

Analysis and measurement of performance parameters of combustion by adding chamber to a double swirl burner

Ali Asadifard¹, Sadegh Tabejamaat², Abbas Zandilak³, Behrad Karimi

¹ School of Aerospace engineering, Amirkabir university of technology, Tehran, Iran. Email: ali.asadifard@aut.ac.ir

² **Corresponding author**, School of Aerospace engineering, Amirkabir university of technology, Tehran, Iran. Email: sadegh@aut.ac.ir

³ School of Aerospace engineering, Amirkabir university of technology, Tehran, Iran. Email: Aero.abbas@aut.ac.ir

⁴ School of Aerospace engineering, Amirkabir university of technology, Tehran, Iran. Email: Karimi98@aut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type

Research Article

Article history

Received 2025.11.11

Received in revised form 2025.12.16

Accepted 2026.12.25

Available online 2025.12.31

Keywords:

Combustion Chamber

Double Swirl Burner

Swirl Number

Combustion Parameters

ABSTRACT

Double swirl burners are a type of advanced burner designed to improve combustion and increase flame stability and efficiency. The burner used in current consists of two separate swirling air streams. Various experiments have been performed and the results obtained from the tests have been repeated in the case of installing a chamber on the burner to analyze and examine the changes that have occurred. The basic variables include the equivalence ratio, inner swirl number, outer swirl number and flow split ratio. Tests conducted in both cases without a chamber and with a chamber indicate that adding a chamber generally limits the stability of the burner and in some cases results in a longer flame length. In addition, the results show that adding a chamber in some places causes the lean blowout limit to extend to lower equivalence ratios. It is also shown that in certain conditions, increasing the outer flow split ratio leads to a shorter flame length and an increase in flame width; both effects were simultaneously observed in the flame area as well. In addition, at the points that were performed for both configuration (with and without the chamber), with a certain confinement ratio, the flame liftoff height did not change.

Introduction

Background and Research Motivation

Swirl-stabilized burners play a pivotal role in flame stabilization and pollutant emission reduction in gas turbine combustors and industrial furnaces, primarily owing to their capacity to establish an Inner Recirculation Zone (IRZ) that promotes enhanced fuel–air mixing and continuous hot product recirculation. Increasing the swirl number generally augments flame stability by strengthening the IRZ and prolonging reactant residence time. However, excessive swirl intensity may trigger adverse phenomena, including flame liftoff, blowoff, or the onset of large-scale vortex-induced instabilities.

Literature Review and Research Gap

The objective of this investigation is to experimentally compare the flame characteristics of a double-swirl burner operating under two distinct configurations: an unconfined (open) flame and a confined flame enclosed within a combustion chamber. Given the potential non-coincidence of stable operating points between these two configurations, the comparative analysis was systematically conducted based on corresponding points evaluated under both conditions. Early investigations into the fundamentals of swirling flows were pioneered by Gupta et al. [1], who demonstrated that under weak swirl conditions (swirl number less than 0.4), the jet thickness increases accompanied by the formation of toroidal ring vortices within the shear layer. Conversely, under intense swirl conditions, toroidal vortex structures emerge within the mixing layer, significantly enhancing mixing efficiency. Moreover, they established that exceeding a critical swirl number threshold precipitates vortex breakdown and jet instability. [3], investigating coaxial liquid fuel and diesel combustion, reported that the implementation of a double-swirl configuration elevates the centerline temperature and, under optimal fuel injection strategies within the inner annulus, contributes to a measurable reduction in nitrogen oxide emissions. The establishment of an inner recirculation zone (IRZ) is widely recognized as a critical prerequisite for stabilizing lean flames. Concerning combustion instabilities, Huang and Yang [6] comprehensively categorized the driving mechanisms into four principal sources: large-scale coherent vortical structures downstream of the injector, equivalence ratio fluctuations induced by upstream acoustic perturbations, flame surface area variations arising from acoustic–vortex interactions, and acoustic oscillations influencing droplet atomization dynamics. Investigations into confinement effects have revealed the substantial influence of chamber boundaries on flame behavior. Ji et al. [7]

Cite This Paper

Asadifard, Ali., Tabejamaat, Sadegh., Zandilak, Abbas., & Karimi, Behrad., (2025). Analysis and measurement of performance parameters of combustion by adding chamber to a double swirl burner. *Fuel and Combustion*, 18 (4), 50-80. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.564242.1452> (In Persian)

ارجاع دهی به این مقاله



reported that increasing the confinement ratio up to a certain limit extends the lean blowout limit, attributing this improvement to the sequential influence of the outer recirculation zone (ORZ) and the inner recirculation zone. In a numerical study, Barakat et al. [8] established that enlarging the combustor diameter expands both the IRZ and ORZ dimensions, thereby reducing the mean axial velocity, increasing reactant residence time, and enhancing flame stabilization. Similarly, Fu et al. [9] noted that the central recirculation region remains markedly short in unconfined configurations, extending to merely 73 mm, whereas under confinement, this region elongates substantially up to 250 mm. Burke et al. [10] examined outwardly propagating premixed flames within a cylindrical chamber and concluded that the error in laminar flame speed determination remains below 3%, provided the ratio of flame radius to chamber radius is maintained below 0.3. Chong et al. [11], investigating a counter-rotating double-swirl burner, found that increasing the inner swirl number intensifies the reaction zone luminosity and thickness. Furthermore, they noted that stratified fueling strategies, characterized by a lean inner mixture and rich outer mixture, exacerbate pollutant emissions compared to homogeneous premixed combustion along the centerline. Mardani et al. [12] investigated lean blowout limits in a gas turbine model combustor and demonstrated that at elevated flow rates, the implementation of a vaned swirler injector reduces the lean blowout limit by approximately 28%. Additionally, they reported that while preheating the inlet air to 100 °C enhances stability margins by roughly 10%, it simultaneously incurs a more than threefold increase in nitrogen oxide emissions.

Research Objectives

Drawing upon systematic experimental measurements, this paper presents a comprehensive comparative analysis of how the addition of a rectangular combustion chamber to a double-swirl burner modifies the following critical performance parameters: (1) the lean blowout limit and overall lean combustion envelope, (2) flame stability characteristics and stability mapping, (3) flame macrostructure and geometrical attributes, including flame length, width, projected area, and liftoff height, and (4) the coupled and individual influences of inner and outer swirl numbers on the aforementioned parameters under both unconfined and confined operating conditions.

Methodology

The experimental facility employed in this investigation comprised a double-swirl burner capable of independent regulation of air flow through four distinct passages, namely: inner axial flow, inner tangential (swirling) flow, outer axial flow, and outer tangential (swirling) flow. The burner was integrated with a square cross-section combustion chamber to enable systematic comparison between unconfined and confined flame configurations. Compressed air was supplied by an air compressor and subsequently passed through an air dryer to remove moisture prior to flow metering. The air flow rate through each individual passage was measured and controlled using dedicated rotameters. The fuel utilized throughout the experiments was natural gas, predominantly composed of methane, and its volumetric flow rate was regulated via a separate, dedicated rotameter. The experimental campaign was conducted under two primary configurations: an unconfined configuration, corresponding to a free-standing open flame, and a confined configuration, wherein the burner was enclosed within the combustion chamber. To facilitate a systematic analysis of the results and to reduce the requisite number of experimental trials, several dimensionless parameters were employed, including the inner swirl number, the outer swirl number, the flow split ratio, defined as the ratio of outer annulus air flow rate to inner annulus air flow rate, and the global equivalence ratio. The actual volumetric flow rates of air and fuel were determined by applying appropriate calibration correction factors to the rotameter readings, accounting for the actual ambient pressure and temperature conditions prevailing at the test site. The swirl number was computed based on the ratio of axial flux of tangential momentum to the axial flux of axial momentum, incorporating simplifying assumptions appropriate for plug flow with solid-body rotation.

Flame structure and morphology were captured using direct high-speed photography with a digital camera operating at a high shutter speed. Owing to the inherently transient and unsteady nature of the flame, multiple sequential frames were acquired for each operating condition. A dedicated image processing code was subsequently employed to perform temporal averaging of the acquired frames, thereby yielding a stable and representative time-averaged image from which the flame boundaries could be reliably extracted. The true physical dimensions of the flame, including length, width, and projected area, were determined through spatial calibration using a gridded reference target positioned within the measurement plane. The experimental test matrix was designed to encompass a comprehensive range of operating conditions and comprised the following investigations: determination of the lean combustion envelope and lean blowout limit, extraction of flame stability maps, and quantification of flame geometrical attributes, including liftoff height, overall flame length, flame width, and projected flame area, across a parametric sweep of varying inner and outer swirl numbers and flow split ratios. This systematic test matrix facilitated

a direct and rigorous comparison of double-swirl burner performance between the unconfined and confined configurations. Preliminary observations indicated that the presence of the combustion chamber resulted in an apparent increase in the reaction zone thickness and an expansion of the flame opening angle, whereas the flame liftoff height exhibited no discernible variation at stable operating points.

Results and Discussion

Effect of Confinement and Swirl Number on the Lean Blowout Limit

Adding a combustion chamber extended the lean blowout limit via recirculation of hot products and active radicals (OH, CH) from chamber walls back to the reaction zone, sustaining flame temperature and delaying extinction. The outer swirl number dominated this effect: increasing it intensified the radial pressure gradient, drawing the IRZ closer to the burner exit. Increasing inner swirl improved the lean blowout limit only up to a critical threshold, beyond which performance degraded, likely due to a reduced Damkohler number and partial ejection of fuel from the recirculation zone.

Flame Stability: Unconfined vs. Confined

Contrary to expectations, confinement constricted rather than broadened the stability envelope. Many points stable in the unconfined case became unstable with the chamber installed. While confinement strengthens the ORZ, it alters IRZ structure and increases wall heat dissipation, destabilizing low-flow regimes. Best stability occurred at high outer swirl and richer mixtures (lower-right of stability maps); worst stability occurred near purely axial flow. At the lowest outer swirling flow rate, more stable points were recorded, possibly due to enhanced mixing at reduced radial velocities.

Flame Macrostructure and Geometry under Confinement

The most striking change with confinement was the collapse of flame liftoff height to zero at all stable points; the flame attached firmly to the burner exit, demonstrating powerful stabilization. Increasing inner swirl generally broadened the flame and shortened it, especially at higher outer swirling flow rates, yielding a flatter, more compact shape. The outer swirl number primarily increased flame width via greater tangential momentum and lateral IRZ expansion. At the highest outer flow rate, confined flame length was shorter than unconfined, due to wall impingement and inward flow deflection. At lower flow rates, the confined flame was occasionally longer, indicating wall-induced stretching. The projected flame area was consistently smaller under confinement, attributed to wall-quenching and a compacted reaction zone. At the highest outer flow rate, flame area decreased monotonically with increasing outer swirl number.

Conclusions

1. **Lean Blowout Limit:** The combustion chamber extended the stable combustion envelope to leaner mixtures.
2. **Open Configuration:** Reducing inner swirl sometimes broadened the flame, sometimes had no effect. Maximum luminosity occurred when inner and outer flow split ratios were nearly equal.
3. **Confinement Effect:** The chamber contracted the inner recirculation zone by expanding the outer recirculation zone via wall impingement, compressing the combustion region. Increasing inner swirl expanded the flame cone angle, a trend unaffected by confinement. Confinement drastically reduced flame liftoff height, making the flame mostly attached.
4. **Combined Effects:** Under confinement, flame length varied non-monotonically with inner swirl and was strongly modulated by outer swirl, which promoted flame shortening. Flame projected area and width depended markedly on outer swirl intensity and flow rate.

In essence: Adding a combustion chamber fundamentally alters flame morphology and dimensions through complex swirl-flow interactions, while also improving stability margins.

اندازه‌گیری و تحلیل پارامترهای عملکردی احتراق با افزودن محفظه به یک مشعل دوپیچشی

علی اسدی فرد^۱، صادق تابع‌جماعت^{۲*}، عباس زندی‌لک^۳، بهراد کریمی^۴^۱ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، پست الکترونیکی: ali.asadifard@aut.ac.ir^۲ نویسنده مخاطب، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، پست الکترونیکی: sadegh@aut.ac.ir^۳ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، پست الکترونیکی: Aero.abbas@aut.ac.ir^۴ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، پست الکترونیکی: Karimi98@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله مقاله پژوهشی	مشعل‌های دوپیچشی، نوعی مشعل پیشرفته هستند که برای بهبود احتراق و افزایش پایداری و کارایی شعله طراحی شده‌اند. مشعل استفاده شده در این پژوهش، از دو جریان هوای پیچشی مجزا تشکیل شده است. آزمایش‌های مختلف بر روی این مشعل، انجام شده است، سپس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها در حالت تعیبه محفظه روی مشعل نیز تکرار شده است تا تغییرات به وجود آمده مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. متغیرهای اساسی شامل نسبت هم‌ارزی، عدد پیچش داخلی، عدد پیچش خارجی و نسبت تقسیم جریان است. آزمایش‌های انجام شده در هر دو حالت بدون محفظه و با محفظه حاکی از آن است که افزودن محفظه پایداری مشعل را در حالت کلی محدودتر کرده و در بعضی موارد باعث کشیده‌تر شدن طول شعله می‌شود. ضمناً نتایج نشان می‌دهد که افزودن محفظه در برخی نقاط موجب می‌شود که محدوده خاموشی رقیق به مقادیر نسبت‌هم‌ارزی کمتر توسعه پیدا کند. همچنین در شرایط خاصی نشان داده می‌شود که افزایش نسبت تقسیم خارجی باعث می‌شود که طول شعله کمتر شود و عرض شعله افزایش می‌یابد و هم‌زمان این دو اثر در مساحت شعله نیز دیده شده است. ضمناً در نقاطی که برای هر دو حالت بامحفظه و بدون محفظه انجام شد، با نسبت محصورسازی مشخص، ارتفاع بلندشدگی شعله تغییری نکرد.
تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰	
کلیدواژه‌ها: محفظه احتراق مشعل دوپیچشی عدد پیچش پارامترهای احتراق	

مقدمه

مطالعه احتراق به‌خودی‌خود همواره در جهت بهینه‌سازی و تأمین مصرف انرژی انجام شده است. در طول دهه‌های گذشته تمرکز بر روی مشعل‌های با کارایی بالا بیشتر شده است. از جمله روش‌های کارایی و پایداری بیشتر شعله، پیچش دادن به جریان به روش‌های مختلف است. مشعل دوپیچشی^۱ نوعی مشعل پیشرفته است که با یک پیچش داخلی و یک پیچش خارجی به صورت هم‌گرد یا خلاف‌هم‌گرد موجب کارایی بیشتر و افزایش کیفیت احتراق می‌شود. این پیچش جریان، کیفیت احتراق، پایداری شعله و کاهش اکسیدهای نیتروژن را تضمین می‌کند.

در این پژوهش، برخی ویژگی‌های کلیدی احتراق از جمله محدوده‌ی احتراق رقیق، پایداری شعله، ساختار شعله، ارتفاع بلندشدگی شعله، طول، عرض و مساحت شعله در دو وضعیت بدون محفظه و با محفظه، مورد مطالعه قرار گرفته است. این بررسی بر پایه‌ی متغیرهای بی‌بعدی نظیر عدد پیچش^۲ داخلی، عدد پیچش خارجی، نسبت تقسیم جریان^۳ و نسبت هم‌ارزی

¹ Double Swirl Burner² Swirl number³ Split ratio

Cite This Paper

Asadifard, Ali., Tabejamaat, Sadegh., Zandilak, Abbas., & Karimi, Behrad., (2025). Analysis and measurement of performance parameters of combustion by adding chamber to a double swirl burner. Fuel and Combustion, 18 (4), 50-80. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.564242.1452> (In Persian)

ارجاع‌دهی به این مقاله



انجام خواهد شد؛ هدف از این تحلیل، دستیابی به درکی عمیق‌تر از رفتار و ادبیات عملکردی مشعل‌های پیچشی است. همچنین، با استخراج و تحلیل شکل‌های مرتبط، امکان مقایسه‌ی ویژگی‌های شعله در دو حالت موردنظر فراهم خواهد شد. باتوجه به اینکه ممکن است نقاط پایدار در حالت با محفظه دقیقاً همان نقاط در حالت بدون محفظه نباشد، در ابتدا شکل‌های مربوط به حالت بدون محفظه تدوین خواهد شد و در ادامه، نقاط پایدار یافته در حالت با محفظه با نقاط متناظر در حالت بدون محفظه مقایسه خواهند شد. در ادامه، مرور ادبیات برای دو حالت مشعل‌های دوپیچشی بدون محفظه و با محفظه تنظیم شده است.

