

Performance Analysis of Non-Reacting Flow of a Single and Double Swirler in a Microchamber Using Numerical Simulation Method

Esmaeil Yadollahi Afra, Elyas Lekzian  *

Department of Aerospace, Faculty of New Sciences and Technologies, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT: Creating swirl flow in combustion chambers is a method to enhance combustion efficiency. One way to achieve this is through the use of a swirler, which generates swirling flow using angled vanes. This swirling flow leads to better mixing and subsequently improves the combustion process. Researchers have explored various methods to increase the mixing of the flow passing through the swirler, with one of the most challenging and significant methods being changes in swirler geometry. Using a double swirler is a novel approach in swirler design. This paper examines the interaction between inner and outer swirlers, identifies recirculation zones, and studies changes in swirl number. The comparison between single and double swirlers in this paper shows that a single swirler creates a larger recirculation zone and higher swirl intensity, contributing to flame stability. Additionally, four new recirculation zones are formed after the double swirler, which also enhances flame stability. The use of a double swirler increases turbulent kinetic energy by up to 75% and turbulence intensity by up to 60%, resulting in better fuel-air mixing and achieving a uniform axial velocity distribution in a shorter distance from the combustion chamber.

Review History:

Received: Jan. 06, 2025
Revised: Mar. 19, 2025
Accepted: Apr. 10, 2025
Available Online: Apr. 14, 2025

Keywords:

Combustion Chamber
Swirling Flow
Double Swirler
Swirl Number
Turbulence Intensity

1- Introduction

In order to improve the performance of combustion chambers, researchers and engineers have investigated various designs and configurations of combustion chambers [1, 2]. One of the simplest concepts in improving combustion is effective mixing. Creating chambers with high swirling flow has a significant impact on flame stability and combustion by accelerating and improving the mixing between fuel and air, and also compensates for the reduction in the dimensions of the combustion chamber in the microchamber. One of these innovations is the use of swirlers, which increase the mixing of air and fuel, thereby promoting more efficient and stable combustion [3]. The creation of central toroidal recirculation zones (CTRZ) and corner recirculation zones (CRZ) plays an important role in increasing flame stability and combustion efficiency. The CTRZ is an important flow structure that is created due to the breakdown of vortices in swirling flows. Vortices play an important role in mixing, transport, and control of flow dynamics. However, they are also a source of instability in the combustion chamber. The CTRZ forms a circular flow pattern that helps to contain the flame and ensure complete mixing of fuel and air.

2- Methodology

The geometry of the single swirler, double swirler, and

the boundary conditions are shown in Figure 1. It should be noted that the general geometry is consistent with the single swirler model, and there are some changes in the details, including the placement of the double swirler, and the size of some internal components of the chamber, but the dimensions of the outer diameter and the outer profile are designed in accordance with the single swirler model. In all figures, the horizontal axis is Z and the vertical axis is Y.

3- Discussion and result

As shown in Figure 1a, the inlet mass flow boundary condition is set for the chamber inlet, and the outlet pressure boundary condition is set for the chamber outlet. The mass flow and temperature values for the inlet boundary conditions are 0.13 kg/s and 300 K, respectively. The RNG K- ϵ turbulence model is used to simulate the turbulent flow [1]. The reason for this choice is that this model simulates eddies better. The RNG model has higher accuracy due to the additional terms in the epsilon equation solution. The effects of circulation on turbulence are included in the RNG model, which makes it more accurate in turbulent flows. The flow swirl number is calculated using the following equation. In the above equation, R_i and R_o represent the inner and outer radii, u and w represent the axial and tangential velocities, respectively.

*Corresponding author's email: e.lekzian@semnan.ac.ir

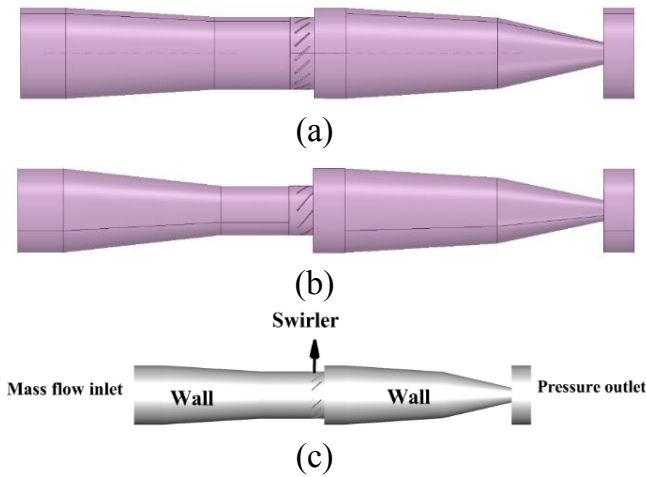


Fig. 1. Geometry of a) double swirler b) single swirler. c) boundary conditions

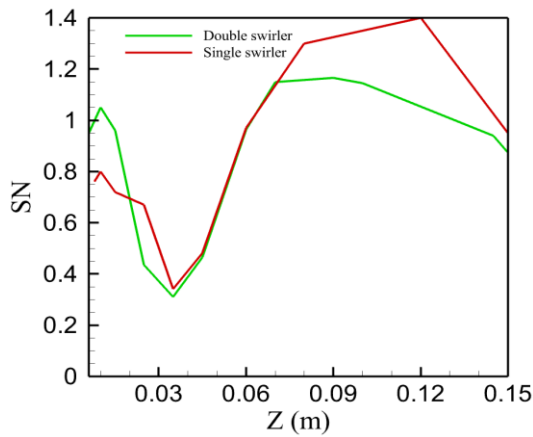


Fig. 2. Comparison of the distribution of swirl number along the central axis.

$$S_n = \frac{\int_{R_i}^{R_0} uwr^2 dr}{R_0 \int_{R_i}^{R_0} u^2 r dr} \quad (1)$$

The figure below shows a comparison of the distribution of the swirl number along the central axis of the chamber. As is clear from Figure 2, the general trend of both graphs is similar. With a slight increase in the exit from the swirler, the decreasing trend continues until section $Z=0.35$ m. Then a sharp upward trend is observed until the approximate section $Z=0.075$ m. This upward trend becomes more uniform for the single swirler until the section $Z=0.12$ m and for the double swirler until the section $Z=0.09$ m and decreases after these

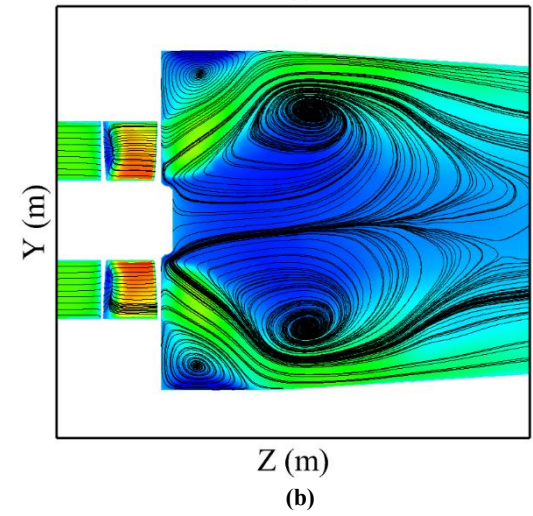
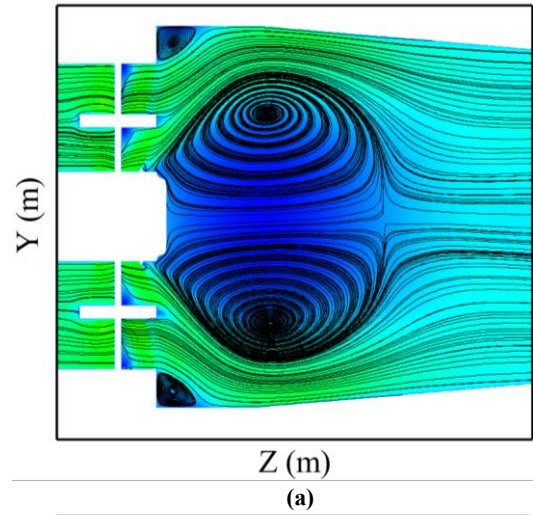


Fig. 3. Axial velocity distribution contour and display of recirculation zones and streamlines. a) double swirler . b) single swirler

sections.

