ_{fuel}	چگالی سوخت
B	نسبت انسداد چرخاننده

منابع

- Chan CK, Lau KS, Chin WK, Cheng RK. Freely propagating open premixed turbulent flames stabilized by swirl. Symposium on Combustion. 1992;24(1):511-518.
- Cheng RK, Yegian DT, Miyasato MM, Samuelsen GS, Benson CE, Pellizzari R, et al. Scaling and development of low-swirl burners for low-emission furnaces and boilers. Proceedings of the Combustion Institute. 2000;28(1):1305-1313.
- Cheng RK. Velocity and scalar characteristics of premixed turbulent flames stabilized by weak swirl. Combustion and Flame. 1995;101(1-2):1-14.
- Yegian DT, Cheng RK. Development of a vane-swirler for use in a low NO_x weak-swirl burner [Report]. Barkley: Office of Scientific and Technical Information (OSTI); 1996, DE97001252.
- Yegian DT, Cheng RK. Development of a lean premixed low-swirl burner for low NO_x practical applications. Combustion Science and Technology. 1998;139(1):207-227.
- Cheng RK, Littlejohn D, Nazeer WA, Smith KO. Laboratory studies of the flow field characteristics of low-swirl injectors for adaptation to fuel-flexible turbines. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2008;130(2):503-512.
- Johnson MR, Littlejohn D, Nazeer WA, Smith KO, Cheng RK. A comparison of the flowfields and emissions of

Tehran, Iran. Tehran: Iranian Society of Aerospace Propulsion; 2019. [Persian]
 25- Frank A, Therkelsen P, Sierra Aznar M, Rapp VH, Cheng RK, Chen JY. Investigation of the down-scaling effects on the low swirl burner and its application to microturbins. ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 11-15 June 2018, Oslo, Norway. New York: ASME; 2018.
 26- Syred N, Beér JM. Combustion in swirling flows: A review. Combustion and Flame. 1974;23(2):143-201.
 27- Beér JM, Chigier NA. Combustion aerodynamics. New York: Halsted Press Division, Wiley; 1972.

in microturbins [dissertation]. Tehran: Shahid Beheshti University; 2019. [Persian]
 23- Heshmati N, Mirsajedi SM. Experimental investigation of the effects of vane shape and vane angle of low swirl injector on natural gas flame stability. Proceedings of 18th International Conference of Iranian Aerospace Association, 4-6 February 2020, Tehran, Iran. Tehran: Shahid Beheshti University; 2020. [Persian]
 24- Heshmati N, Mirsajedi SM. Experimental investigation of low swirl burner flame stability. Proceedings of 4th National Conference of Iranian Aerospace Propulsion Association, 27-28 February 2019,