اولین تلاش‌ها برای مطالعه منظم و ساختاریافته رژیم جریان پیچشی در مطالعات گوپتا و همکاران [۱] ذکر شده است. گوپتا و همکاران در بخشی از کتاب خود به بررسی آیرودینامیک جریان در حالتی که سوخت به صورت غیرپیش‌آمیخته با زاویه خاص به هوای پیچشی برخورد می‌کند و حالتی که سوخت به صورت پیش‌آمیخته با هوای پیچشی از مجرای نازل مشعل خارج می‌شود، پرداختند. آن‌ها دریافتند وابسته به نحوه‌ی که عدد پیچش در یک سامانه ایجاد شده است، تعریف عدد پیچش (شار محوری تکانه پیچشی به شار محوری تکانه محوری) با برخی فرض‌ها، به عبارت‌های ساده‌تر تبدیل می‌شود. در یک جریان پیچشی آن‌ها نیز دریافتند اثر پیچش‌های ضعیف (عدد پیچش تا ۰/۴)، افزایش ضخامت جت‌های آزاد یا محصور است. در این حالت تغییر فشار در بقای تکانه محوری باعث خواهد شد با افزایش فاصله شعاعی از محور مرکزی مشعل، باعث بهبود جت‌های آزاد یا محصور شود. این پژوهشگرها همچنین در جریان‌های جت بدون پیچش یا با پیچش ضعیف، متوجه تشکیل گردابه‌های حلقه‌ای شکل در لایه برشی شدند، و اذعان داشتند در جت‌های با پیچش شدید، ساختارهای گردابه‌ای مارپیچی^۱ در لایه اختلاط شکل گرفته و باعث بهبود اختلاط می‌شوند و زمانی که نرخ پیچش از یک مقدار بحرانی مشخص فراتر رود، ناپایداری گردابه‌ای در جت‌های پیچشی رخ خواهد داد. وانگ و همکاران [۲] در یک احتراق نفوذی متان و هوا که به صورت هم‌محور ایجاد شده بود دریافتند که در یک لوله محصور، ارتفاع شعله با افزایش سرعت سوخت در مجرای مرکزی، تا زمانی که به حالت بلندشدگی شعله درآید، افزایش می‌یابد. در تست‌های احتراق دیزل و سوخت مایع، ماتر و همکاران [۳] سوخت دیزل را به صورت هم‌محور با استفاده از پیچشگر به صورت غیرپیش‌آمیخته از مجرای داخلی با جریان غیرپیش‌آمیخته هوا و سوخت مایع که از مجرای خارجی عبور می‌کرد، محترق کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از دوپیچش باعث افزایش دمای خط مرکزی شعله شده و همچنین مقدار بهینه تزریق سوخت مایع در مجرای داخلی باعث کاهش اکسیدهای نیتروژن خواهد شد. در شعله‌های دو-پیچشی رقیق، ایجاد و تقویت ناحیه پیچشی داخلی^۲ (IRZ) برای پایداری شعله ضروری است. گزارش شده که با افزایش عدد پیچش، شعله‌ها توانایی کارکرد در نسبت‌های هم‌ارزی ضعیف‌تر (رقیق‌تر) پیدا می‌کنند. برای نمونه کوزی و همکاران [۴] مشاهده کردند که در مشعلشان با پیچش زیاد جت مرکزی، توانسته‌اند در شرایط نسبت هم‌ارزی بسیار کم (رقیق) شعله را نگه دارند. در مطالعه‌ای دیگر، کونینگ و همکاران [۵] نشان دادند که عدد پیچش بالای تقریباً ۰/۹ برای حفظ پایداری شعله ضروری است، چرا که نیروی محوری بالاتر، شعله را با جت سوخت تثبیت می‌کند و پایداری را افزایش می‌دهد. البته این فزونی پیچش یک حد بهینه دارد؛ پیچش بیش از حد باعث سرریز (IRZ) به بالادست محفظه و پدیده بازگشت شعله^۳ می‌شود. به علاوه، اثر نسبت هم‌ارزی بر پایداری و آلاینده‌ها در مشعل‌های چرخان ثابت شده است؛ وقتی نسبت هم‌ارزی کاهش یابد (شعله رقیق‌تر شود)، دمای شعله پایین آمده و تولید اکسیدهای نیتروژن کاهش می‌یابد، اما در عین حال احتراق ناقص بیشتر شده و مقدار کربن مونواکسید به شدت افزایش می‌یابد.

¹ Toroidal vortex structures

² Inner Recirculation Zone (IRZ)

³ flashback

در حقیقت اصلی‌ترین دلیل پیچش در احتراق به دلیل پایداری شعله، تولید کمتر اکسیدهای نیتروژن و جلوگیری از ایجاد هیدروکربن‌های نسوخته و کربن مونوکسید و مولکول‌های با ظرفیت اشباع نشده است. البته افزایش پیچش در سامانه احتراقی تا فراتر از حد مشخصی، باعث به‌وجود آمدن هسته گردابه پیش‌رونده^۱ نیز می‌شود که باعث بلندشدگی شعله و ناپایداری آن خواهد شد [۴]. مطالعه‌های گسترده‌ای پیرامون ناپایداری ناشی از احتراق‌های پیچشی انجام شده است. هاونگ و یانگ [۶] در مطالعات خود بر روی محفظه احتراق‌های رقیق پیش‌آمیخته به این نتیجه رسیدند که منبع ناپایداری در مشعل‌های پیچشی به ۴ پدیده اصلی برمی‌گردد ۱- گردابه‌های مقیاس بزرگ در پایین دست تزریقگر سوخت که به تعامل با شعله و آزادسازی گرمایی نوسانی در شعله مربوط است. ۲- نوسانات نسبت سوخت به هوا که از امواج صوتی بالادست جریان نشئت می‌گیرد ۳- گوناگونی سطح شعله در اثر برهم کنش امواج صوتی و گردابه‌های مقیاس بزرگ و ۴- تناوب‌های صوتی که در اثر ناپایداری به وجود می‌آید و اتمایزه کردن قطرات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. جی و همکاران [۷] در یک مشعل پیچشی که متان و هوا به صورت پیش‌آمیخته ترکیب شده بودند، مشاهده کردند که محصور کردن احتراق می‌تواند به‌طور قابل توجهی محدوده‌های خاموشی را بهبود دهد. این اثر مساعد با افزایش نسبت محصورسازی^۲ محفظه احتراق تا اندازه مشخصی، بیشتر می‌شود. آن‌ها این پدیده را برای نسبت محصورسازی ۳، ناشی از اثر ناحیه گردش خارجی، و در نسبت محصورسازی ۲، ناشی از اثر ناحیه گردشی داخلی دانستند. تأثیر نسبت قطر محفظه به قطر تیغه پیچش‌گر بر تثبیت شعله با تحلیل ساختار شعله و میدان‌های جریان آشکار می‌شود. باراکات و همکاران [۸] در یک مطالعه عددی روی مشعل پیچشی مشاهده کردند افزایش قطر محفظه احتراق باعث بزرگ‌تر شدن نواحی گردشی داخلی و ناحیه گردشی خارجی^۳ (ORZ) می‌شود. این افزایش اندازه، موجب کاهش سرعت محوری متوسط و بهبود اختلاط، کارایی احتراق و تثبیت شعله از طریق افزایش زمان ماند مواد واکنش‌دهنده و تشکیل رادیکال‌ها می‌شود. فو و همکاران [۹] در یک مطالعه عددی، تأثیر سطوح مختلف محصورسازی شعله را بر الگوهای جریان در پایین دست یک پیچشگر بررسی کردند. در حالت بدون محصور کردن، منطقه گردشی مرکزی بسیار کوتاه بود و اندازه‌گیری تنها تا ۷۳ میلی‌متر انجام شد، در حالی که در موارد محصور شده تا ۲۵۰ میلی‌متر ادامه یافته بود. بورک و همکاران [۱۰] اثر محصور کردن مشعل را بر روی یک شعله منتشرشونده روبه بیرون^۴ در یک سیلندر شفاف که سوخت و هوا به صورت پیش‌مخلوط محترق می‌شوند، با روش فشار ثابت برای محاسبه سرعت شعله، بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند زمانی که نسبت شعاع شعله به شعاع محفظه کمتر از ۰/۳ باشد، می‌توان محاسبات لازم برای محاسبه سرعت شعله را با خطای کمتر از ۳٪ نسبت به حالت بدون محفظه بیان کرد. چنگ و همکاران [۱۱] که مطالعه آن‌ها بر روی یک مشعل دوپیچشی خلاف‌گرد با احتراق پیش‌آمیخته بود، نشان دادند که در مجرای داخلی هر چه عدد پیچش بیشتر شود، برای مخلوط‌های غنی، ناحیه واکنش شدیدتر و روشن تر می‌شود. همچنین ترکیب سوخت رقیق در مجرای داخلی و سوخت غنی در مجرای خارجی باعث به وجود آمدن آلایندگی‌های بیشتری نسبت به احتراق همگن پیش‌آمیخته روی خط مرکزی خواهد شد. تغییر نسبت تقسیم جریان هوا بین مجراهای داخلی و خارجی بر انتشار آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارد، به ویژه، چیدمان جریان پیچشی داخلی پایین تر و خارجی بالاتر، منجر به نرخ‌های انتشار بالاتر آلاینده‌ها، در حالت نسبت هم‌ارزی غنی داخلی یا رقیق خارجی می‌شود. مردانی و همکاران [۱۲] تحقیقات خود روی یک محفظه احتراق دوپیچشی مدل توربین گاز بر روی محدوده خاموشی رقیق انجام دادند. نتایج نشان داد که در نرخ جریان کم، تغییرات هندسی

¹ Precessing Vortex Core

² Confinement ratio

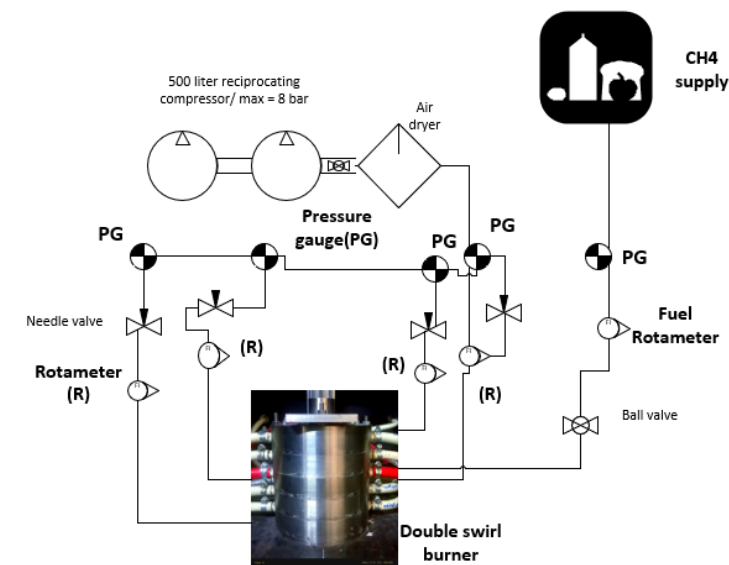
³ Outer Recirculation Zone

⁴ Outwardly propagating

و پیش‌گرمایش تأثیر کمی بر پایداری شعله دارند و به طور کلی نوع تزریقگر و محفظه نقش چندانی در بهبود پایداری ندارند. اما در نرخ جریان زیاد، استفاده از تزریقگر شیاردار توانست محدوده خاموشی شعله را حدود ۲۸٪ کاهش دهد. همچنین اندازه‌گیری‌های دما و ترکیب گازهای خروجی نشان داد که در محدوده‌ای از شرایط کاری (حدود ۲۵-۵۰٪ بالاتر از محدوده خاموشی رقیق)، احتراق نسبتاً کامل و دمای مناسب همراه با مقادیر بسیار پایین اکسیدهای نیتروژن کمتر از ۱۰ ppm برقرار می‌شود. افزایش توان مشعل در این محدوده، باعث افزایش دمای متوسط و بازدهی احتراق شده و در عین حال تولید اکسیدهای نیتروژن کاهش یافته است. باین‌حال، پیش‌گرمایش هوای ورودی تا ۱۰۰ درجه سلسیوس، هرچند باعث بهبود پایداری حدود ۱۰ درصد می‌شود، اما تولید اکسیدهای نیتروژن را به بیش از سه برابر افزایش می‌دهد. با وجود این، کمتر مطالعه‌ای به طور مشخص اثر صریح افزودن یک محفظه مجزا بر عملکرد یک مشعل دوپیچشی پرداخته است. به عبارت دیگر، شکاف تحقیقاتی مهمی در نحوه تغییر الگوی جریان‌های چرخان و نواحی بازگشتی در نتیجه‌ی طراحی هندسی جدید وجود دارد. مطالعه حاضر با بهره‌گیری از نتایج تجربی خود نشان خواهد داد که چگونه افزودن یک محفظه‌ی به مشعل دوپیچشی می‌تواند میدان جریان، پارامترهای احتراقی، میزان IRZ/ORZ و نهایتاً پایداری شعله را دستخوش تغییر کند تا خلأ موجود در ادبیات پژوهش پر شود.

روش‌شناسی

در شکل ۱ نقشه سیستم‌ها و تجهیزات سامانه مشعل دوپیچشی نشان داده شده است. این تجهیزات شامل، مشعل، محفظه، لوله‌ها، روتامترها، شیرهای فشارشکن، کمپرسور، خشک‌کن هوا و آکومولاتور است که پیش‌تر توسط پژوهشگرهای دانشگاه صنعتی امیرکبیر طراحی و ساخته شده است.

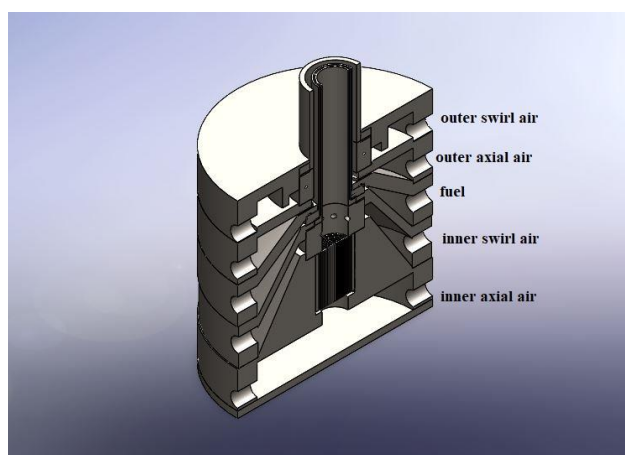


شکل ۱- نقشه سامانه‌ها و تجهیزات استفاده شده در مشعل دوپیچشی

Figure 1 – Schematic of the systems and equipment used in the double swirl burner

کمپرسور استفاده شده ظرفیت ۵۰۰ لیتر داشته که توان هر کمپرسور، ۱/۵ اسب بخار (۱/۱ کیلووات) است و قابلیت تولید فشار تا ۸ بار را دارد. هر کمپرسور مجهز به دو موتور رفت و برگشتی است که توسط یک الکتروموتور ۵/۵ اسب بخاری به حرکت درآورده می‌شوند. خشک‌کن هوای استفاده شده دارای ظرفیت ۴۰ مترمکعب بر دقیقه و خروجی و ورودی ۲ اینچ است. هوا از

چهار مجرا وارد مشعل می‌شود که این مجرا به ترتیب عبارتند از ۱- هوای محوری داخلی ۲- هوای مماسی داخلی ۳- هوای محوری خارجی ۴- هوای مماسی خارجی. تمام جریان‌های هوا پیش از ورود، جهت تنظیم کنترل از چهار روتامتر مخصوص به خود که می‌توانند تا ۲۰۰ لیتر بر دقیقه (به صورت نرمالیزه شده) را نشان دهند عبور می‌کنند. سوخت نیز از روتامتر خاص خود که قادر است تا ۱۰۰ لیتر بر دقیقه را نشان دهد، عبور می‌کند. مشعل دوپیشگی استفاده شده، توسط مهندسين و پژوهشگرهای آزمایشگاه سیستم‌های انرژی و حرارتی دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ساخته و استفاده شده است. این مشعل دارای ۵ ورودی از هر طرف آن است که مطابق شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمای ایزومتریک مشعل در محیط مدل‌سازی

Figure 2 – Isometric view of the burner in the modeling environment

مشخصات سوخت استفاده شده، گاز شهری است که ترکیب اجزای آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- اجزاء سوخت گازی استفاده شده [۱۳]

Table 1 - used Gas fuel composition [13]

Chemical components	Molar fraction	Chemical formula
methane	87.8	CH_4
ethane	4.7	C_2H_6
nitrogen	4.7	N_2
propan	1.74	C_3H_8
butane	0.79	C_4H_{10}
pentane	0.23	C_5H_{12}
hexane	0.23	C_6H_{14}
Carbon dioxide	0.05	CO_2

سامانه اشتعال استفاده شده در این مشعل قابلیت ایجاد جرقه با انرژی مشخص را در بازه‌ای از زمان دارد. مشخصات عملکردی این سیستم در جدول ۲ نشان داده شده است. الکترودهای تنگستنی جرقه‌زن، قطر ۸ میلی‌متر و فاصله ۲ میلی‌متر از

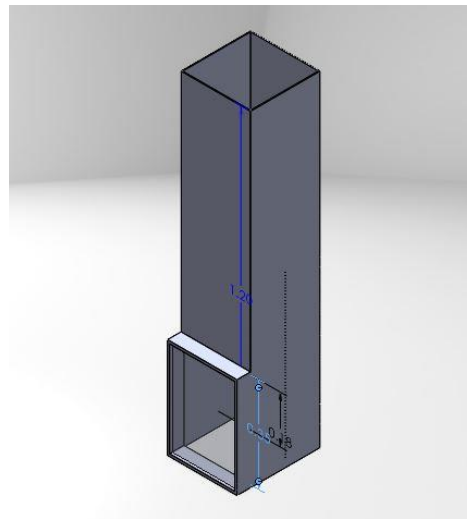
یکدیگر را دارند. حداقل انرژی لازم^۱ برای اشتعال متان ۶/۴ میلی ژول است که این سیستم جرقه زن، قابلیت تامین پیوسته آن را دارد.