The axial velocity contour and streamlines in the chamber and the representation of the recirculation zones for both the single-swirler and double-swirler cases are shown in Figure 3. The central and corner recirculation zones are visible in the contours.

Figure 4 shows the axial velocity distribution along the centerline of the chamber. As shown in the figure, the part of the graph located in the negative part of the vertical axis represents the CTRZ region and the length of the red line shown represents the maximum length of the CTRZ region. The length of the CTRZ zone for the single swirler is 0.07 m, and the length of the formed CTRZ zone for the double swirler is 0.046 m.

Figure 5 shows the changes in the dimensionless

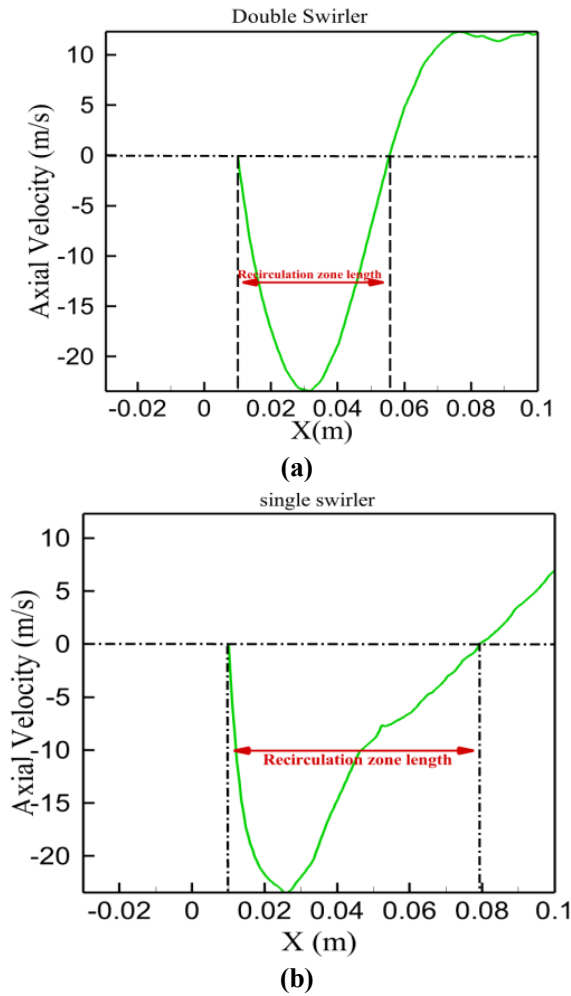


Fig. 4. Length of recirculation zone a) double swirler. b) single swirler

turbulence kinetic energy along the flow axis for the single swirler and the double swirler. The green graph showing the TKE values for the double swirler case has higher values throughout the chamber than the single swirler. This indicates higher turbulence and mixing intensity and consequently better performance of the double swirler compared to the single swirler.

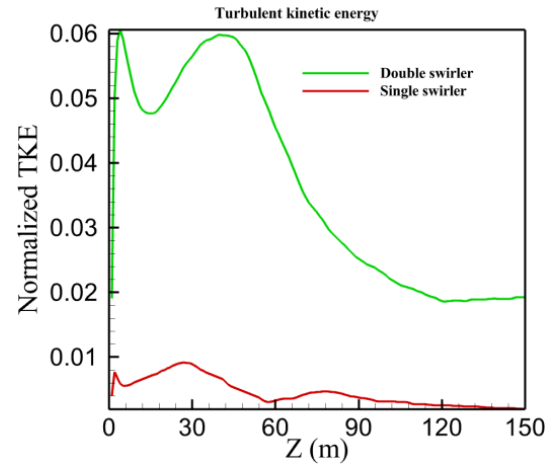


Fig. 5. Comparison of Normalized TKE in single swirler and double swirler

4- Conclusion

According to the results obtained from this study, the use of a double swirler is recommended for modern gas turbines operating at critical pressures, where efficient atomization and mixing are important. The increased mixing and combustion efficiency allows for the design of a shorter combustion chamber, which is beneficial for aerospace applications. The low pressure drop is particularly suitable for high-thrust aeroengine applications, where minimizing pressure losses is critical.

References

- [1] C. Liu, J. Yang, Q. Dong, C. Lai, J. Zhao, J. Lin, M. Liu, Experimental and numerical study on flow field characteristics of a combustion chamber with double-stage counter-rotating swirlers, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 151 (2024) 107245
- [2] M. İlbaş, S. Karyeyen, İ. Yilmaz, Effect of swirl number on combustion characteristics of hydrogen-containing fuels in a combustor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(17) (2016) 7185-7191.
- [3] A. Mardani, A. Fazlollahi-Ghomshi, Numerical investigation of a double-swirled gas turbine model combustor using a RANS approach with different turbulence-chemistry interaction models, *Energy & Fuels*, 30(8) (2016) 6764-6776.



بررسی عملکرد جریان غیر احتراقی ناشی از چرخاننده یک طبقه و دوطبقه در یک میکرومحفظه با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی

اسماعیل یداللهی افرا، الیاس لکزیان^{*}

دانشکده مهندسی هوافضا، پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵

کلمات کلیدی:

محفظه احتراق

جریان چرخشی

چرخاننده دوطبقه

عدد چرخش

شدت آشفتگی

خلاصه: ایجاد جریان چرخشی در محفظه‌های احتراق یکی از روشهای افزایش بازده احتراق محسوب می‌گردد. استفاده از چرخاننده یکی از روشهای ایجاد جریان چرخشی در محفظه‌های احتراق می‌باشد. اساس کار چرخاننده، ایجاد یک جریان چرخشی با استفاده از پره‌های زاویه‌دار بوده که با ورود به محفظه موجب ایجاد یک ناحیه جریان چرخشی می‌شود. این جریان چرخشی، به نوبه خود سبب اختلاط بهتر می‌شود و متعاقباً موجب بهبود فرایند احتراق می‌شود. مهمترین و چالش‌برانگیزترین روش، تغییر در هندسه چرخاننده می‌باشد. استفاده از چرخاننده دوطبقه، نوآوری جدیدی در طراحی چرخاننده شناخته می‌شود. تعامل بین چرخاننده داخلی و بیرونی، شناسایی نواحی گردش مجدد تشکیل شده و تغییرات شدت آشفتگی در استفاده از چرخاننده دوطبقه و بررسی تغییرات عدد چرخش از جمله مواردی می‌باشد که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج مقایسه بین چرخاننده یک طبقه و دوطبقه نشان می‌دهد که چرخاننده تک طبقه ناحیه گردش مجدد بزرگتر و شدت چرخش بیشتری نسبت به چرخاننده دوطبقه ایجاد می‌کند. علاوه بر نواحی گردش مجدد موجود در محفظه احتراق دارای چرخاننده تک طبقه، چهار ناحیه گردش مجدد دیگر بعد از چرخاننده دوطبقه تشکیل می‌شود که می‌تواند موجب پایداری شعله گردد. از طرفی استفاده از چرخاننده دوطبقه، انرژی جنبشی آشفتگی را تا ۷۵٪ و همچنین شدت آشفتگی را تا ۶۰٪ افزایش می‌دهد. افزایش این دو پارامتر موجب افزایش میزان اختلاط، و دستیابی به توزیع یکنواخت سرعت محوری در فاصله کوتاه‌تری از محفظه می‌گردد.