جدول ۲- مشخصات سامانه اشتعال استفاده شده [۱۳]

Table 2 – Specifications of the ignition system used [13]

Breakdown voltage	Maximum current	Ignition energy	Electrod material
8 kV	1000 mA	600 mJ	tungsten

محفظه احتراق استفاده شده در این مقاله از جنس ورق آهنی نورد سرد با ضخامت ۵ میلی متر است که ابعاد سطح مقطع ۳۰*۳۰ سانتی متر است و ارتفاع آن ۱۲۰ سانتی متر است. شماتیکی از آن در تصویر ۳ نشان داده شده است. توجه شود یکای ابعاد تصویر به متر است.



شکل ۳- نمای ایزومتریک محفظه احتراق در محیط مدل سازی

Figure 3 – Isometric view of the combustion chamber in the modeling environment

به منظور محاسبه دبی واقعی هوا و سوخت در شرایط کاری، نیاز است تا دبی روتامترها مطابق رابطه ۱ اصلاح شود.

$$Q_{\text{actual}} = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}} \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \sqrt{\frac{MW_1}{MW_2}} Q_{\text{rotameter}} \quad (1)$$

که در عبارت فوق منظور از زیروند ۱، حالت شرایط کالیبره شده روتامتر است که برای هوا در فشار ۱ اتمسفر و دمای ۲۵ درجه سانتی گراد بوده است و برای سوخت در فشار ۱ کیلو پاسکال و دمای ۲۰ درجه سانتی گراد بوده است. شرایط کاری مشعل از آنجایی که ارتفاع فشاری از سطح دریا در محل آزمون ۱۱۳۰ متر بوده است و بالتبع فشار آن برابر ۸۹ کیلو پاسکال و دمای آن در روزهای شهریور، ۳۰ و در روزهای آذر، ۱۵ درجه سانتیگراد در آزمون ها درج شده است اما در روابط دما ۲۰ درجه سانتی گراد درج شده است. بنابراین ضریب کالیبراسیون برای هوا و سوخت به ترتیب مطابق رابطه ۲ و ۳ اصلاح خواهد شد.

$$Q_{\text{actual,air}} = \sqrt{\frac{89}{101}} \sqrt{\frac{25 + 273}{20 + 273}} Q_{\text{rotameter,air}} = 0.97 Q_{\text{rotameter,air}} \quad (2)$$

¹ Minimum ignition energy

$$Q_{\text{actual fuel}} = \sqrt{\frac{1}{89} \frac{20 + 273}{20 + 273}} Q_{\text{rotameter air}} = 0.1 Q_{\text{rotameter air}} \quad (3)$$

مطابق تعریف عدد پیچش که در رابطه ۴ نشان داده شده است، عدد پیچش نسبت شار محوری تکانه پیچشی به شار محوری تکانه محوری است این بیان طبق رابطه ۴ در مرجع [۱] است.

$$S = \frac{G_{\theta}}{G_x R} \quad (4)$$

با در نظر نگرفتن جملات اغتشاشی و فشاری رابطه عدد پیچش و از همه مهم‌تر فرض جریان پلاگ با پیچش جسم صلب رابطه (۴) به شکل رابطه (۵) تبدیل می‌شود. این رابطه برای عدد پیچش جریان داخلی است و مشابه آن برای پیچش خارجی قابل استخراج است. عدد ۸ در رابطه ۵، تعداد سوراخ‌های پیچشگر داخلی است.

$$sw_{in} = \sum_1^8 \frac{(uWA)}{(u^2A)} = \frac{8uWA_{tg}}{1u^2A_{ax}} \quad (5)$$

به منظور محاسبه نسبت هم ارزی نسبت سوخت به هوا برای احتراق متان، دبی جرمی متان - هوا تقسیم بر مقدار استوکیومتریکی آن شده و در نهایت در ضریب کالیبراسیون (۰/۱) ضرب می‌شود. این عبارت در رابطه (۶) دیده می‌شود.

$$\varphi = \frac{0.1Q_F \frac{0.68}{60000}}{(Q_{ax in} + Q_{ax out} + Q_{tan in} + Q_{tan out}) \frac{1.03}{60000}} \quad (6)$$

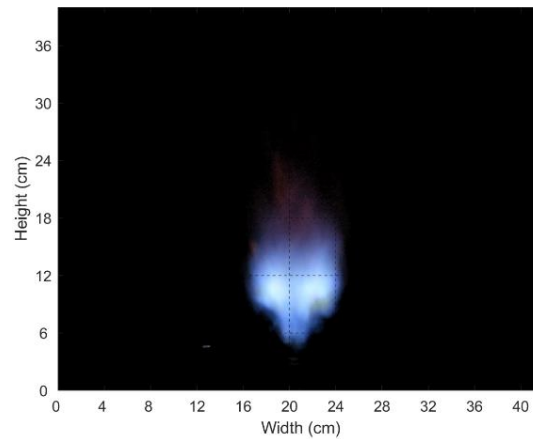
به منظور بررسی اثر تغییرات دبی‌های مختلف روی شعله از تصویربرداری مستقیم به وسیله دوربین canon G16 Power shot با سرعت شاتر ۱/۳۵۰ ثانیه (معادل هر عکس در زمان نوردهی یک سیصدوپنجاهم ثانیه) تصویربرداری شده است. در برخی رژیم‌های شعله، به دلیل نوسانات شعله، دوربین شعله را ناموزون تصویربرداری می‌کند و سرعت شاترهای پایین قسمت‌های مهم شعله را به‌درستی پوشش نمی‌دهد در نتیجه اولاً شاتر تایم مناسب هر شعله به‌صورت سعی و خطا تنظیم شده است سپس از تصویرهای گرفته شده میانگین‌گیری شده است. همان‌طور که در رابطه ۷ نشان داده شده است، اگر N تعداد کل تصاویر، k شماره هر عکس و مختصات X و Y شدت روشنایی هر پیکسل باشد، میانگین تصاویر \bar{I} بدست خواهد آمد. این میانگین‌گیری به وسیله کد پردازش تصویر، انجام شده است. نمونه ای از چند فریم در شکل ۴ و تصویر نهایی میانگین‌گیری شده در شکل ۵ نشان داده شده است. به منظور جلوگیری از ایجاد نویز ناشی از توزیع نامناسب نور در سنسورهای دوربین، از پس‌زمینه سیاه در پشت شعله استفاده شده و روشنایی محیط کمینه حفظ شده است.

$$\bar{I}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k(x, y) \quad (7)$$



شکل ۴- عکس‌های میانگین‌گیری شده از شعله توسط دوربین در سرعت شاتر ۱/۳۵۰ ثانیه

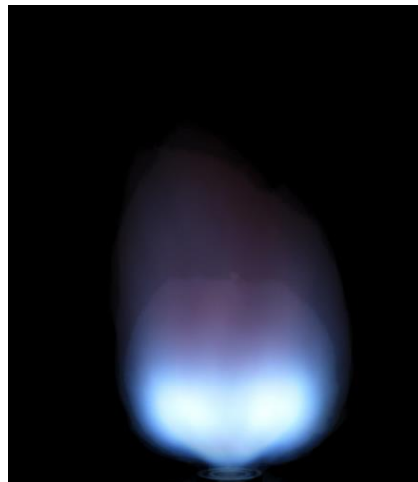
Figure 4 – Time-averaged flame images captured by the camera at a shutter speed of 1/350 s



شکل ۵- عکس میانگین‌گیری شده از تصاویر شکل ۴

Figure 5 – Averaged image obtained from the images shown in Figure 4

چون شعله ذاتاً پدیده‌ای گذرا و ناپایا است، برداشت بصری مشاهده‌گر انسانی، لزوماً با داده‌ای که دوربین بر اساس پاسخ زمانی، حساسیت طیفی و سازوکار ثبت خود از پدیده ثبت می‌کند، هم‌ارز و یکسان نیست. در تصاویر قسمت‌هایی وجود دارد که به دلیل شاتر بالا (نوردهی کم) حرکت فریز می‌شود^۱ و مرز مشخصی از شعله در تصویر دیده می‌شود. این امر در شکل ۶ نشان داده شده است و مرزهای ذکر شده به خوبی رویت می‌شود. با توجه به مرزهای ایجاد شده در تصاویر برای محاسبه دقیق طول، عرض و مساحت شعله، فاصله متوسط بین مرزها به عنوان معیاری جهت تعیین طول، عرض یا مساحت مورد استفاده قرار گرفته است.

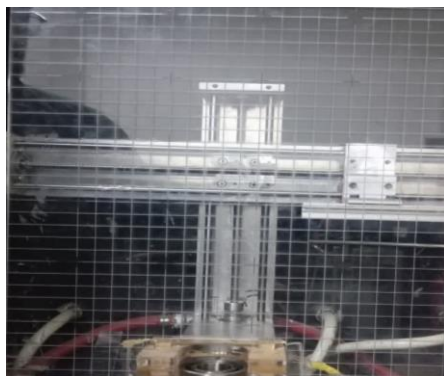


شکل ۶- حرکت فریز شده از شعله که به وسیله دوربین گرفته شده است

Figure 6 – Frozen flame motion captured by the camera

برای محاسبه اندازه شعله، تصاویر گرفته شده ابتدا با استفاده از قاب شکل ۷ کالیبره شده است. به این صورت که پس از قراردادن قاب شبکه‌بندی شده و ثابت کردن دوربین در فاصله مشخص، طول و عرض هر فریم عکس مشخص خواهد بود و با توجه به آن، مانند شکل ۵، اندازه شعله مشخص خواهد شد.

^۱ Motion freeze



شکل ۷- تنظیم مقیاس تصاویر با استفاده از صفحه شبکه‌بندی شده

Figure 7 – Image scale calibration using a grid plate

ترموکوپل استفاده شده در انجام آزمایش‌ها از نوع K بوده و از کلاس ۲ است که حداکثر خطای آن ۰/۷۵٪ است. عناصر استفاده شده در این ترموکوپل ۱۰٪ کروم و پایه منفی شامل ۹۵٪ نیکل، ۲٪ آلومینیوم، ۲٪ منگنز و ۱٪ سیلیکون است. این‌ها رایج‌ترین ترموکوپل‌های عمومی هستند که حساسیتی در حدود ۴۱ میکروولت بر درجه سانتی‌گراد دارند و قابلیت اندازه‌گیری دما تا ۱۲۵۰ کلوین را دارند. به‌منظور کالیبراسیون ترموکوپل، انحراف دمای اندازه‌گیری‌شده در مخلوط آب مقطر- یخ و آب مقطر در حال جوش انجام شد. این انحراف بسیار ناچیز بود و کالیبراسیون ترموکوپل انجام شد. البته در دماهای بالا، ترموکوپل، تابش حرارتی (از طریق تشعشع) خواهد داشت که این باعث می‌شود دمای واقعی آن نقطه از شعله، درست نشان داده نشود. روش‌های مختلفی برای این کار اعم از تصحیح با روش‌های عددی یا استفاده از روش‌های غیرتماسی است؛ اما در ترموکوپل استفاده شده از یک روکش اینکونل که یک روکش بازتابنده است استفاده شده است تا این تابش حرارتی به حداقل ممکن برسد. ترموکوپل به یک سیستم الکترونیکی داده بردار (ADVANTECH USB – 4718) با تعداد ۸ کانال کوپل می‌شود تا داده‌ها در هر لحظه با ترموکوپل قرائت شوند. در جدول ۳ آزمون‌های انجام شده به صورت خلاصه نشان داده شده است.

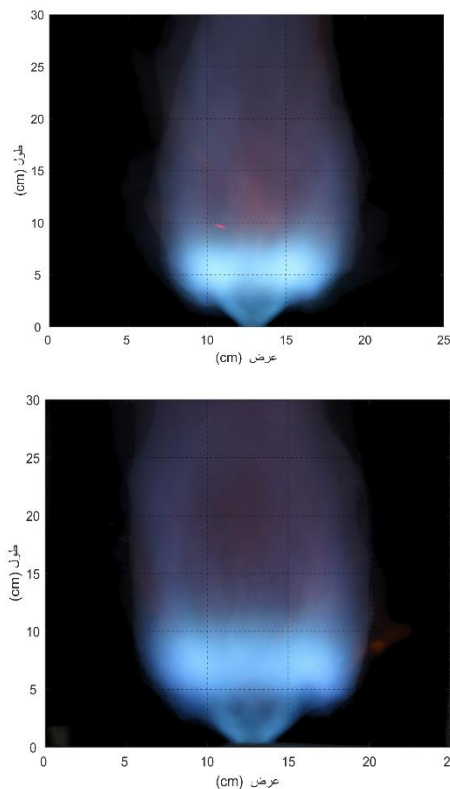
جدول ۳- آزمون‌های انجام شده جهت بررسی رژیم و شاخصه‌های عملکردی شعله

Table 3 – Tests conducted to investigate the flame regime and combustion performance characteristics

Variable(s)	Test goals	Test number
φ و SR	lean blow out zone test	1
φ و SR	Flame stability zone test	2
SW_{out} و SW_{in}	Flame morphology in different split ratios	3
SW_{in} و $Q_{tan out}$	Flame lift-off based on swirl number	4
$Q_{tan out}$ و $SW_{in} \cdot SW_{out}$	Flame height based in swirl number	5
$Q_{tan out}$ و $SW_{in} \cdot SW_{out}$	Flame Area based in swirl number	6
$Q_{tan out}$ و $SW_{in} \cdot SW_{out}$	Flame length based in swirl number	7
$Q_{tan out}$ و $SW_{in} \cdot SW_{out}$	Flame width based in swirl number	8

شکل ۸ توزیع تصویری شعله را در دو حالت با محفظه و بدون محفظه، تحت شرایط دبی جریان پیشگی خارجی برابر با ۱۰۰، عدد پیشگی داخلی ۱/۳ و عدد پیشگی خارجی ۱ نشان می‌دهد. بارزترین اثر حضور محفظه، افزایش ضخامت ناحیه شعله است.

این پدیده را می‌توان به تشدید واکنش‌های زنجیره‌ای احتراق و همچنین بازگشت و بازخورد رادیکال‌های فعال از دیواره‌های محفظه به ناحیه واکنش نسبت داد که منجر به تقویت فرآیندهای شیمیایی در جبهه شعله می‌شود. علاوه بر این، مقایسه دو حالت نشان می‌دهد که حضور محفظه موجب افزایش زاویه بازشدگی شعله شده است که بیانگر گسترش بیشتر ناحیه واکنش در راستای شعاعی است. با این حال، ارتفاع بلندشدگی شعله در هر دو حالت بدون تغییر باقی مانده و مقدار آن صفر گزارش شده است. همچنین، پایداری شعله در هر دو پیکربندی به وضوح قابل مشاهده بوده و هیچ‌گونه نوسان ناپایدار یا تمایل به خاموشی در شرایط آزمایش حاضر مشاهده نمی‌شود.



شکل ۸- مقایسه کلی شکل شعله در دو حالت بامحفظه و بدون محفظه در دبی پیچشی خارجی ۱۰۰ لیتربردقیقه و عدد پیچش داخلی و خارجی به ترتیب ۱/۳ و ۱. تصویر بالا در حالت بدون محفظه و تصویر پایین در حالت بامحفظه

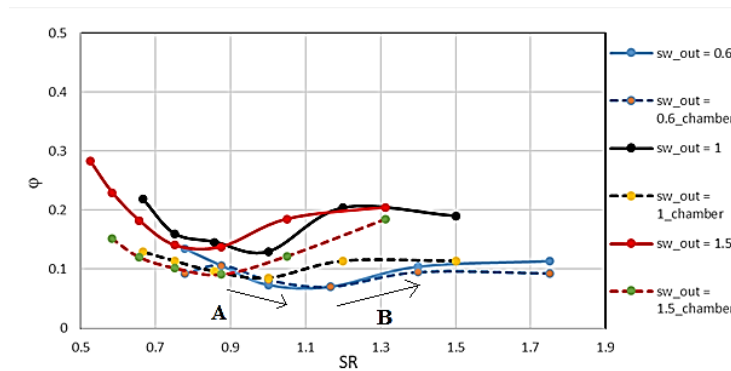
Figure 8 – Overall comparison of the flame structure in the double swirl burner for with chamber and without chamber conditions at an outer swirl air flow rate of 100 L/min, with inner swirl number = 1.3 and outer swirl number = 1. The upper image corresponds to the without chamber condition and the lower image corresponds to the with chamber condition.

نتایج و بحث

آزمون‌های متعددی بر روی مشعل دوپیچشی انجام شد و نتایج حاصل به صورت نظام‌مند و بر اساس منطق فیزیکی پدیده تحلیل و مرتب‌سازی شد. به منظور بررسی جامع محدوده احتراق رقیق در مشعل دوپیچشی، مجموعه‌ای از متغیرهای کنترلی شامل پنج پارامتر مستقل در نظر گرفته شد که عبارت‌اند از: دبی حجمی جریان محوری داخلی، دبی حجمی جریان پیچشی داخلی، دبی حجمی جریان محوری خارجی، دبی حجمی جریان پیچشی خارجی و دبی سوخت. از آنجا که تعیین نسبت سوخت به هوای رقیق در یک نقطه کاری مشخص مستلزم تعداد بسیار زیادی آزمون تجربی است، کلیه پارامترهای مذکور به صورت اعداد بی‌بعد بازتعریف شدند تا دامنه آزمون‌ها کاهش یافته و امکان مقایسه منسجم نتایج فراهم شود.

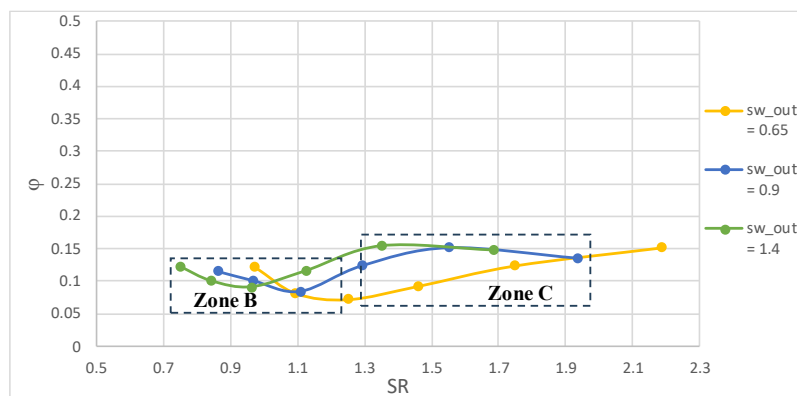
در راستای استخراج و نمایش محدوده احتراق رقیق، و به منظور ارائه دسته‌بندی قابل فهم از داده‌های آزمایشگاهی، نتایج برحسب چهار پارامتر کلیدی شامل عدد پیچش داخلی، عدد پیچش خارجی، نسبت تقسیم جریان (SR) و نسبت هم‌ارزی ارائه شده‌اند. تمامی نمودارها در سه سطح کلی دبی جریان پیچشی خارجی برابر با ۸۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ لیتر بر دقیقه تنظیم شده‌اند. لازم به ذکر است که عدد پیچش و نسبت هم‌ارزی از پارامترهای بنیادین و شناخته شده در ادبیات احتراق و جریان‌های پیچشی محسوب می‌شوند. در مقابل، نسبت تقسیم جریان به صورت نسبت مجموع دبی جریان عبوری از مجرای خارجی (شامل مؤلفه‌های محوری و پیچشی) به مجموع دبی جریان عبوری از مجرای داخلی (شامل مؤلفه‌های محوری و پیچشی) تعریف می‌شود و نقش مهمی در توزیع میدان جریان و پایداری شعله ایفا می‌کند.

نحوه انجام آزمون‌های محدوده احتراق رقیق به این صورت انجام شده است که ابتدا با تنظیم کردن دبی‌های هوا طوری که نسبت تقسیم جریان تنظیم شود، سوخت تا بیشترین مقدار خود برای مشتعل شدن شعله باز شده است و سپس با استفاده از یک جرعه زن یا تورچ، مخلوط محترق شده است. در گام بعد با کاهش دبی سوخت تا حدی که شعله خاموش شود، جریان سوخت کاهش یافته و مقداری که قرائت شده به عنوان نسبت هم‌ارزی رقیق گزارش شده است. این آزمایش‌ها با سه تکرار انجام شده است و مقدار متوسط به عنوان نسبت هم‌ارزی رقیق در جدول درج شده است.



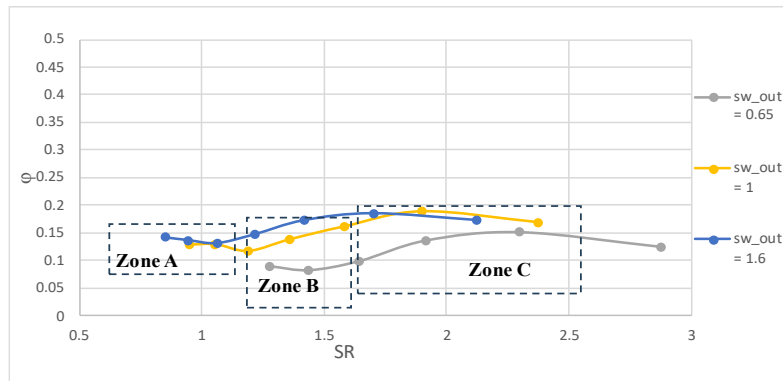
شکل ۹- تغییرات نسبت هم‌ارزی بر حسب نسبت تقسیم در عدد پیچش‌های خارجی مختلف برای دبی پیچشی خارجی ۸۰ لیتر بر دقیقه در حالت با و بدون محفظه

Figure 9 – Variation of the equivalence ratio as a function of the split ratio for different outer swirl numbers at an outer swirl air flow rate of 80 L/min, for with chamber and without chamber conditions



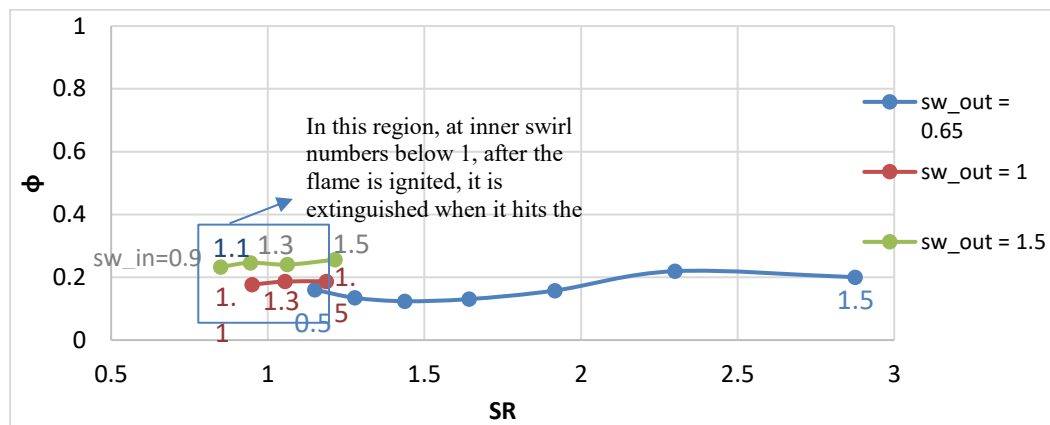
شکل ۱۰- تغییرات نسبت هم‌ارزی بر حسب نسبت تقسیم در عدد پیچش‌های خارجی مختلف برای دبی پیچشی خارجی ۱۰۰ لیتر بر دقیقه در حالت با و بدون محفظه

Figure 10 – Variation of the equivalence ratio as a function of the split ratio for different outer swirl numbers at an outer swirl air flow rate of 100 L/min, for with chamber and without chamber conditions



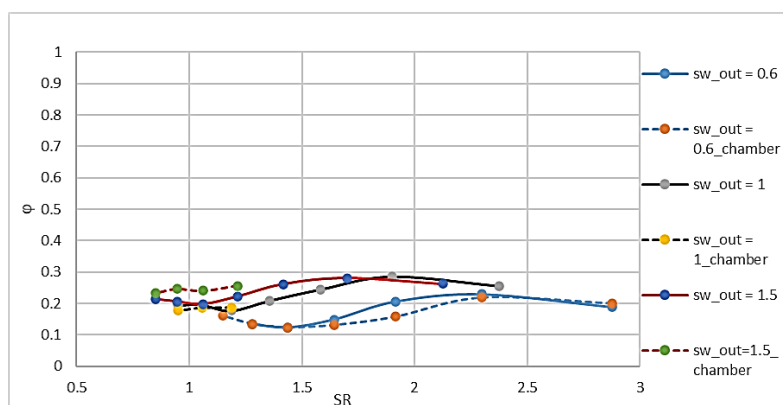
شکل ۱۱- تغییرات نسبت هم ارزی بر حسب نسبت تقسیم در عدد پیچش‌های خارجی مختلف برای دبی پیچشی خارجی ۱۳۰ لیتربردقیقه در حالت بدون محفظه

Figure 11 – Variation of the equivalence ratio as a function of the split ratio for different outer swirl numbers at an outer swirl air flow rate of 130 L/min in the without chamber condition



شکل ۱۲- تغییرات نسبت هم ارزی بر حسب نسبت تقسیم در عدد پیچش‌های خارجی مختلف برای دبی پیچشی خارجی ۱۳۰ لیتربردقیقه در حالت با محفظه

Figure 12 – Variation of the equivalence ratio as a function of the split ratio for different outer swirl numbers at an outer swirl air flow rate of 130 L/min in the with chamber condition



شکل ۱۳- تغییرات نسبت هم ارزی بر حسب نسبت تقسیم در عدد پیچش‌های خارجی مختلف برای دبی پیچشی خارجی ۱۳۰ لیتربردقیقه در حالت با و بدون محفظه

Figure 13 – Variation of the equivalence ratio as a function of the split ratio for different outer swirl numbers at an outer swirl air flow rate of 130 L/min for with chamber and without chamber conditions

اولین نتیجه‌ای که از شکل‌های ۹ تا ۱۳ قابل استنتاج است این است که با افزایش عدد پیچش خارجی، محدوده نسبت هم‌ارزی رقیق گسترده‌تر شده است یعنی نسبت هم‌ارزی رقیق بین گستره وسیع‌تری تغییر می‌کند این نتیجه‌ای است که از روی ظاهر شکل‌ها استنتاج می‌شود. این اثر احتمالاً به این دلیل است که عدد پیچش خارجی روی تنظیم اندازه ناحیه گردشی داخلی تأثیر چشمگیری دارد. یکی از نتایجی که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به خوبی تفکیک شده است، الگوی خطوط نسبت هم‌ارزی رقیق به صورت U و S است؛ یعنی تا مقدار مشخصی اثر عدد پیچش داخلی مساعد است (در جهت گسترش محدوده احتراق رقیق یا محدوده خاموشی رقیق مانند محدوده B در شکل پایین ۹) و از مقداری بیشتر اثر نامساعد روی آن دارد (در جهت کاهش محدوده خاموشی رقیق مانند محدوده C در شکل ۹). برای الگوهای S این فرایند دوبار تکرار می‌شود، یعنی با افزایش عدد پیچش داخلی در عدد پیچش خارجی مشخص ابتدا اثر نامساعد (محدوده A در شکل ۱۱) سپس اثر مساعد (محدوده B) و مجدداً اثر نامساعد (محدوده C) دارد و این رفتار هم در حالت با محفظه و هم بدون محفظه تکرار شده است و این نوع رفتار با این نوع خاص محفظه (مستطیلی با نسبت محصورسازی برابر ۱۰)، تغییری نکرده است. اثر کلی محفظه به راحتی قابل استنباط نیست چرا که منوط به برهم‌کنش‌های آیرودینامیکی خاص، با افزودن محفظه به مشعل است. با نگاهی متفاوت به شکل‌ها مشاهده می‌شود که در حالت کلی افزودن محفظه احتراق باعث کمتر شدن نسبت هم‌ارزی رقیق شده است این می‌تواند به دلیل برگشت جریان‌های داغ ناشی از دیواره به جبهه شعله باشد که خود باعث به سوزی رادیکال‌ها (که اغلب این رادیکال‌ها چون OH و CH و سایر هستند) توسعه نیافته است. به بیانی دیگر با افزودن محفظه محصولات داغ احتراق باعث برگشت گازهای داغ به مرکز شعله می‌شود و همین امر باعث بهبود شرایط خاموشی رقیق می‌شود. این اثر در مرجع [۲] نیز تأیید شده است.