۱- مقدمه

فرایند احتراق در محفظه احتراق توربین‌های گازی هم در کاربردهای زمینی [۱، ۲] و هم در صنایع هوانوردی [۳، ۴] مورد استفاده می‌باشد. به هنگام کاهش سائز ابعاد محفظه، فرایند احتراق با دشواری‌های بیشتری همراه می‌شود زیرا زمان اقامت واکنش‌دهنده‌ها در محفظه احتراق کاهش می‌یابد [۵]. در نتیجه احتراق این محفظه‌ها باید یک احتراق کارآمد [۶] بوده و پایداری شعله [۷] را افزایش داده و انتشار گازهای گلخانه‌ای [۸] را کاهش دهد. به منظور بهبود عملکرد محفظه‌های احتراق، محققان و مهندسان طرح‌ها و پیکربندی‌های مختلف محفظه‌های احتراق را بررسی نموده‌اند. یکی از ساده‌ترین مفاهیم در بهبود احتراق، اختلاط موثر است. مطالعات بسیاری به منظور بهبود اختلاط انجام گرفته است [۹-۱۱]. یکی از این روشها، ایجاد محفظه‌های با جریان چرخشی بالاست، که با تسریع و بهبود اختلاط میان سوخت و هوا تاثیر بسزایی در پایداری شعله و احتراق داشته و

همچنین جبران‌کننده کاهش ابعاد محفظه احتراق در میکرومحفظه است [۱۲-۱۴] بنابراین جریان چرخشی امری ضروری برای دستیابی به یک شعله پایدار می‌باشد. داشتن چنین جریانی مستلزم طراحی‌ها و نوآوری‌های به نسبت پیچیده‌تر محفظه احتراق می‌باشد. یکی از این نوآوری‌ها استفاده از چرخاننده‌ها می‌باشد، که اختلاط هوا و سوخت را افزایش داده و در نتیجه احتراق کارآمدتر و پایدارتر را تقویت می‌کند [۱۵]. ایجاد نواحی چرخشی مرکزی حلقوی^۱ و مناطق چرخشی گوشه^۲، نقش مهمی در افزایش پایداری شعله و راندمان احتراق دارد. ناحیه گردش مجدد داخلی، یک ساختار مهم جریان می‌باشد که بدلیل شکست گردابه در جریانهای چرخشی ایجاد می‌گردد. گردابه‌ها نقش مهمی در اختلاط، انتقال و کنترل دینامیک جریان ایفا می‌کنند. با این حال آنها همچنین منبع ناپایداری در محفظه احتراق محسوب می‌شوند. این ناحیه چرخشی یک الگوی جریان حلقوی را تشکیل

1. Central Torodial Recirculation Zone
2. Corner Recirculation Zone

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: e.lekzian@semnan.ac.ir



جریان را به صورت شعاعی به سمت بیرون هدایت می‌کند و یک ناحیه کم فشار در مرکز ایجاد نموده و در نتیجه باعث ایجاد نواحی گردش مجدد می‌شود. این چرخش مرکزی به لنگر انداختن شعله^۶ کمک می‌کند و باعث اختلاط بهتر سوخت و هوا و احتراق کامل‌تر می‌گردد. شن و همکاران [۱۹] نشان دادند، اگر عدد چرخش از یک مقدار بحرانی فراتر رود، می‌تواند منجر به شکست گرداب^۷ شود. پدیده‌ای که در آن جریان چرخشی ناپایدار شده و به گرداب‌های کوچک‌تر تجزیه می‌شود. ویگنات و همکاران [۲۰] نشان دادند که شکست گرداب می‌تواند پایداری شعله را با ایجاد نواحی چرخش مجدد بزرگتر در مرکز و گوشه افزایش دهد یا اگر بیش از حد نامنظم شود باعث ناپایداری می‌شود. نتایج آنها نشان می‌دهد که بهینه‌سازی عدد چرخش برای متعادل کردن مزایای اختلاط افزایش یافته و مهار شعله در حالی که از اثرات نامطلوب شکست گرداب جلوگیری می‌کند، بسیار مهم است. یچائولی و همکاران [۲۱] به بررسی تجربی و عددی احتراق غیرپیش آمیخته در یک محفظه با یک چرخاننده شکافدار^۸ پرداختند و نشان دادند که طراحی چرخاننده شکافدار، راندمان احتراق را در مقایسه با یک چرخاننده بدون شکاف افزایش می‌دهد. واشاهی و همکاران [۲۲] به اندازه‌گیری یک جریان چرخشی با روش سرعت‌سنجی تصویربرداری ذرات^۹، در یک محفظه احتراق مستطیلی که از آب بعنوان یک سیال کاری استفاده می‌کند، پرداختند. روشهای تجربی مانند سرعت‌سنجی تصویربرداری ذرات و روشی با نام ال‌دی‌ای^{۱۰} از قبیل روشهایی برای تجزیه و تحلیل ویژگیهای میدان جریان چرخشی می‌باشند. آنها به بررسی تشکیل نواحی چرخشی در مرکز و گوشه پرداخته‌اند. علاوه بر این، آنها داده‌های تجربی را با نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار استار سی سی ام^{۱۱} که از مدل آشفستگی ال‌ای‌اس^{۱۲} برای تجزیه و تحلیل مقایسه می‌شوند. گوبادونگ و همکاران [۲۳] عملکرد یک محفظه احتراق دارای چرخاننده سه‌گانه با جهت و همچنین عدد چرخش متفاوت مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آنها نشان می‌دهد که برای چرخاننده داخلی با اعداد چرخش بالاتر، پاشش و توزیع سوخت به بیرون، منجر به توزیع یکنواخت‌تر مخلوط هوا و سوخت در ناحیه اولیه می‌گردد. این امر رویکرد مناسبی به منظور افزایش نرخ اختلاط سوخت و هوا و همچنین افزایش زمان اقامت محصولات در محفظه احتراق، در شعله‌های

می‌دهد که به مهار شعله و اختلاط کامل سوخت و هوا کمک می‌کند. ناحیه چرخش مجدد دیگری در گوشه‌های محفظه احتراق به دلیل تعامل بین جریان چرخشی بین چرخاننده‌ها و دیواره‌های محفظه به دلیل انبساط ناگهانی جریان محفظه بعد از چرخاننده تشکیل می‌شود. حرکت چرخشی یک ناحیه کم فشار در گوشه‌ها ایجاد کرده و باعث می‌شود جریان دوباره به گردش درآید. همانطور که جریان در گوشه‌ها چرخش می‌کند، باعث اختلاط بهتر سوخت و هوا می‌شود. ماهیت متلاطم نواحی گردش مجدد تضمین می‌کند که قطرات سوخت به طور موثر با اکسیدایزر مخلوط می‌شوند و منجر به یک مخلوط همگن‌تر و احتراق کامل می‌شود. نواحی گردش مجدد داخلی و خارجی بزرگتر برای افزایش راندمان اختلاط و احتراق و همچنین لنگر انداختن شعله در ناحیه چرخشی با افزایش زمان اقامت محصولات، سودمند خواهند بود. ناحیه چرخش لبه^۱ یک ویژگی متمایز در طراحی‌های محفظه احتراق می‌باشد، به ویژه آنهایی که دارای چرخاننده دوگانه محوری می‌باشند. هنگامی که دو لایه سیال در مجاورت هم قرار می‌گیرند، در صورت وجود اختلاف سرعت قابل توجه بین این دو لایه سیال، یک لایه برشی^۲ ایجاد می‌کند. اختلاف سرعت بین حباب جریان برگشتی و جریان با سرعت بالا که در نزدیکی دیواره محفظه جریان دارد، علت ایجاد لایه برشی می‌باشد. لایه‌ای از سیال که بین لایه برشی چرخاننده داخلی و لایه‌برشی چرخاننده بیرونی قرار دارد، ساختاری به شکل شاخ را نشان می‌دهد که حول محور مرکزی در مقاطع خاص متقارن بوده و آن را به عنصری حیاتی در افزایش پایداری و راندمان احتراق تبدیل می‌کند. در واقع گرادبان سرعت شدیدی که بین این دو لایه سیال وجود دارد، موجب گردابه‌هایی در اثر نیروی برشی شده که باعث ناپایداری‌هایی مانند ناپایداری کلوین هلمهولتز^۳ خواهد شد [۱۶، ۱۷]. کالیفرناس و همکاران [۱۸] نشان دادند که عوامل مختلفی از قبیل هندسه محفظه، شکل پره، زاویه پره و نسبت منطری^۴ در تشکیل ناحیه گردش مجدد و اندازه این ناحیه تاثیر می‌گذارند. نتایج آنها نشان می‌دهد که پره دارای انحنا می‌تواند ناحیه گردش مجدد بزرگتر و ناحیه برشی قوی‌تری در مقایسه با پره تخت ایجاد نماید. این مناطق چرخشی در نتیجه حرکت چرخشی ایجاد شده توسط چرخاننده تشکیل می‌شوند. عدد چرخش^۵، یک عامل کلیدی در تعیین قدرت و ویژگی‌های این مناطق چرخشی می‌باشد. عدد چرخش بالا معمولاً منجر به نیروهای گریز از مرکز قوی‌تر می‌شود که