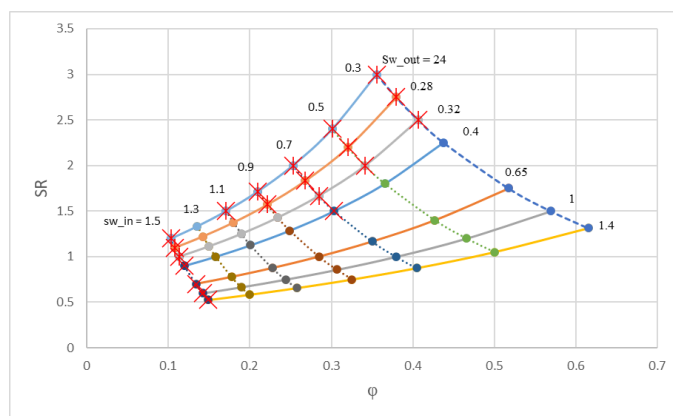
با افزایش عدد پیچش داخلی در تمام حالت‌ها یعنی با محفظه و بدون محفظه ابتدا نسبت هم‌ارزی رقیق کاهش یافته (بهبود شرایط) سپس از حدی به بعد باعث افزایش آن (نامساعد شدن شرایط) می‌شود این می‌تواند به دلیل هیدرودینامیک پیچیده مشعل دوپیچشی باشد یعنی پس از مقدار مشخصی افزایش عدد پیچش داخلی، سوخت خارج شده درون ناحیه گردشی قرار نخواهد گرفت به بیان دیگر عدد دامکوهلر کاهش می‌یابد (نسبت سرعت واکنش‌های شیمیایی نسبت به اختلاط جریان کاهش می‌یابد. هم‌زمان افزایش عدد کارلویتز را به همراه دارد)

اثر عدد پیچشی خارجی بر روی تغییر نسبت هم‌ارزی رقیق بیشتر از عدد پیچشی داخلی است؛ یعنی کنترل بیشتری بر روی ناحیه گردشی داخلی دارد این می‌تواند به این علت باشد؛ چون سرعت خروجی در جریان خارجی بیشتر است باعث می‌شود اختلاف فشار بیشتری با محیط ایجاد کند که خود باعث کشیده‌تر شدن و به سمت نازل آوردن ناحیه گردشی مرکزی و ناحیه گردشی داخلی می‌شود و تأثیر چشمگیرتری روی پایداری و محدوده رقیق دارد

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد یک مشعل، منحنی پایداری شعله آن است. در این مطالعه، منحنی‌های پایداری مشعل دوپیچشی در دو پیکربندی «با محفظه» و «بدون محفظه» استخراج و مقایسه شده‌اند. بدین منظور، تعداد قابل توجهی آزمون تجربی با تنظیم دبی‌های سوخت و هوا در گستره‌ای از نسبت‌های تقسیم جریان و نسبت‌های هم‌ارزی انجام شد تا رفتار شعله در شرایط کاری مختلف به‌طور نظام‌مند بررسی شود. در هر آزمون، شعله‌ای که بیش از یک بازه زمانی مشخص روشن و پایدار باقی می‌ماند، به‌عنوان «نقطه روشن» تلقی شد، در حالی که سایر نقاط که در نمودارها با علامت ضربدر قرمز مشخص شده‌اند، به‌عنوان «نقطه خاموش» در نظر گرفته شدند. همچنین در پیکربندی دارای محفظه، نواحی مشخص شده در کادر خط چین قرمز بیانگر شرایطی هستند که شعله در کل حجم محفظه گسترش یافته و در نتیجه، ساختار مشخصی به‌عنوان «شعله مؤثر» قابل تعریف نیست. به‌منظور تفکیک و تبیین دقیق اثر پارامترهای هیدرودینامیکی، هر نمودار به‌صورت جداگانه بر حسب

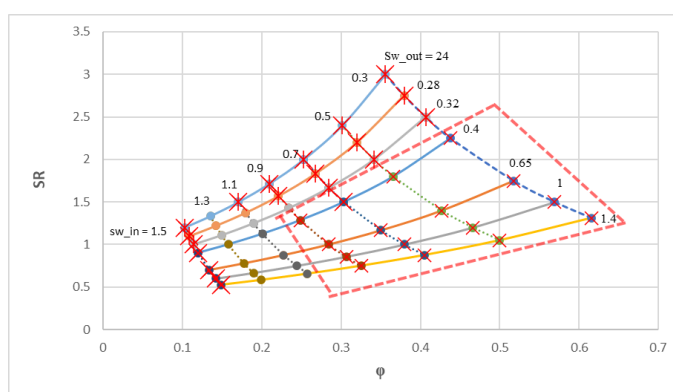
مقادیر ثابت عدد پیچش داخلی و عدد پیچش خارجی ارائه شده است. افزون بر این، هر شکل متناظر با یک مقدار مشخص از دبی جریان پیچشی خارجی تنظیم شده است. این انتخاب از آن جهت صورت گرفته که با توجه به تعداد بیشتر متغیرهای کنترلی نسبت به روابط مستقل، لازم است یکی از متغیرها—در اینجا دبی پیچش خارجی—ثابت فرض شود تا تحلیل نتایج امکان پذیر گردد. در نهایت، به منظور افزایش خوانایی بصری و با توجه به تفاوت ماهوی نمودارهای پایداری نسبت به نمودارهای محدوده احتراق رقیق، نسبت تقسیم جریان به عنوان محور عمودی و نسبت هم‌ارزی به عنوان محور افقی در نظر گرفته شده است. علت استفاده از پارامتر «نسبت تقسیم جریان» به جای دبی کل هوا آن است که در پیکربندی مشعل دو پیچشی، دبی هوای ورودی به صورت یکنواخت و یکپارچه وارد سامانه نمی‌شود، بلکه شامل چهار مؤلفه مستقل با نقش‌های هیدرودینامیکی و احتراقی متفاوت است: جریان محوری داخلی، جریان پیچشی داخلی، جریان محوری خارجی و جریان پیچشی خارجی. از این رو، نمایش پایداری شعله صرفاً بر حسب دبی کل هوا، بدون تفکیک سهم هر مسیر جریان، قادر به بازنمایی صحیح اثر توزیع جریان بر میدان سرعت، ساختار نواحی گردشی و در نهایت پایداری شعله نخواهد بود. به کارگیری نسبت تقسیم جریان این امکان را فراهم می‌کند که توزیع نسبی هوا بین مجاری داخلی و خارجی—که یکی از عوامل کلیدی در شکل‌گیری ناحیه گردشی داخلی و خارجی و زمان ماند مواد واکنش‌دهنده است—به صورت فشرده، بی‌بعد و فیزیکی توصیف شود. در مقابل، استفاده مستقیم از دبی‌های هوا مستلزم ارائه تعداد بسیار بیشتری نمودار برای پوشش تمامی ترکیب‌های ممکن دبی‌های چهارگانه بود که نه تنها حجم نتایج را به طور قابل توجهی افزایش می‌داد، بلکه به دلیل تفاوت ماهیت اثرگذاری هر مؤلفه جریان، موجب دشوار شدن مقایسه نظام‌مند نتایج و استخراج روندهای فیزیکی غالب می‌شد. بنابراین، انتخاب نسبت تقسیم جریان به عنوان محور تحلیلی، با هدف کاهش پیچیدگی پارامتری، افزایش خوانایی نتایج و فراهم‌سازی بستری منسجم برای تحلیل اثر توزیع جریان هوا بر پایداری شعله انجام شده است، در حالی که دبی‌های مطلق هوا در سطوح ثابت (از طریق تثبیت دبی پیچشی خارجی) کنترل شده‌اند تا تفسیر نتایج همچنان از نظر فیزیکی معنادار باقی بماند.

نمودارهای پایداری (شکل‌های ۱۴ تا ۱۹) تغییرات نسبت تقسیم را بر حسب نسبت هم‌ارزی نشان می‌دهد. هم‌زمان این امکان فراهم است تا اثر عدد پیچش داخلی و خارجی را با پارامترهای دیگر در این شکل‌ها بررسی کرد. همان‌طور که نمودارهای پایداری مشخص است، با افزایش نسبت هم‌ارزی و افزایش عدد پیچش خارجی، مشعل (بدون محفظه) پایدارتر است. (سمت راست و پایین نمودارهای پایداری)؛ علت این امر می‌تواند به دلیل ساختاری باشد که پیچش خارجی ناحیه واکنش را احاطه می‌کند از طرف مقابل مشهود است که بیشترین ناپایداری در حالتی رخ می‌دهد که هر دو عدد پیچش کاهش یافته‌اند (در جهت سمت راست بالا نمودارهای پایداری)؛ علت این امر را می‌توان این‌گونه استنباط کرد سوخت و هوا در دو مسیر مستقیم با حداقل سطح تماس بین خود، تمایلی به واکنش با یکدیگر ندارند و به بیان دیگر زمان ماند سوخت برای واکنش به شدت پایین است. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ که نمودارهای پایداری برای دبی پیچشی خارجی ۸۰ استخراج شده است، بر خلاف سایر نمودارهای پایداری تعداد نقاطی که به عنوان شعله موثر شناخته می‌شوند بیشتر بوده است یعنی شعله قابلیت اشتعال بیشتری داشته است. این می‌تواند ناشی از بهبود اختلاط و سرعت شعاعی کمتر نسبت به سایر نمودارهای پایداری باشد.



شکل ۱۴- نمودار پایداری مشعل دو پیچشی در دبی پیچشی خارجی ۸۰ لیتر بر دقیقه در حالت بدون محفظه

Figure 14 – Stability diagram of the double swirl burner at an outer swirl air flow rate of 80 L/min in the without chamber condition



شکل ۱۵- نمودار پایداری مشعل دو پیچشی در دبی پیچشی خارجی ۸۰ لیتر بر دقیقه در حالت با محفظه

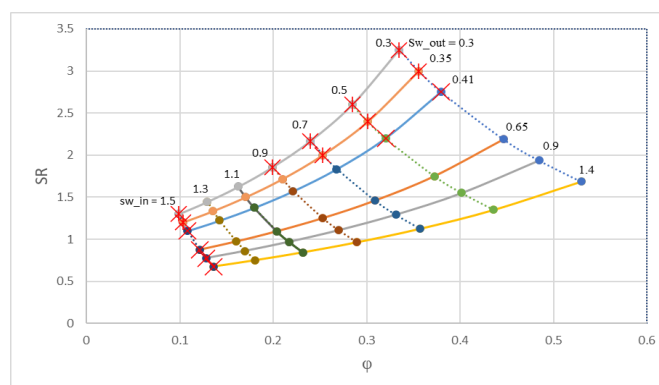
Figure 15 – Stability diagram of the double swirl burner at an outer swirl air flow rate of 80 L/min in the with chamber condition

همانطور که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ دیده می‌شود در حالت بدون محفظه پایداری مشعل برای عدد پیچش خارجی‌های بیشتر از ۰/۳۲ پایداری شعله برای تمام نقاط تضمین شده است این در حالی است که با افزایش عدد پیچش داخلی تا مقادیر ۱/۳ هنوز برخی نقاط ناپایدار باقی مانده است. این موضوع نشان می‌دهد که اثر پیچش خارجی به طور شدید و ناگهانی و اثر پیچش داخلی آرام و پیوسته است به بیانی دیگر پیچش داخلی هیدرودینامیک جریان را در مقیاس‌های کوچک و ظریف نشان می‌دهد ولی پیچش خارجی بیشتر حالت کلید قطع و وصل خاموشی شعله است و به شدت و ناگهانی پایداری را تضمین می‌کند. این یعنی پیچش خارجی بیشتر باعث ایجاد هسته گردابه پیش‌رونده^۱ و شکست گردابه را توسعه می‌دهد.

حد چپ در نمودارهای پایداری توسط نسبت هم ارزی تعیین می‌شود؛ یعنی علی‌رغم افزایش پیچش داخلی به دلیل اینکه سوخت در دسترس کاهش می‌یابد پایداری شعله اتفاق نمی‌افتد. به بیان دیگر هیدرودینامیک جریان بسیار منسجم و یکپارچه است و سوخت در محلی که باید واکنش بدهد، قرار می‌گیرد؛ اما به دلیل کمبود سوخت، گرمای کافی برای ادامه‌دادن واکنش‌های زنجیره‌ای در دسترس نیست و شعله خاموش می‌شود. اما خاموش شدن شعله البته در مواردی که دبی پیچشی مجرای خارجی افزایش یافته است (شکل ۱۸) وضعیت پایداری با افزایش عدد پیچش خارجی بهبود یافته است؛ یعنی اثر عدد پیچش خارجی

^۱ Processing vortex core

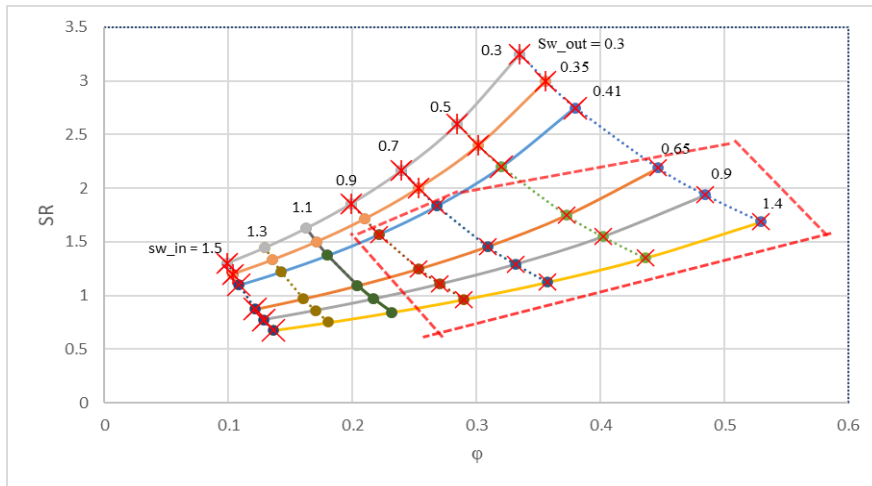
بر عدد پیچش داخلی غالب شده است (ناحیه A در تصویر ۱۸). یکی از مهم‌ترین فاکتور شکل‌ها، رفتار شعله در مرزهای شکل است. آنچه در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ مشاهده شد، این شکل‌ها با چهار مرز بالا، راست، پایین و چپ محصور شده است. شکل‌های پایداری که مطابق اشکال فوق توسعه پیدا می‌کنند، حد راست و پایین آن از جنس محدودیت عملکردی مشعل است؛ یعنی جهت تأمین دبی مورد نیاز و بالتبع عدد پیچش‌های بالاتر، کارایی مشعل محدود است؛ ولی محدودیت آن از چپ و بالا از لحاظ ساختار ضعیف و نامناسب هیدرودینامیک جریان است که موجب می‌شود شعله روشن نشود؛ یعنی به‌عنوان مثال در مرز چپ، سوخت به‌قدری ناکافی بوده که شعله روشن نشده است و در مرز بالا، عدد پیچش خارجی به حدی کم بوده که نتوانسته است جبهه شعله در ناحیه گردشی مرکزی لنگر بیندازد. اما اگر از تحلیل مشعل موقعی که می‌خواهیم آن را محصور کنیم نتایج به طرز عجیبی متفاوت خواهد بود. اثر کلی محفظه بر روی پایداری نامساعد است. در حقیقت در بیشتر نقاط آزمون گرفته شده اتفاقی که می‌افتد شعله در سرتاسر محفظه پخش می‌شود و در واقع چیزی تحت عنوان شعله مؤثر وجود ندارد (در شکل‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ قسمتی‌هایی که درون قسمت‌های خط‌چین نشان داده شده است) علت این امر می‌تواند به این دلیل باشد که چون اکسیژن از هوای آزاد نمی‌تواند برای واکنش با سوخت کشیده شود (اثر محفظه) از طرفی خود اکسیژن ورودی هم به دلیل پیچش داخلی پایین (زیر ۱) نمی‌تواند محصولات واکنش را در ناحیه برگشتی داخلی، لنگر کند، محیط یکنواخت و یکپارچه‌ای برای احتراق شکل نمی‌گیرد و شعله در سراسر محفظه پخش می‌شود. بر عکس حالتی که مشعل به‌تنهایی کار می‌کند که اثر عدد پیچش خارجی زیاد مشهود نیست؛ ولی اثر پیچش داخلی به‌شدت مشهود و مقبول است. با افزایش عدد پیچش به مقادیر بیش از ۱ (پیچش بالا) پایداری شعله در محفظه تثبیت شده است. این بدان علت است که پیچش داخلی بالای ۱ موجب به دام انداختن بهتر رادیکال‌ها و محصولات واکنش در ناحیه برگشتی داخلی و همچنین لنگرسازی محصولات واکنش است. علت دیگر این ناپایداری‌های شدید آن است که در محیط‌هایی که مشعل محصور می‌شود، به دلیل آشفستگی بالا ناشی از برخورد جریان به دیواره‌ها یک ناحیه هیدرودینامیکی پایدارکننده^۱ تشکیل نمی‌شود و در نتیجه شعله مؤثر شکل نخواهد گرفت. نکته جالب اینجاست که مجدداً برای عدد پیچش داخلی ۱/۵ شعله حتی در حالت با محفظه هم روشن نشده است اگر چه خلاف آن متصور می‌شد. در این حالت عدد دامکوهلر کم می‌شود و عدد کارلویتز زیاد می‌شود پس هم‌زمان که سرعت واکنش‌های شیمیایی نسبت به آشفستگی‌ها کاهش یافته جریان اجازه ورود گردابه‌ها ریز را به محل شعله می‌دهند و آن‌ها شعله را پخش و نابود می‌کنند.