6. Anchoring
- 7.ortex Breakdown
8. lotted Swirler
9. Particle Image Velocimetry
10. LDA: Laser Doppler Anemometry
11. Star CCM
12. LES Smagorinsky

1. Lip Recirculation zone
2. Shera Layer (SL)
3. Kelvin Helmholtz
4. Aspect Ratio
5. Swirl Number

غیرپیش‌آمیخته بشمار می‌آید [۲۴-۲۶]. احمدیان و همکاران [۲۷] اثر عدد چرخش هوای ورودی را بر ویژگی‌های احتراق شعله غیرپیش‌آمیخته متان-هوا با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت^۱ بررسی نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که افزایش عدد چرخش از صفر به ۰/۶ باعث بهبود گردش مجدد داخلی می‌شود که منجر به اختلاط بهتر سوخت و هوا و افزایش راندمان احتراق می‌گردد. همچنین آنها نشان دادند که افزایش عدد چرخش به دلیل افزایش نرخ اختلاط سوخت و هوا و کاهش نقاط غلظت در دمای بالا به طور قابل توجهی آلاینده اکسید نیتروژن را کاهش می‌دهد که یک آلاینده وابسته به دما است. ایلباس و همکاران [۲۸] به صورت عددی بررسی اثر عدد چرخش (از صفر تا ۰/۸) را بر ویژگی‌های احتراق ترکیبات سوخت حاوی هیدروژن، در یک محفظه احتراق بررسی نمودند. آنها نتیجه‌گیری نمودند که تغییرات در عدد چرخش به طور قابل توجهی بر دمای شعله و توزیع گازهای گلخانه‌ای ناکس^۲ در محفظه احتراق تأثیر می‌گذارد. همچنین آنها بیان کردند که یک مدل احتراق مناسب، به‌ویژه مدل کسر مخلوط^۳ رفتار احتراق را بهتر پیش‌بینی می‌کند. هوانگ و همکاران [۲۹] در مقاله‌ای به شبیه‌سازی احتراق آشفته کروسن^۴-هوا، در محفظه احتراق توربین‌گازی با چرخاننده دوگانه پرداختند. آنها از روش شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ جهت بررسی اثر نسبت‌های مختلف هم‌ارزی سوخت-هوا و فشار محفظه بر تزریق سوخت به صورت چرخشی و احتراق آشفته در محفظه احتراق ذکر شده استفاده نمودند. در کار آنها دو سیستم تزریق هوا وجود دارد که به دو چرخاننده شعاعی متصل می‌شوند. انژکتور هوای داخلی، متصل به اولین چرخاننده شعاعی، دارای قطر خروجی ۱۶/۰۴ میلی‌متر می‌باشد. انژکتور هوای بیرونی، متصل به چرخاننده شعاعی دوم، دارای قطر خروجی داخلی و خارجی به ترتیب ۱۶/۴۴ میلی‌متر و ۲۳/۵۵ میلی‌متر می‌باشد. نتایج آنها بیان می‌کند که برهمکنش‌های پیچیده‌ای بین جریان‌های چرخشی و شعله آشفته فشار بالا وجود دارد. همچنین آنها نشان دادند که تزریق هوای چرخشی قوی، می‌تواند باعث ایجاد جریان‌های چرخشی در انژکتور داخلی شود که منجر به ایجاد شعله آشفته نیمه پیش‌آمیخته V شکل در فشار محفظه ۳ مگاپاسکال می‌شود. همچنین در فشار محفظه ۴ مگاپاسکال و دو نسبت هم‌ارزی متفاوت ۰/۵ و ۰/۷۵، تزریق چرخشی هوا باعث ایجاد جریان‌های چرخشی در ناحیه مرکزی انژکتور داخلی و محفظه احتراق می‌شود که سپس منجر به احتراق نیمه پیش‌آمیخته