شکل ۱۶- نمودار پایداری مشعل دو پیچشی در دبی پیچشی خارجی ۱۰۰ لیتر بر دقیقه در حالت بدون محفظه

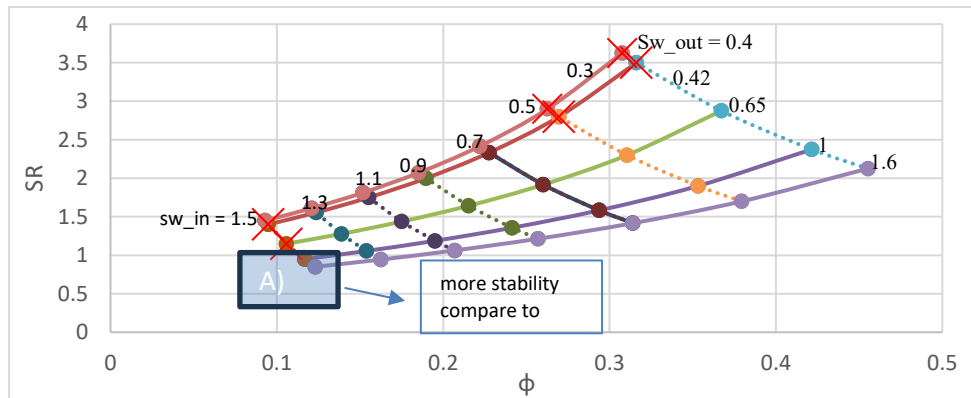
Figure 16 – Stability diagram of the double swirl burner at an outer swirl air flow rate of 100 L/min in the without chamber condition

^۱ Hydrodynamic stabilizing zone



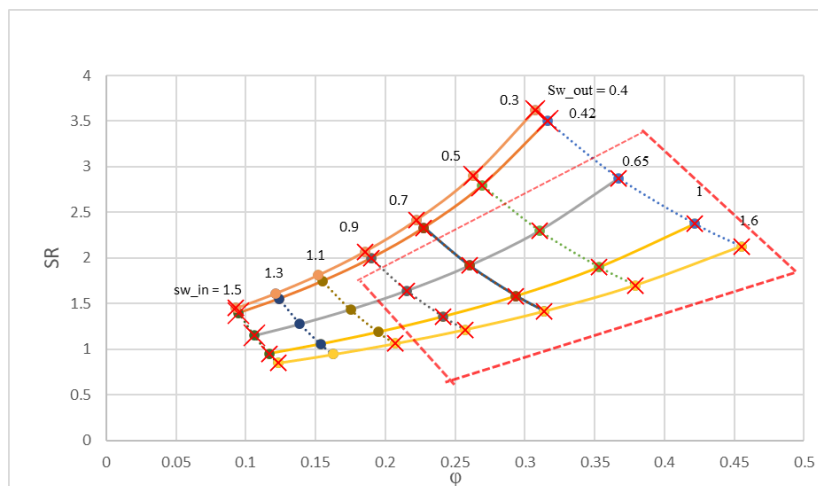
شکل ۱۷- نمودار پایداری مشعل دو پیچشی در دبی پیچشی خارجی ۱۰۰ لیتر بر دقیقه در حالت با محفظه

Figure 17 – Stability diagram of the double swirl burner at an outer swirl air flow rate of 100 L/min in the with chamber condition



شکل ۱۸- نمودار پایداری مشعل دو پیچشی در دبی پیچشی خارجی ۱۳۰ لیتر بر دقیقه در حالت بدون محفظه

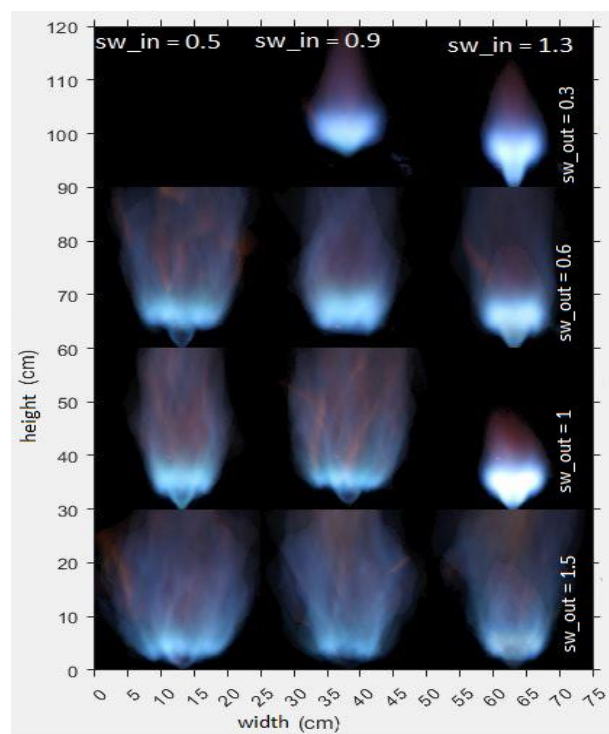
Figure 18 – Stability diagram of the double swirl burner at an outer swirl air flow rate of 130 L/min in the without chamber condition



شکل ۱۹- نمودار پایداری مشعل دو پیچشی در دبی پیچشی خارجی ۱۳۰ لیتر بر دقیقه در حالت با محفظه

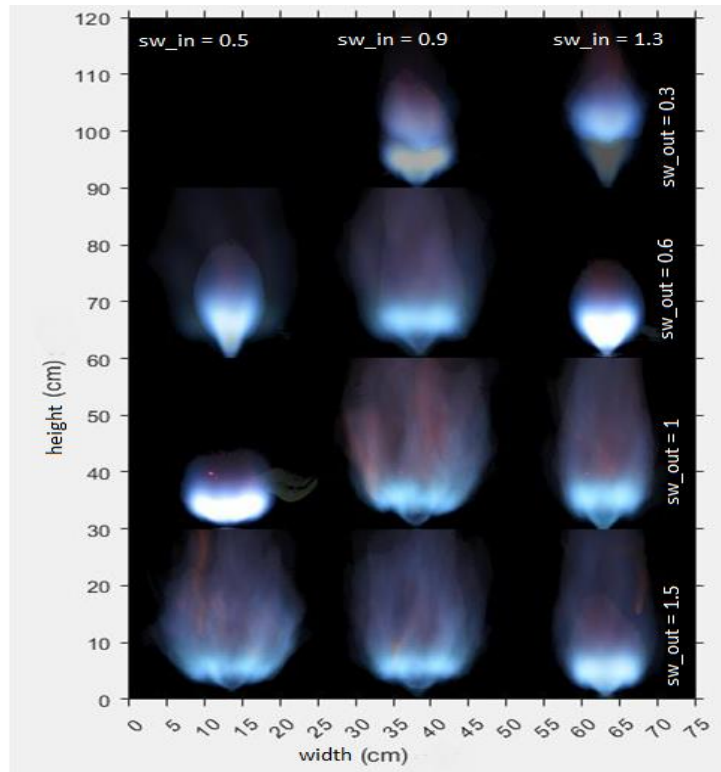
Figure 19 – Stability diagram of the double swirl burner at an outer swirl air flow rate of 130 L/min in the with chamber condition

در ادامه تصاویری از شکل شعله در اشکال ۲۰ تا ۲۴ در حالت‌های مختلف نشان داده شده است. به دلیل این که استخراج نحوه تغییرات شعله مدنظر است، برای حالت‌های مختلفی از عدد پیچش داخلی ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۹ و عدد پیچش خارجی ۰/۳، ۰/۶ و ۱/۵ در هر دبی پیچشی خارجی مشخص ۸۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ لیتر بر دقیقه از شعله تصویر گرفته شده است و اشکال مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. در حالت با محفظه به دلیل اینکه نقاط پایدار، کاهش یافته است، برای مقایسه با حالت بدون محفظه، صرفاً نقاطی که شعله روشن باقی مانده است با یکدیگر مقایسه شده است همان‌طور که از شکل شعله‌ها (اشکال ۲۰ تا ۲۴) پیداست رفتار و شکل کلی شعله‌ها به شدت وابسته به عدد پیچش است. در تمام حالت‌ها با افزایش پیچش داخلی شعله متمایل به عمودتر شدن (نسبت به پهن‌تر شدن) و همچنین چسبیدن به خروجی مشعل خواهد شد علت این امر انجام شدن واکنش‌ها در ناحیه گردشی مرکزی است که با حباب گردشی که به وجود می‌آید متمایل است تا به سمت خروجی نازل کشیده‌تر شود [۱]. در تمام حالت‌ها با افزایش عدد پیچش خارجی شعله عریض‌تر شده است؛ علت آن می‌تواند این باشد که صفحه دایروی خروجی مشعل که واکنش‌ها در آن اتفاق می‌افتد به دلیل تکانه مماسی ناشی از جریان خارجی، بزرگ‌تر خواهد شد. در حقیقت اگر سطح خروجی جریان خارجی بیشتر شود طبق رابطه دبی، سرعت‌های مماسی بیشتر خواهند شد و تا جایی که منجر به خاموشی شعله نشود (به دلیل اینکه سرعت هوا از سرعت شعله بیشتر می‌شود) منجر به عریض‌تر شدن بیش از پیش شعله خواهد بود.



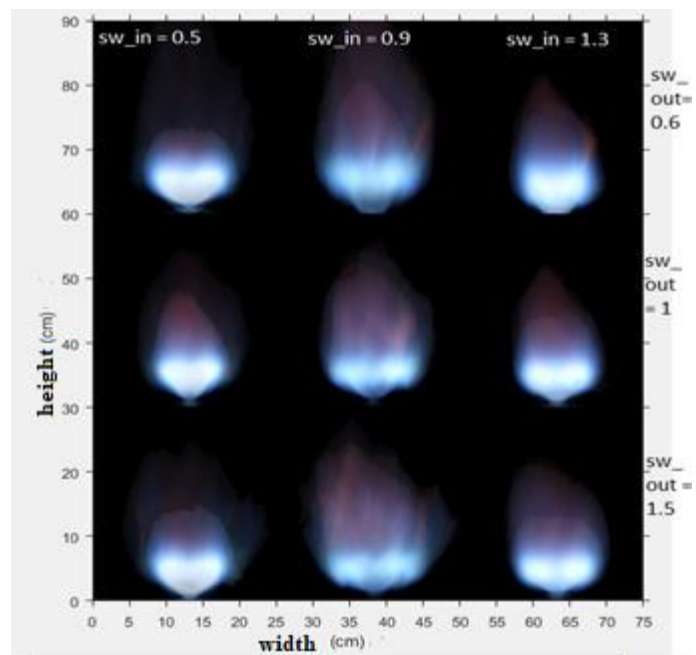
شکل ۲۰- تصاویر شعله در عدد پیچش‌های مختلف در دبی پیچشی خارجی ۸۰ لیتر بر دقیقه در حالت بدون محفظه

Figure 20 – Flame images at different swirl numbers for an outer swirl air flow rate of 80 L/min in the without chamber condition



شکل ۲۱- تصاویر شعله در عدد پیچش‌های مختلف در دبی پیچشی خارجی ۱۰۰ لیتر بر دقیقه در حالت بدون محفظه

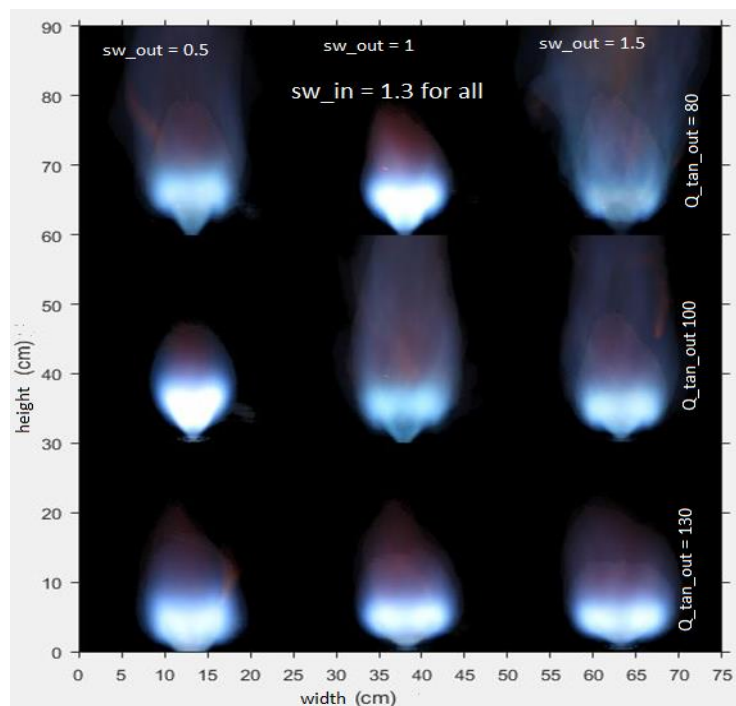
Figure 21 – Flame images at different swirl numbers for an outer swirl air flow rate of 100 L/min in the without chamber condition

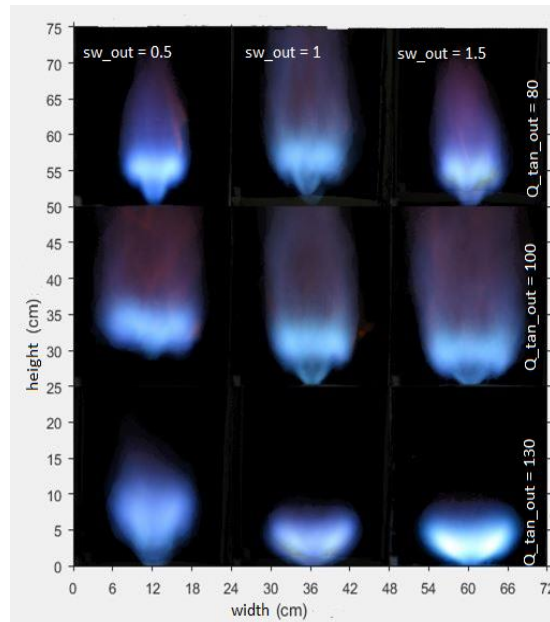


شکل ۲۲- تصاویر شعله در عدد پیچش‌های مختلف در دبی پیچشی خارجی ۱۳۰ لیتر بر دقیقه در حالت بدون محفظه

Figure 22 – Flame images at different swirl numbers for an outer swirl air flow rate of 130 L/min in the without chamber condition

با افزودن محفظه به مشعل، بسیاری از نقاط پایدار، ناپایدار می‌شوند؛ بنابراین برای داشتن مقایسه بهتر، نقاط پایدار در حالت با محفظه در شکل ۲۳ دقیقاً با همان نقاط در حالت بدون محفظه در شکل ۲۴ مقایسه شده است. با افزایش عدد پیچش داخلی در دبی‌های پیچشی بالای ۱۰۰ لیتربردقیقه زاویه بازشوندگی شعله افزایش یافته است و در برخی موارد زاویه بازشوندگی کمتر شده است؛ علت این امر این است که با افزایش سرعت‌های مماسی از خروجی نازل، ترم فشاری که در طول محور طولی تغییر می‌کند (یعنی $(\partial P/\partial x)$ ثابت باقی می‌ماند) اثر بیشتری روی جریان کم فشار مماسی خواهد داشت و در نتیجه همین امر باعث می‌شود که شعله با افزایش عدد پیچش داخلی پخش تر و پهن تر شود. این اثر در فصل اول مرجع [۱۴]، مبسوط شرح داده شده است. به طور مشابه عدد پیچش خارجی هم تأثیرات شگرفی بر رژیم شعله دارد. مانند حالت بدون محفظه، در حالت با محفظه نیز با افزایش عدد پیچش خارجی شعله متمایل به تخت شدن بیشتر است علت این امر این است که ناحیه گردشی مرکزی با افزایش تکانه مماسی پهن تر می‌شود و با کمی دقت در تصویر شعله‌ها دیده می‌شود که اثر تخت شدن شعله در دبی پیچشی خارجی ۱۳۰ لیتربردقیقه از همه حالت‌ها بیشتر نمایان است این به همان علت سرعت مماسی زیاد در این دبی است. این رفتار در مرجع [۹] هم تایید شده است. به دلیل عدد پیچش داخلی بالا، تقریباً تمام شعله‌ها به خروجی نازل چسبیده‌اند این به دلیل کشیده شدن ناحیه گردشی داخلی حباب شکل است. در حقیقت نقطه سکون جریان به دلیل گرادیان فشار منفی خط مرکزی شعله و گرادیان فشار مثبت اتمسفر، به خروجی نازل کشیده می‌شود. در مورد تغییر طول شعله در هر دو حالت با محفظه و بدون محفظه الگوی‌های سینوسی مشهود است فقط در حالت دبی پیچشی خارجی ۱۳۰، طول کلی شعله نسبت به حالت با محفظه کمتر است این می‌تواند به این علت باشد که به دلیل برخورد جریان با دیواره‌ها و بازتاب حرارتی دیواره‌ها، طول شعله محفظه زیاد می‌شود. مانند همین اثر زمانی که جریان پیچشی زیاد می‌شود، با برخورد این جریان به دیواره‌ها باعث می‌شود ناحیه گردشی داخلی حجیم تر شود و شعله در حالت با محفظه گسترده تر و عریض تر به نظر برسد.