1. Ansys Fluent
2. NO_x
3. PDF/Mixture Fraction
4. Kerosene

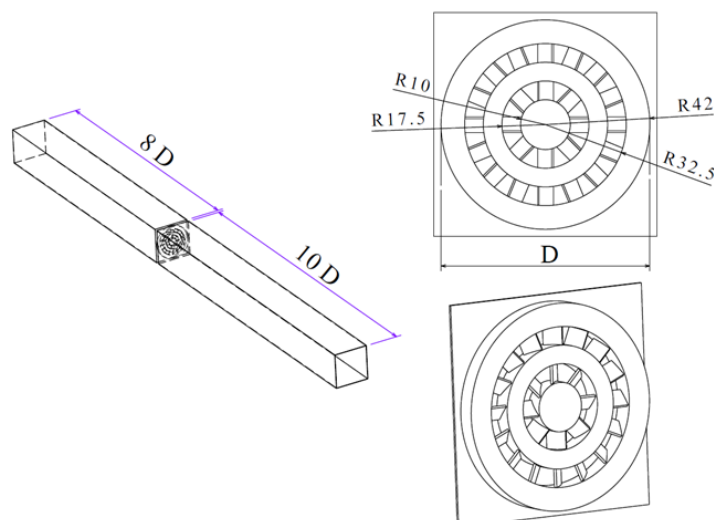
در داخل انژکتور داخلی با شعله V شکل می‌گردد. کوئینگواژنگ و همکاران [۳۰] در مطالعه‌ای عددی و تجربی به بررسی ویژگی‌های احتراق هیدروژن و مونوکسید کربن در محفظه احتراق دارای چرخاننده دوطبقه در سرعت ثابت جریان سوخت پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که در شرایط مقدار مختلف هیدروژن در سوخت، ساختار میدان جریان محفظه احتراق تقریباً یکسان بوده و هر چه محتوای هیدروژن در سوخت بیشتر باشد، جریان جرمی سوخت بیشتر بوده و نرخ جریان سوخت بیشتر در ناحیه مرکزی میدان جریان می‌باشد. همچنین آنها نشان دادند که توزیع دما در بخش مرکزی محفظه احتراق تقریباً در برابر تغییرات محتوای هیدروژن، تأثیر ناپذیر است. علاوه بر این، آنها بیان کردند هر چه محتوای هیدروژن در سوخت بیشتر باشد، موقعیت پایداری در ناحیه مرکزی به دلیل افزایش سرعت جریان، به سمت پایین‌دست محفظه حرکت می‌کند. بای و همکاران [۳۱] در مطالعه‌ای عددی به بررسی چگونگی اثر توزیع هوا بر تلفات جریان و موقعیت شعله در یک محفظه احتراق دارای چرخاننده دوگانه پرداختند. بر اساس مطالعه آنها، جهت چرخش تأثیر قابل توجهی بر اختلاط پایین دست داشته اما اثر ناچیزی بر شکل شعله بالادست خواهد گذاشت. همچنین نتایج آنها نشان می‌دهد در محفظه احتراق دارای چرخاننده، برهمکنش‌های قوی بین چرخاننده اولیه و ثانویه مشاهده می‌شود که برای اختلاط هیدروژن و هوا از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد و توزیع مناسب هوا بین چرخاننده اولیه و ثانویه باید برای بهینه‌سازی شکل و موقعیت شعله طراحی شود. زایگوف و همکاران [۳۲] از شبیه‌سازی سه‌بعدی بمنظور تجزیه و تحلیل جریان داخلی و فرآیند احتراق در یک محفظه احتراق دارای چرخاننده دوگانه استفاده نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که تأثیر عدد چرخش جریان چرخشی داخلی و خارجی بر میدان دما و سرعت تشکیل ناکس حرارتی در محفظه احتراق مشابه بوده با این حال، تغییر عدد چرخش بیرونی تأثیر بیشتری بر عملکرد حرارتی می‌گذارد. نرخ تشکیل ناکس حرارتی با کاهش عدد چرخش بیرونی از ۱/۲ به ۰/۴، ۷-۶ برابر در ناحیه گردش مجدد گوشه افزایش می‌یابد. همچنین آنها نشان دادند ضریب توزیع دمای خروجی^۵ به طور کلی با افزایش عدد چرخش کاهش می‌یابد. با این حال، کسر مولی متوسط ناکس حرارتی در بخش خروجی از این روند پیروی نمی‌کند. هنگامی که عدد چرخش داخلی ثابت است، کسر مولی متوسط ناکس حرارتی با افزایش عدد چرخش بیرونی کاهش می‌یابد. الباز و همکاران [۳۳] به بررسی پایداری شعله، انتشار گازهای گلخانه‌ای و سنجش درون شعله (میانگین دما و غلظت گونه‌های گاز

کربن مونوکسید، نیتروژن مونوکسید، اکسیژن) در یک محفظه احتراق دارای چرخاننده دوگانه حاوی سوخت گاز مایع^۱ پرداختند. آنها نشان دادند که افزایش زاویه چرخاننده حلقوی همراه با زاویه کم چرخاننده بیرونی، عرض ناحیه چرخش را افزایش داده و به علت وجود مقدار قابل توجه جرم بازگردانی شده به سمت پایه شعله، تأثیر قابل توجهی در کاهش دمای کلی شعله داشته، که به نوبه خود موجب کاهش غلظت نیتروژن مونوکسید می‌گردد. لیو و همکاران [۱۶] یک محفظه احتراق دارای چرخاننده دوگانه هم محور را به منظور دستیابی به اختلاط بهتر مورد بررسی قرار دادند، که جهت چرخاننده داخلی و بیرونی عکس یکدیگر بوده و زاویه پره‌ها در هر چرخاننده ۴۵ درجه می‌باشد. آنها از روش آزمایشگاهی سرعت‌سنجی تصویربرداری ذرات دوبعدی و همچنین شبیه‌سازی عددی مدل میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر استوکس^۲ جهت بررسی رفتار میدان جریان استفاده نمودند. همچنین در کار آنها اثر عدد رینولدز در محدوده ۵۴۲۵ تا ۵۴۲۴۵ بر توزیع ناحیه چرخشی مورد بررسی قرار گرفت و نهایتاً نتایج آنها نشان داد که تغییرات در عدد رینولدز، اثر قابل‌توجهی بر افزایش لایه‌برشی، و همچنین افزایش ناحیه چرخشی در میدان جریان، می‌گذارد. در یک محفظه احتراق توربین گاز مجهز به یک چرخاننده دوگانه، چندین ناحیه چرخش نقش مهمی در افزایش پایداری و کارایی احتراق دارند. مردانی و همکاران [۱۵] در مطالعه‌ای، به مدل‌سازی عددی محفظه احتراق توربین گاز دارای چرخاننده دوگانه با استفاده از روش میانگین‌گیری رینولدز و همچنین با کمک مدل‌های مختلف برهمکنش آشفته‌گی-شیمی در حوزه محاسباتی دوبعدی متقارن محوری-چرخشی پرداختند. در کار آنها محفظه مورد مطالعه، یک محفظه احتراق با ورودی‌های چرخاننده دوگانه می‌باشد که از متان به عنوان سوخت استفاده می‌کند. آنها هر دو حالت میدان جریان سرد و احتراقی را شبیه‌سازی نموده و مقایسه‌ای جامع بین نتایج عددی و تجربی برای سرعت، دما و برخی گونه‌های شیمیایی اصلی و فرعی ارائه نمودند. مدل‌سازی واکنش با استفاده از مکانیسم شیمیایی به نام مکانیسم کاهش دقیق^۳ (با ۲۲ گونه و ۱۰۴ واکنش) و دو مدل برهم‌کنش آشفته‌گی-شیمی مفهوم اتلاف گردابی^۴ و تابع چگالی احتمال انتقالی^۵ انجام شده است. نتایج آنها نشان می‌دهد که هر دو رویکرد مدل‌سازی تقریباً می‌توانند ساختارهای میدان جریان اصلی را در داخل محفظه بازسازی کنند. هر دو مدل نواحی چرخش مجدد داخلی و

بیرونی را بصورت رضایت‌بخش پیش‌بینی کردند، اما در رابطه با دما و گونه‌های شیمیایی اختلافاتی در نتایج نسبت به اندازه‌گیری‌ها وجود دارد. نتایج مدل اتلاف گردابی در پایین‌دست محفظه رضایت‌بخش‌تر بوده و حداکثر دما و گونه‌های اصلی (کربن مونوکسید، اکسیژن، هیدروژن و هیدروکسید) را با دقت بیشتری در مقایسه با تابع چگالی احتمال انتقالی پیش‌بینی می‌نماید. با این حال، در بالادست و نزدیک ورودی‌های هوا و سوخت، مدل تابع چگالی احتمال انتقالی عملکرد بهتری از نظر پیش‌بینی ساختار شعله و حداکثر دما و غلظت گونه‌ها نشان می‌دهد. باراکات و همکاران [۱۷] نشان دادند، که در محفظه با قطر بزرگتر، ناحیه گردش مجدد داخلی و بیرونی بزرگتری را نسبت محفظه با قطرهای کوچکتر تشکیل می‌دهد، که موجب بهبود فرآیند اختلاط خواهد شد. با این حال، محفظه‌های با قطر کوچکتر به دلیل مزایای آن مانند انتشار سریع شعله به جلو و سطح کمتر برای جذب گرما، در بسیاری از کاربردهای احتراق مورد نیاز می‌باشد. در نتیجه یک محفظه با قطر متوسط در مقایسه با محفظه با قطرهای کوچک و بزرگ مورد نیاز می‌باشد. همچنین مقایسه بین چرخاننده دوطبقه و چرخاننده تک‌طبقه (زمانی که فقط یکی از چرخاننده‌های داخلی و بیرونی مربوط به چرخاننده دوطبقه فعال باشد) نشان می‌دهد که ناحیه چرخش مجدد تشکیل شده در گوشه توسط چرخاننده داخلی تک‌طبقه با عدد چرخش بالا، بزرگتر از ناحیه چرخش مجدد تشکیل شده در گوشه محفظه توسط چرخاننده بیرونی می‌باشد. در صورتی که ناحیه چرخش مجدد مرکزی تشکیل شده توسط چرخاننده داخلی کوچکتر از چرخاننده بیرونی بوده و این نشان می‌دهد که ویژگی‌های ساختار جریان در چرخاننده دوطبقه ترکیبی از رفتارهای جریان در هر دو چرخاننده داخلی و خارجی می‌باشد. در مطالعه حاضر به بررسی و شبیه‌سازی چرخاننده دوطبقه و تک طبقه پرداخته می‌شود. برای شبیه‌سازی نرم‌افزار انسیس فلوئنت استفاده می‌شود.

به منظور بررسی رفتار جریان بعد از چرخاننده، آیرودینامیک جریان در محفظه احتراق دارای چرخاننده یک‌طبقه و دوطبقه تحلیل می‌گردد. در ادامه، بخشهای مقاله شامل اعتبارسنجی یک چرخاننده دو طبقه و سپس بیان ابعاد و دامنه محاسباتی دو نمونه چرخاننده دوطبقه و یک طبقه می‌باشد. عدد چرخش بعنوان پارامتر نشان‌دهنده شدت جریان و همچنین توزیع سرعت محوری و مماسی در مقاطع مختلف از محفظه احتراق مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از آن توزیع ناحیه گردش مجدد و اندازه آنها برای دو نوع چرخاننده بررسی می‌شود. در ادامه انرژی جنبشی آشفته‌گی و شدت آشفته‌گی به منظور تحلیل اختلاط و تشکیل شعله بررسی می‌شود. بخش انتهایی

1. Liquefied Petroleum Gas
2. Reynolds Average Navier Stokes
3. detailed reduced mechanism
4. Eddy Dissipation Concept
5. TPDF



شکل ۱. هندسه چرخانده (راست) و دامنه محاسباتی (چپ) (واحد ها بر حسب میلیمتر است)

Fig. 1. Swirler geometry (right) and computational domain (left) (units are in millimeters)

برابر قطر چرخانده از ورودی (بالادست چرخانده) و ۱۰ برابر قطر چرخانده از خروجی (پایین دست) چرخانده قرار گرفته است. قطر چرخانده و ابعاد دامنه محاسباتی منطبق بر قطر و ابعاد معرفی شده در مطالعه لیو و همکاران می باشد. سپس برای شبکه بندی از محیط انسیس مشینگ^۴ استفاده شده است. برای شبیه سازی از یک سیستم محاسباتی با ۲۵ هسته Intel Xeon با فرکانس پردازش ۲/۲ گیگاهرتز و با حافظه ۴۰ گیگابایت استفاده شده است.

جهت بررسی استقلال از شبکه، شبیه سازی با سه شبکه انجام گرفته که تعداد ۵۵۹۶۵۲۰ سلول بعنوان مش بهینه به منظور ادامه شبیه سازی تعیین گردیده است. لایه مرزی از پنج لایه و یک انتقال ملایم^۵ از شبکه مقیاس کوچک به شبکه مقیاس بزرگ با نرخ رشد ۱/۲ در نظر گرفته شد. با توجه به دقت شبیه سازی عددی و زمان مصرف محاسبات، منترلچنر^۶ (که می تواند به طور مستقل تنش برشی دیوار و شار حرارتی را بدون توجه به Y^+ پیش بینی کند) به عنوان تابع دیوار انتخاب شده است [۱۶]. شکل ۲ مقایسه توزیع سرعت محوری بی بعد شده را در راستای خط مرکزی محفظه برای کار حاضر و مطالعه لیو و همکاران نشان می دهد. مشاهده می شود که دو نمودار دارای تطابق عالی بوده و میانگین درصد خطا کمتر از ۰/۵٪ می باشد.

مقاله، شامل نتیجه گیری و مقایسه اختلاط دو چرخانده و بیان مزایا و معایب آنهاست.

۲- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی و بررسی صحت نتایج حاصل از شبیه سازی در این مطالعه، ابتدا نتایج استخراج شده از مطالعه ویژگی های میدان جریان در محفظه احتراق دارای چرخانده دوگانه، با نتایج حاصل از مطالعه عددی و آزمایشگاهی لیو و همکاران [۱۶] مقایسه می شود. برای ایجاد هندسه چرخانده از نرم افزار کتیا^۱ و جهت ایجاد دامنه محاسباتی که بصورت یک مکعب مستطیل می باشد، از محیط دیزاین مدلر^۲ نرم افزار انسیس فلونت^۳ استفاده شده است. عدد رینولدز جریان ورودی به محفظه ۱۶۲۷۳ می باشد. با در نظر گیری قطر هیدرولیکی محفظه و چگالی جریان، مقدار دبی جرمی و سرعت ورودی به ترتیب ۰/۰۲۶ کیلوگرم بر ثانیه و ۲/۸۵ متر بر ثانیه محاسبه شده است. هندسه چرخانده شامل دو ردیف پره متحدالمرکز در خلاف جهت هم، با زاویه ۴۵ درجه، بصورتیکه ردیف پایینی، شامل ۸ پره و ردیف بالایی شامل ۱۶ پره می باشد، شکل ۱ هندسه چرخانده و دامنه محاسباتی را نشان می دهد. قطر چرخانده ۸۴ میلی متر می باشد. چرخانده در فاصله ۸

4. Ansys Meshing
5. Smooth Transition
6. Menter Lechner

1. Catia
2. Design Modeler
3. Ansys Workbench

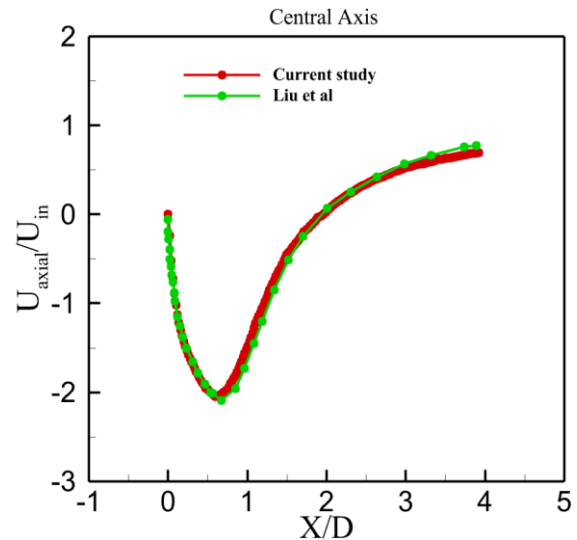
می‌باشد. قطر چرخاننده، طول پره‌ها، تعداد پره‌ها و زاویه پره‌ها با محور مرکزی محفظه، در دو حالت ذکر شده متفاوت می‌باشد.

هندس مربوط به چرخاننده تک‌طبقه، چرخاننده دوطبقه و شرایط مرزی در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین اندازه بخشهای مختلف محفظه احتراق در شکل شماره ۴ مشخص شده است. لازم به ذکر است طرح کلی هندسه مطابق با نمونه چرخاننده تک‌طبقه بوده و تغییراتی در جزئیات شامل جانمایی چرخاننده دوگانه، تغییر اندازه برخی اجزای داخلی محفظه داده شده است، اما ابعاد قطر بیرونی و همچنین پروفیل بیرونی، مطابق با نمونه چرخاننده تک‌طبقه طراحی شده است. در تمام شکل‌ها محور افقی Z و محور عمودی Y می‌باشد.

شکل ۴ طرحواره محفظه احتراق دارای چرخاننده دوطبقه و چرخاننده تک‌طبقه را نشان می‌دهد.