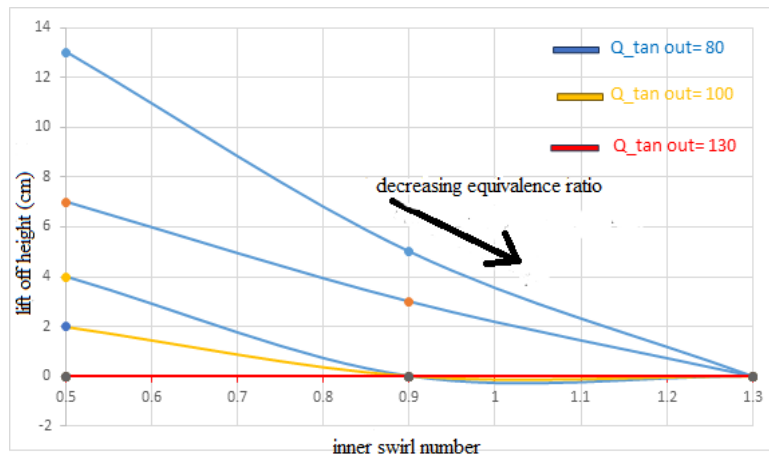


شکل ۲۴- تصاویر شعله برای حالت با محفظه در عدد پیچش داخلی ثابت ۱.۳ برای تمام شکل‌ها

Figure 24 – Flame images for the with chamber condition at a constant inner swirl number of 1.3 for all cases

نکته جالب از اثر عدد پیچش خارجی این است که با افزایش عدد پیچش خارجی طول شعله تغییر خاصی نکرده است مگر در حالتی که عدد پیچش خارجی از $0/3$ به $0/6$ تغییر کرده است در تمام آزمون‌های انجام شده پیدا کردن کمترین‌ها و بیشترین‌ها حائز اهمیت است. تقریباً کوتاه‌ترین شعله برای حالتی است که دبی پیچش خارجی بیشترین، عدد پیچش داخلی کمترین و عدد پیچش خارجی هم کمترین باشد.

با مشاهده نمودار ۲۵ تغییرات ارتفاع بلندشدگی شعله بر حسب عدد پیچش داخلی نتایج بسیار خوبی دیده می‌شود. همواره با افزایش عدد پیچش داخلی، ارتفاع بلندشدگی شعله کاهش می‌یابد، علت این امر این است که با افزایش عدد پیچش داخلی و خارجی نیروی گریز از مرکز بیشتر می‌شود و ناحیه گردشی قوی‌تر و کشیده‌تر در مرکز شعله ایجاد خواهد شد که ارتفاع بلندشدگی شعله را کم می‌کند.



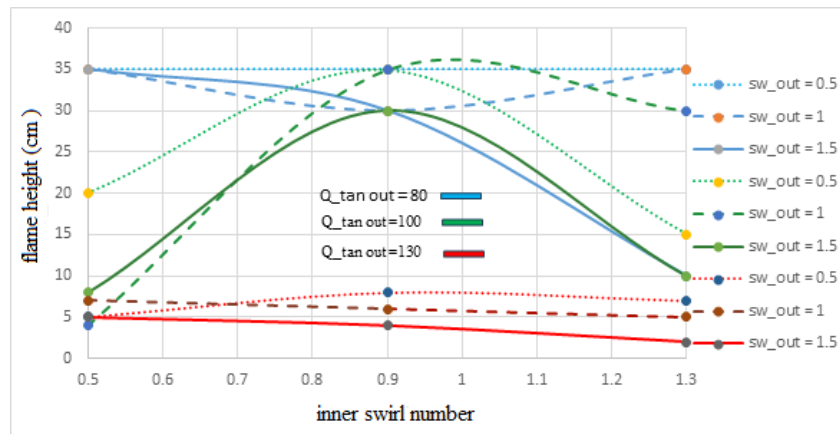
شکل ۲۵- تغییرات ارتفاع بلندشدگی شعله با عدد پیچش داخلی در دبی پیچشی خارجی مختلف در حالت با و بدون محفظه

Figure 25 – Variation of the flame lift-off height with inner swirl number at different outer swirl air flow rates for with chamber and without chamber conditions

با کاهش نسبت هم ارزی یا رقیق تر شدن سوخت ارتفاع بلندشدگی شعله کاهش یافته است؛ علت این امر این می‌تواند باشد که هر چه تکانه محوری سوخت (سوخت به صورت محوری از مجرای وسط خارج می‌شود) کمتر باشد ناحیه گردشی، محدوده اشتعال را می‌تواند به پایین تر (نزدیک خروجی مشعل / نازل) پیچش دهد که در نتیجه کاهش ارتفاع بلندشدگی شعله را در پی دارد. ضمناً این مهم قابل استنتاج است که با افزایش دبی پیچشی خارجی، همواره مستقل از عدد پیچش داخلی، جریان به خروجی مشعل / نازل چسبیده است این به دلیل قدرت پیچش جریان و ناحیه برگشتی قوی ناشی از آن است. اما در حالت با محفظه نتایج بسیار متفاوت است. در تمام نقاط آزمون که شعله پایدار است (اگرچه این نقاط محدود است) ارتفاع بلندشدگی در حالت با محفظه صفر است؛ یعنی شعله دقیقاً به خروجی نازل چسبیده است و از این موضوع می‌توان به اثر محفظه روی شعله یاد کرد. دلیل این امر این است که با برخورد جریان به دیواره‌ها، جریان منعکس شده از دیواره‌ها شعله را تقویت می‌کند و به طور طبیعی شعله در ارتفاع پایین تری نسبت به حالت بدون محفظه پایدار می‌ماند البته اگر نسبت محصورسازی زیاد شود اتلاف حرارتی از دیواره‌ها زیاد می‌شود و اثر معکوس روی شعله خواهد داشت.

در ادامه به بررسی طول شعله در عدد پیچش‌های داخلی مختلف برای سه حالت دبی پیچشی خارجی ۸۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ پرداخته شده است. همانطور که از نمودار ۲۶ پیداست با افزایش عدد پیچش داخلی الگوی متفاوتی برای ارتفاع شعله ایجاد شده است. همواره افزایش عدد پیچش داخلی در دبی پیچشی خارجی ۱۳۰، باعث کاهش ارتفاع شعله شده است علت آن است که ناحیه واکنش با افزایش عدد پیچش خارجی پهن تر شده و به بیرون کشیده تر خواهد شد. همین روند برای دبی پیچشی خارجی ۸۰ (گویا دبی پیچشی خارجی ۸۰ یک مقدار گذار است) وابسته به عدد پیچش داخلی است؛ یعنی در عدد پیچشی داخلی کمتر از ۱ ابتدا طول شعله افزایش یافته اما در مقادیر بیشتر از ۱، طول شعله کاهش می‌یابد. علت این امر ناشی از برهم کنش‌های ناحیه برگشتی و لایه برشی است یعنی مانند آنچه در تصاویر شعله‌ها شرح داده شد، در عدد پیچش خارجی زیر ۱، اثر پیچش داخلی در جهت افزایش شعله است یعنی ناحیه برشی عمودتر می‌شود و طول شعله بیشتر می‌شود اما در مقادیر بالا یک شکست گردابه رخ می‌دهد و ناحیه گردشی داخلی عریض تر می‌شود تا واکنش‌ها در جهت شعاعی نسبت به واکنش‌های طولی، متضمن پایداری شعله هستند. البته مطالعه دقیق ساختار میدان جریان نیازمند بررسی میدان با روش‌های تحریک فلورسانسی لیزری^۱ صفحه‌ای و سایر روش‌های مشاهده میدان است. با افزایش دبی پیچشی خارجی تقریباً ارتفاع شعله از عدد پیچش داخلی مستقل شده است. ضمناً با دقت بیشتر در شکل‌ها، در یک عدد پیچش داخلی مشخص، همواره با افزایش دبی پیچشی خارجی ارتفاع شعله کاهش یافته است و این به دلیل پخش تر شدن و عریض تر شدن ناحیه گردشی مرکزی است. در حالت با محفظه اندازه هر تصویر با اندازه شیشه کوارتز که به منظور مشاهده شعله روی محفظه تعبیه شده است، مقیاس بندی شده است.

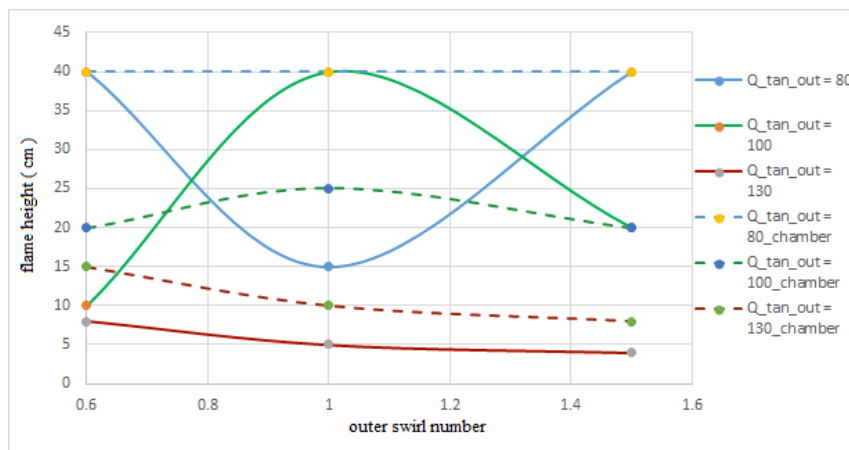
^۱ Laser Induced Fluorescence



شکل ۲۶- تغییرات ارتفاع شعله بر حسب عدد پیش‌دخی داخلی در عدد پیش‌دخی خارجی و دبی پیش‌دخی خارجی‌های مختلف در حالت بدون محفظه

Figure 26 – Variation of flame height as a function of inner swirl number at different outer swirl numbers and outer swirl air flow rates in the without chamber condition

همانطور که پیش‌تر مقایسه شد، شعله در حالت با محفظه در حالت‌های محدودتری روشن می‌شود؛ لذا برای مقایسه هر دو حالت با محفظه و بدون محفظه نیاز است تا صرفاً مواردی که در حالت با محفظه روشن است را با همان نقاط در حالت بدون محفظه مقایسه شود.



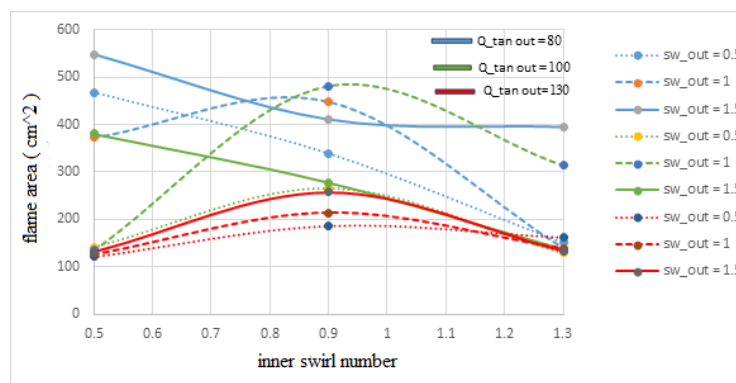
شکل ۲۷- تغییرات ارتفاع شعله بر حسب عدد پیش‌دخی خارجی در دبی پیش‌دخی خارجی‌های مختلف در حالت با و بدون محفظه

Figure 27 – Variation of flame height as a function of outer swirl number at different outer swirl air flow rates for with chamber and without chamber conditions

در هر دبی پیش‌دخی خارجی خاص (یعنی ۸۰، ۱۰۰ یا ۱۳۰ لیتر بر دقیقه) روند تغییرات طول شعله متفاوت است و این یعنی الگوی تغییر ارتفاع شعله به شدت به این پارامتر وابسته است چرا که در دبی پیش‌دخی خارجی ۸۰، در حالت بدون محفظه ابتدا ارتفاع شعله کاهش می‌پذیرد تا یک عدد پیش‌دخی خارجی خاص طول شعله کاهش سپس زیاد می‌شود. در حالت با محفظه این روند معکوس است یعنی ابتدا افزایش طول شعله سپس کاهش طول شعله مشاهده شده است. این بدان علت می‌تواند باشد که در حالت با محفظه ابتدا در عدد پیش‌دخی خارجی مشخصی به دلیل بازگشت جریان از دیواره‌ها نقطه واکنش در نزدیکی نازل رخ می‌دهد اما با افزایش بیش از پیش دبی سوخت، شعله ناحیه گردشی مرکزی را می‌کشد و طول شعله زیاد می‌شود و نقطه سکون را به فاصله ای دورتر در پایین دست جریان انتقال می‌دهد. البته این مورد این‌گونه هم توجیه‌پذیر است

که مادامی که عدد پیچش خارجی کمتر از ۱ است، ناحیه گردشی خارجی طول شعله را افزایش می‌دهد اما وقتی این مقدار بیشتر می‌شود واکنش‌ها بیشتر به دلیل تکانه مماسی بالا، روی لایه برشی خارجی بیشتر از لایه برشی داخلی، واکنش نشان می‌دهند. در حالت با محفظه ابتدا به دلیل برخورد جریان به دیواره و بازگشت آن به مرکز، طول شعله زیاد می‌شود؛ اما با افزایش بیشتر عدد پیچش خارجی، به دلیل نزدیک‌تر شدن نقطه سکون به خروجی نازل ارتفاع آن کاهش می‌یابد.

در نمودار ۲۸ تغییر مساحت شعله بر حسب عدد پیچش برای حالت بدون محفظه نشان داده شده است. در این نمودار تمام منحنی‌ها برای حالت بدون محفظه هستند تا خواننده درک روشنی از عملکرد خود مشعل داشته باشد. منحنی‌های آبی رنگ حالت دبی پیچشی خارجی ۸۰ لیتربردقیقه و منحنی‌های سبز و قرمز به ترتیب ۱۰۰ و ۱۳۰ لیتربردقیقه را نشان می‌دهد. هر رنگ خاص در سه حالت خط، خط چین درشت و خط چین ریز تقسیم بندی شده است که این خطوط عددهای پیچش خارجی مختلف را نشان می‌دهند. به ترتیب خط چین ریز، خط چین درشت و خط، مقادیر عدد پیچش خارجی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ را نشان می‌دهد.