بمنظور بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، تعداد سه شبکه برای هر دو حالت چرخاننده تک‌طبقه و چرخاننده دوطبقه، در نظر گرفته شده است. اندازه شبکه مربوط به چرخاننده ۰/۳-۰/۲۸ میلی‌متر می‌باشد. تعداد المانهای مربوط به هر مش در جدول ۳ (چرخاننده تک‌طبقه) و جدول ۴ (چرخاننده دوطبقه) بیان شده است.

متوسط اختلاف بین نتایج شبکه شماره سه و شبکه شماره دو مربوط به چرخاننده تک‌طبقه برابر با ۰/۶٪ می‌باشد. تغییرات سرعت محوری (در این مطالعه محور Z بعنوان محور جریان در نظر گرفته شده است) مربوط به چرخاننده تک‌طبقه هر سه شبکه در نمودار موجود در شکل ۵ رسم شده



شکل ۲. مقایسه پروفیل سرعت متوسط جریان در محور مرکزی بین مطالعه لیو همکاران با کار اخیر

Fig. 2. Comparison of the average flow velocity profile in the central axis between Liu et al.'s study and current study

۳- معرفی مساله

در جدول ۱ مشخصات مربوط به ابعاد و اندازه چرخاننده داخلی و بیرونی مربوط به چرخاننده دوطبقه و در جدول ۲ ابعاد و اندازه مربوط به چرخاننده تک‌طبقه آورده شده است. قطر قسمت ورودی و خروجی محفظه، طول محفظه، قطر انژکتور سوخت و طول لوله سوخت در هر دو حالت باهم برابر

جدول ۱. مشخصات هندسی چرخاننده دوطبقه

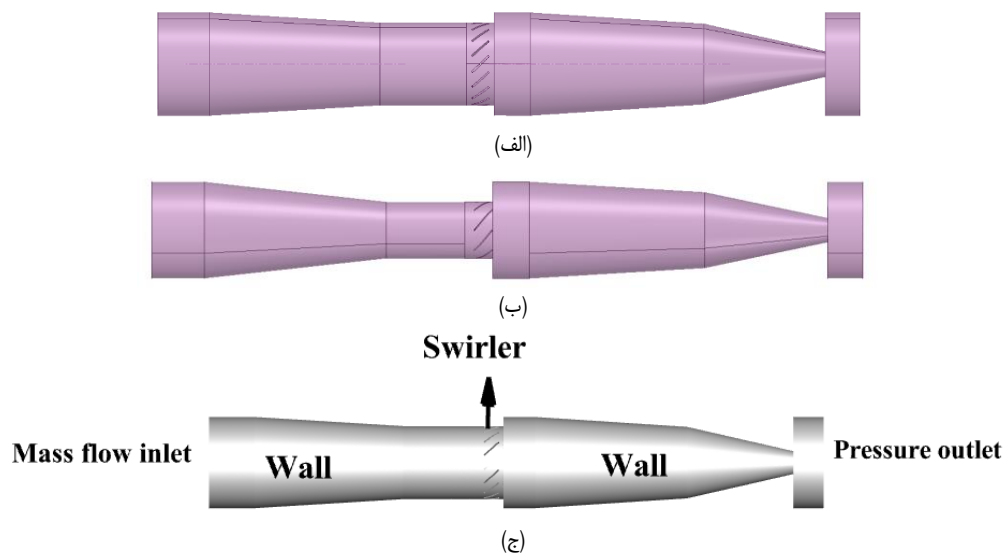
Table 1. Geometrical characteristics of the double-swirler

چرخاننده بیرونی		چرخاننده داخلی	
قطر داخلی	۳۲ میلی‌متر	قطر داخلی	۱۴ میلی‌متر
قطر بیرونی	۴۸ میلی‌متر	قطر بیرونی	۲۸ میلی‌متر

جدول ۲. مشخصات هندسی چرخاننده تک‌طبقه

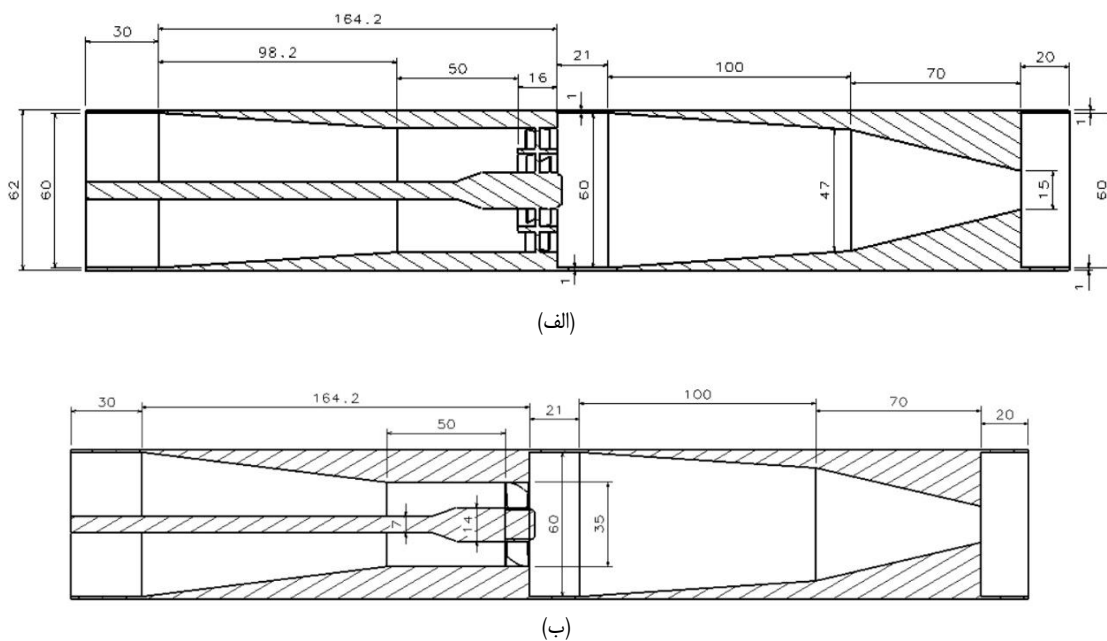
Table 2. Geometrical characteristics of the single-swirler

قطر داخلی	۱۴ میلی‌متر
قطر بیرونی	۳۵ میلی‌متر



شکل ۳. هندسه مربوط به الف) چرخاننده دوطبقه ب) چرخاننده تک طبقه ج) شرایط مرزی

Fig. 3. Geometry: a) double-swirler b) single swirler c) boundary conditions



شکل ۴. طرحواره الف) چرخاننده دوطبقه ب) چرخاننده تک طبقه

Fig. 4. Schematic: a) Double swirler b) Single swirler

جدول ۳. بررسی استقلال از شبکه مربوط به چرخاننده تک طبقه

Table 3. Mesh independence study of single swirler

شماره	تعداد سلول
۱	۳۲۷۴۷۷۶
۲	۵۳۲۶۵۸۴
۳	۶۴۵۲۳۸۹

جدول ۴. بررسی استقلال از شبکه مربوط به چرخاننده دو طبقه

Table 4. Mesh independence study of double swirler

شماره	تعداد سلول
۱	۵۰۱۳۰۷۴
۲	۵۸۹۲۱۰۶
۳	۶۸۱۵۰۲۴

ان-جی گنجانده شده است، که باعث می شود دقت آن در جریان های گردابه ای بالاتر باشد. روابط (۱) تا (۳) معادلات حاکم بر این معادله را نشان می دهد.