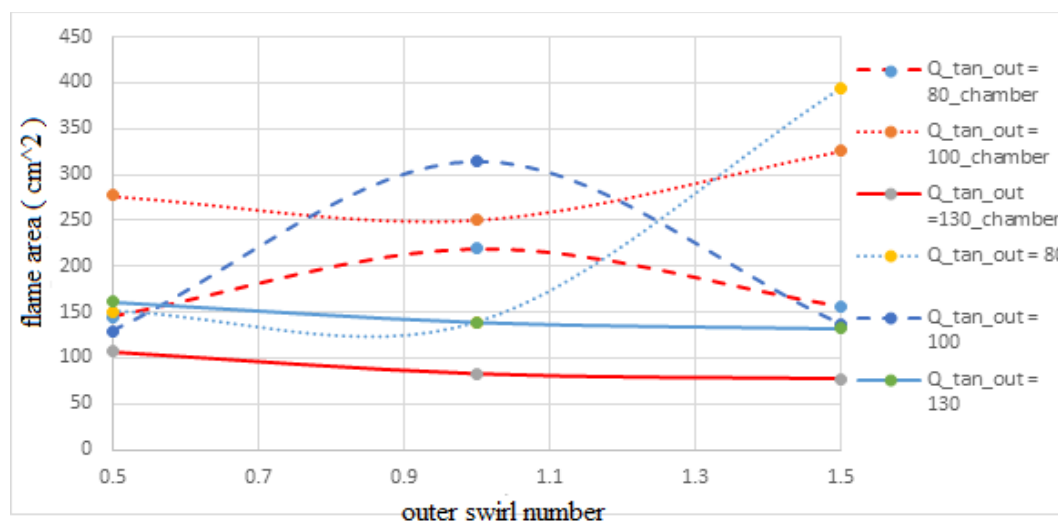
شکل ۲۸- تغییرات مساحت شعله بر حسب عدد پیچش داخلی در دبی پیچشی خارجی و عدد پیچش‌های خارجی مختلف در حالت بدون محفظه

Figure 28 – Variation of flame area as a function of outer swirl number at different outer swirl air flow rates for without chamber conditions

همانطور که در نمودار ۲۸ دیده می‌شود در یک عدد پیچش داخلی خاص، با افزایش عدد پیچش خارجی در دبی پیچشی خارجی ۱۳۰ لیتربردقیقه، مساحت شعله افزایش پیدا کرده است. این رفتار برای ۸۰ و ۱۰۰ لیتربردقیقه به صورت ابتدا افزایشی سپس کاهش مساحت شعله در یک عدد پیچش داخلی خاص دیده شده است. با دقت بیشتر در همه حالت‌ها، مستقل از عدد پیچش خارجی، با افزایش عدد پیچش داخلی به مقادیر بیشتر از ۱ مساحت شعله کاهش یافته است این نشان دهنده این است که کنترل هیدرودینامیک جریان با افزایش عدد پیچش داخلی به مقادیر بالای یک، بیشتر دست این پارامتر است. همچنین نمودار ۲۸، نشان می‌دهد که در دبی پیچشی خارجی ۱۳۰، تغییرات مساحت با عدد پیچش داخلی زیاد نیست، این درحالی است که در سایر مقادیر دبی پیچشی خارجی، تغییرات مساحت تا +۱۰۰ یا -۱۰۰ سانتی مترمربع جابه‌جا می‌شود. گویا عریض‌تر شدن ناحیه گردشی مرکزی از حدی بیشتر، باعث می‌شود که شکل کلی شعله و ابعاد آن حفظ شود.

در نمودار ۲۹ برای حالت‌هایی که دبی پیچشی خارجی ۸۰ یا ۱۰۰ لیتربردقیقه است، مساحت شعله در عدد پیچش خارجی‌های کمتر از ۱، در مقایسه با حالت با محفظه بیشتر از حالت بدون محفظه است اما در مقادیر بالاتر از ۱، مساحت شعله

در حالت بدون محفظه بیشتر از حالت با محفظه است علت این امر می‌تواند به دلیل انعکاس محصولات احتراق از دیواره‌های محفظه به شعله باشد که خود باعث سرد تر شدن و نازک تر شدن شعله در مقادیر بالاتر از ۱ باشد. این در حالی است که در مقادیر عدد پیچش خارجی پایین تر از یک تکانه بازگشتی به جبهه شعله نمی‌رسد ولی باعث به‌سوزی رادیکال‌ها در کناره‌های مرز یا جبهه شعله می‌شود که خود باعث ضخیم تر شدن شعله می‌شود.

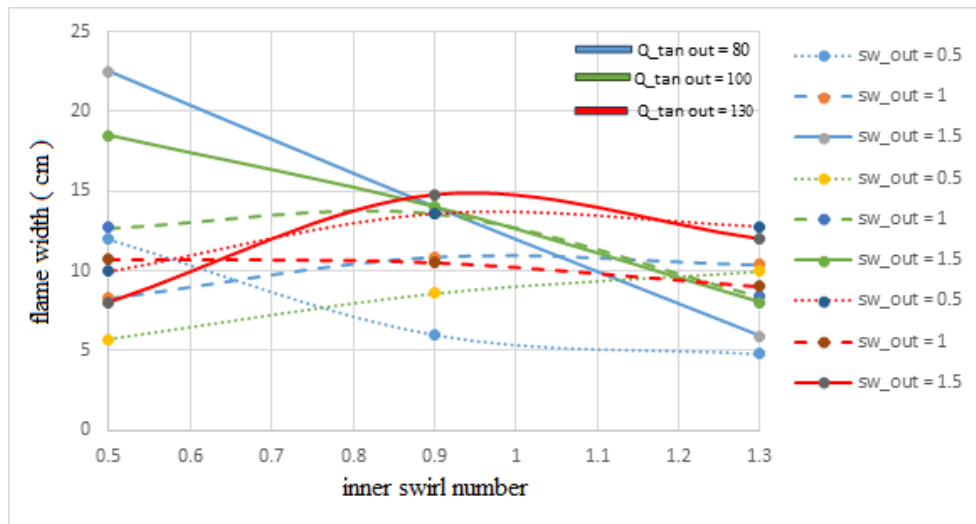


شکل ۲۹- تغییرات مساحت شعله بر حسب عدد پیچش خارجی در دبی پیچشی خارجی‌های مختلف در حالت با و بدون محفظه

Figure 29 – Variation of flame area as a function of outer swirl number at different outer swirl air flow rates for with chamber and without chamber conditions

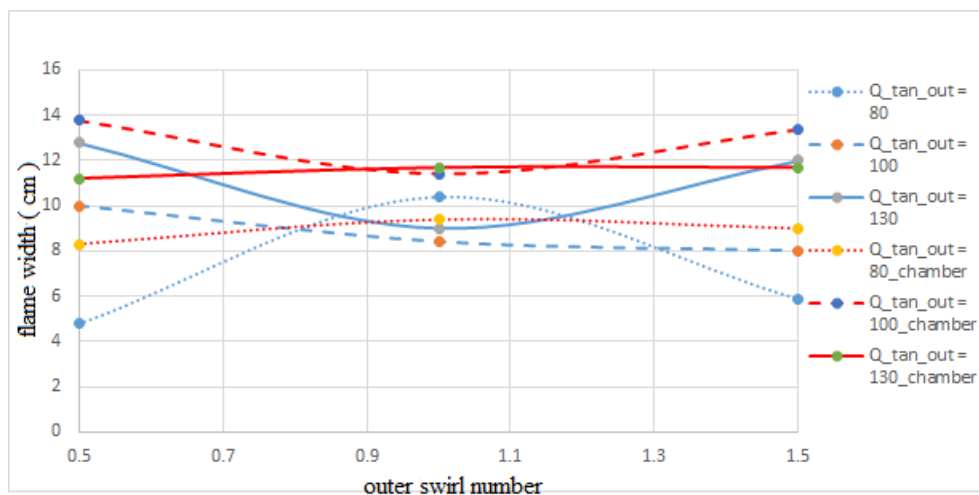
مانند حالت بدون محفظه، در دبی پیچشی خارجی ۱۳۰ لیتر بر دقیقه، شکل کلی شعله را تثبیت کرده است و پیوسته با افزایش عدد پیچش خارجی، مساحت شعله کاهش یافته است و در حالت کلی مساحت شعله در حالت با محفظه کمتر از بدون محفظه است؛ علت این امر همان است که جریان برگشتی به شعله را سرد می‌کند و پیوسته مساحت شعله را کم می‌کند. همانطور که نمودار ۳۰ دیده می‌شود برای عدد پیچش داخلی بالای ۱ عرض شعله مانند مساحت شعله پیوسته کاهش می‌یابد. رفتار ضخامت شعله هم به دبی پیچشی خارجی و هم عدد پیچش تاثیر دارد و هر دو این پارامترها اثرات مختلفی روی ضخامت دارند. به بیان دیگر اثرات همسو ندارند. کمترین ضخامت شعله در حالت بیشترین عدد پیچش داخلی، کمترین عدد پیچش خارجی اتفاق افتاده است و بیشترین آن در کمترین عدد پیچش داخلی و بیشترین عدد پیچش خارجی و این توقع از شعله انتظار می‌رفت.

در نمودار ۳۱ تغییرات عرض شعله با عدد پیچش خارجی در عدد پیچش داخلی ۱/۳ نشان داده شده است. برای هر دبی پیچش خارجی مشخص، اگر منحنی‌های با محفظه و بدون محفظه بررسی شوند، تقریباً در دبی پیچشی خارجی زیر ۱۰۰، ضخامت شعله در حالت با محفظه از حالت بدون محفظه بیشتر است اما این رفتار در دبی پیچشی خارجی ۱۳۰، معکوس شده است یعنی ضخامت شعله در حالت با محفظه بیشتر شده است. اگر این تحلیل را با ارتفاع شعله کوپل کنیم انتظار می‌رود که در این حالت ارتفاع شعله در حالت با محفظه باید از حالت بدون محفظه کمتر باشد که مطابق نمودار ۲۰ تأیید می‌شود.



شکل ۳۰- تغییرات عرض شعله بر حسب عدد پیچش داخلی در دبی پیچشی خارجی و عدد پیچش‌های خارجی مختلف در حالت بدون محفظه

Figure 30 – Variation of flame width as a function of inner swirl number at different outer swirl air flow rates and outer swirl numbers in the without chamber condition



شکل ۳۱- تغییرات عرض شعله بر حسب عدد پیچش خارجی در دبی پیچشی خارجی‌های مختلف در حالت با و بدون محفظه
Figure 31 – Variation of flame width as a function of outer swirl number at different outer swirl air flow rates for with chamber and without chamber conditions

در نمودار ۳۱ تغییرات عرض شعله با عدد پیچش خارجی در عدد پیچش داخلی ۱/۳ نشان داده شده است. برای هر دبی پیچش خارجی مشخص، اگر منحنی‌های با محفظه و بدون محفظه بررسی شوند، تقریباً در دبی پیچشی خارجی زیر ۱۰۰، ضخامت شعله در حالت با محفظه از حالت بدون محفظه بیشتر است اما این رفتار در دبی پیچشی خارجی ۱۳۰، معکوس شده است یعنی ضخامت شعله در حالت با محفظه بیشتر شده است. اگر این تحلیل را با ارتفاع شعله کوپل کنیم انتظار می‌رود که در این حالت ارتفاع شعله در حالت با محفظه باید از حالت بدون محفظه کمتر باشد که مطابق نمودار ۲۰ تأیید می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، پارامترهای احتراقی شعله در دو پیکربندی بدون محفظه و مجهز به محفظه، به صورت جامع مورد تحلیل قرار گرفت. موارد بررسی شده شامل محدوده احتراق رقیق، پایداری، ابعاد هندسی (طول، عرض، ارتفاع بلندشدگی) و مساحت شعله است.

۱. **محدوده احتراق رقیق:** افزودن محفظه به مشعل، منجر به بهبود (کاهش) حد احتراق رقیق نسبت سوخت به هوا شد، که نشان‌دهنده گسترش محدوده پایداری شعله است.

۲. **تأثیر پارامترهای جریان پیچشی بر کلیت شعله (حالت بدون محفظه):** در نسبت تقسیم جریان خارجی ثابت، کاهش نسبت تقسیم داخلی (معادل کاهش عدد پیچش داخلی) تأثیرات متفاوتی بر شکل شعله داشت. در برخی شرایط، این کاهش موجب عریض شدن شعله شد، در حالی که در شرایط دیگر، تغییر محسوسی در ابعاد شعله مشاهده نشد. بیشترین شدت نوردگی شعله در حالتی رخ داد که نسبت تقسیم داخلی و خارجی با یکدیگر برابر شدند.

۳. **تأثیر محفظه بر ساختار جریان و شکل شعله:** نصب محفظه موجب کوچک شدن ناحیه گرداب برگشتی داخلی شد. این پدیده را می‌توان به بزرگ شدن ناحیه گرداب برگشتی خارجی در اثر برخورد با دیواره محفظه و در نتیجه، فشردگی و متراکم‌تر شدن ناحیه احتراق نسبت داد. افزایش عدد پیچش داخلی، موجب افزایش زاویه بازشدگی مخروط شعله شد. افزودن محفظه تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر این روند نداشت. محفظه باعث کاهش چشمگیر ارتفاع بلندشدگی شعله شد تا جایی که در اکثر موارد، شعله به دهانه خروجی نازل چسبید.

۴. **تأثیر همزمان محفظه و پارامترهای پیچشی بر ابعاد شعله:** طول شعله: در حضور محفظه، طول شعله در مقادیر مختلف عدد پیچش داخلی، روندی غیریکنواخت (افزایش به دنبال کاهش یا بالعکس) از خود نشان داد. این الگو تحت تأثیر شدید عدد پیچش خارجی قرار داشت، به گونه‌ای که عدد پیچش خارجی نقش تعیین‌کننده‌ای در تخت‌شدگی (کاهش طول) شعله ایفا کرد. مساحت و عرض شعله: در حالت دارای محفظه، مساحت شعله وابسته به عدد پیچش خارجی بود، به طوری که در برخی مقادیر افزایش و در برخی دیگر کاهش یافت. این رفتار همچنین متأثر از دبی جریان پیچشی خارجی مشاهده شد. این بررسی نشان می‌دهد که افزودن محفظه نه تنها بر پایداری و محدوده احتراق تأثیر می‌گذارد، بلکه با ایجاد اندرکنش با گردابه‌های جریان، به طور اساسی مورفولوژی و ابعاد هندسی شعله را دگرگون می‌سازد.

منابع

- [1] Gupta, A., M. Lewis, and S. Qi, *Effect of swirl on combustion characteristics in premixed flames*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998.
- [2] Wang, X., F. Zhu, S. Wang, Z.J.C.S. Wang, and Technology, *Confinement Effects on Coaxial Jet Diffusion Flame*. Combustion Science and Technology 2023: p. 1-29.
- [3] Mater, E.O., K.M. Soliman, A. Abdulnaim, A.A. Emara, A.S. Elsayh, H.A.J.T.i.a.s. Moneib, and technology, *Cofiring of LPG and Diesel Fuels through an Innovative Double Swirl Burner: Combustion characteristics and Exhaust Emissions*. Trends in Advanced Science and Technology, 2024. 1(1): p. 3.
- [4] Cozzi, F., F. Motta, F. Cobianchi, L. Zampini, and A. Francabandiera. *Experimental Analysis of a Double Swirl Burner*. in *42nd MEETING THE ITALIAN SECTION OF THE COMBUSTION INSTITUTE, PROCEEDINGS*. 2019. ASICI-Associazione Sezione Italiana del Combustion Institute.

- [5] König, D., M. Richter, J. Ströhle, and B.J.E. Eppe, *Stability and Flame Structure Analysis of a Semi-Industrial Swirl-Stabilized Oxy-Fuel Combustion Chamber System for Biomass*. *Energies*, 2025. 18(6): p. 1513.
- [6] Huang, Y., V.J.P.i.e. Yang, and c. science, *Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion*. 2009. 35(4): p. 293-364.
- [7] Ji, L., J. Wang, W. Zhang, R. Mao, G. Hu, Z.J.E.T. Huang, and F. Science, *Effect of confinement ratio on flame structure and blow-off characteristics of swirl flames*. 2022. 135: p. 110630.
- [8] Barakat, S., H. Wang, T. Jin, W. Tao, and G.J.A.A. Wang, *Isothermal swirling flow characteristics and pressure drop analysis of a novel double swirl burner*. *AIP Advances*, 2021. 11(3).
- [9] Fu, Y., J. Cai, S.-M. Jeng, and H. Mongia. *Confinement effects on the swirling flow of a counter-rotating swirl cup*. in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. 2005.
- [10] Burke, M.P., Z. Chen, Y. Ju, F.L.J.C. Dryer, and Flame, *Effect of cylindrical confinement on the determination of laminar flame speeds using outwardly propagating flames*. *Combustion and Flame*, 2009. 156(4): p. 771-779.
- [11] Chong, C.T., S.S. Lam, and S.J.C.E.T. Hochgreb, *Combustion performance of a counter-rotating Double Swirl flame burner under stratified burning condition*. *Energy & Fuels*, 2015. 45: p. 193-198.
- [12] Mardani, A., B. Asadi, and A.A.J.P.o.F. Beige, *Investigation of flame structure and precessing vortex core instability of a gas turbine model combustor with different swirler configurations*. *Propulsion and Power*, 2022. 34(8).
- [13] Fazlollahi, A., Tajik, A., Tabejamaat, S., *The effect of swirl intensity on the probability of successful ignition and kernel propagation in the Amirkabir double swirl burner*. 2023. 15(4): p. 129-158. [in persian]
- [14] Gupta, A., M. Lewis, and S. Qi, *Effect of swirl on combustion characteristics in premixed flames*. 1998.