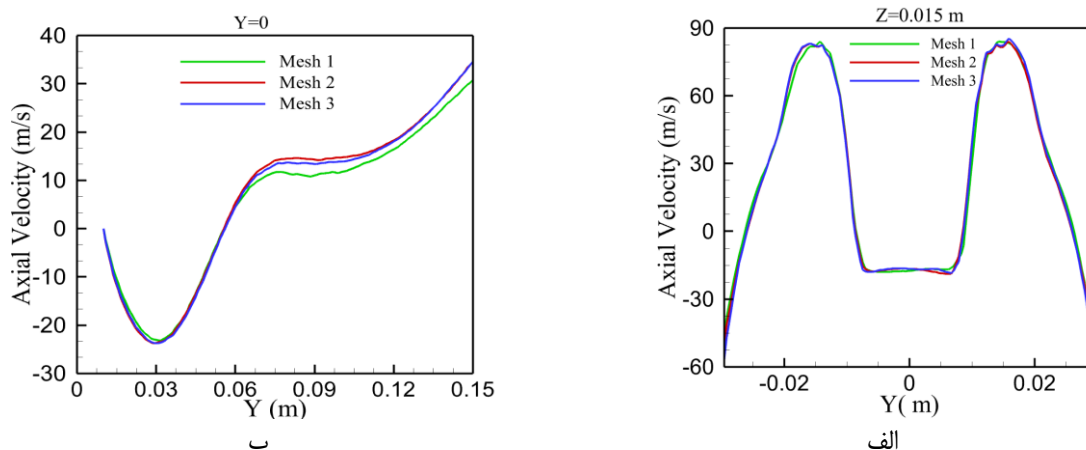
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_K \\ + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} (G_K + C_{3\varepsilon} G_b) \\ - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

است. همچنین استقلال حل از شبکه محاسباتی برای چرخاننده دو طبقه نیز با سه شبکه انجام گرفته است. شکل ۶ مقایسه توزیع سرعت محوری را در راستای خط مرکزی محفظه نشان می دهد. متوسط اختلاف بین نتایج مش شماره سه و مش شماره ۲ مربوط به چرخاننده دو طبقه کمتر از ۳٪ می باشد. جهت کاهش هزینه محاسباتی و دقت قابل قبول در نتایج آتی، شبکه شماره ۲ بعنوان شبکه بهینه برای هر دو چرخاننده تعیین می گردد.

همانطور که در شکل ۳ ج نشان داده شده، شرط مرزی دبی جرمی ورودی برای ورودی محفظه و شرط مرزی فشار خروجی برای قسمت خروجی محفظه تنظیم شده است. مقدار دبی جرمی و دما برای شرایط مرزی ورودی به ترتیب برابر با ۰/۱۳ کیلوگرم بر ثانیه و ۳۰۰ کلوین می باشد. از مدل توربولانسی کا اپسیلون آر-ان-جی^۱ برای شبیه سازی جریان مغشوش استفاده شده است [۱۶]. علت این انتخاب، شبیه سازی بهتر گردابه ها توسط این مدل بوده است. مدل آر-ان-جی به واسطه داشتن ترم های اضافی در حل معادله اپسیلون دقت بالاتری دارد. اثرات گردش بر اغتشاش در مدل آر-

1. K-epsilon RNG



شکل ۵. بررسی استقلال از شبکه الف: چرخاننده تک طبقه ب: چرخاننده دوطبقه

Fig. 5. Mesh independence study a) Single swirler b) Double swirler

مختلفی از چرخاننده را نشان می‌دهد. در ادامه پروفیل‌های توزیع مشخصات جریان در راستای این مقاطع نشان داده خواهد شد.

که R_ε ضریب ثابتی بوده که از رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{K} \quad (3)$$

۳-۱- عدد چرخش
عدد چرخش بمنظور تعیین کمیت شدت جریان چرخشی، به عنوان نسبت مومنوم زاویه‌ای^۲ به مومنوم محوری^۳ بصورت بی‌بعد تعریف می‌شود. عدد چرخش را می‌توان به عدد چرخش جریان و عدد چرخش هندسی تقسیم نمود. رابطه (۴) معرف عدد چرخش هندسی می‌باشد [۱۶].

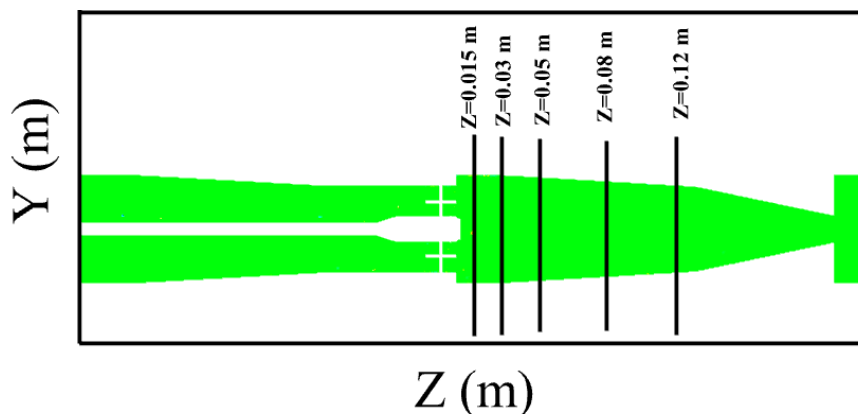
$$S_n = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - \left(\frac{D_{hub}}{D_{SW}}\right)^3}{1 - \left(\frac{D_{hub}}{D_{SW}}\right)^2} \right] \tan \theta \quad (4)$$

با توجه به محدودیت‌های موجود در طراحی چرخاننده دوطبقه (قطر ثابت محفظه، قطر ثابت انژکتور سوخت) قطر داخلی و بیرونی مربوط به هر چرخاننده در حالت دو طبقه به این صورت محاسبه شده که ابتدا قطر بیرونی محفظه ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است، قطر انژکتور سوخت در هر دو حالت ثابت و برابر با ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. همچنین قطر بیرونی چرخاننده با در نظرگیری حالت انبساطی محفظه که برای انبساط جریان مورد نیاز می‌باشد، ۵۱ میلی‌متر تعیین شده است. بمنظور قرارگیری عدد چرخش

که در رابطه بالا می‌باشد و مقدار β برابر ۰/۰۱۲، مقدار η_0 برابر ۴/۳۸، مقدار σ_3 برابر ۰/۷۱۹۴، مقدار σ_k برابر با ۰/۷۱۹۴، مقدار $C_{2\varepsilon}$ برابر با ۱/۶۸، مقدار $C_{1\varepsilon}$ برابر با ۱/۴۲ و مقدار C_μ برابر با ۰/۰۸۴۵ می‌باشد. همچنین از روش نسبت آشفته‌گی و ویسکوزیته برای تعیین مشخصه‌های آشفته‌گی استفاده شده است. مقادیر شدت آشفته‌گی و نسبت ویسکوزیته آشفته‌گی به ترتیب ۵٪ و ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. در جریانهای سریعاً کرنش یافته جهت بررسی رفتار جریان نزدیک دیواره از تابع دیواره منترلچنر استفاده شده است. مقدار وای‌پلاس^۱ یک فاصله بی‌بعد بوده که در مدل‌سازی آشفته‌گی برای توصیف ناحیه نزدیک دیوار استفاده می‌شود [۱۶]. برای تابع دیوار منترلچنر در فلوئنت، دقت شبیه‌سازی کمتر به مقدار دقیق وای‌پلاس وابسته است. از مزیت‌های استفاده از این تابع دیواره می‌توان به حساسیت کمتر به اصلاح مش در نزدیکی دیواره و همچنین نمایش بهتر اختلاط آشفته در نزدیکی دیواره‌ها نام برد. لازم بذکر است استفاده از این توابع دیواره هزینه محاسباتی بیشتری را دربر خواهد داشت. شکل ۶ مقاطع ایجاد شده در فواصل

2. Angular Momentum
3. Axial Momentum

1. Y plus



شکل ۶. مقاطع ایجاد شده در راستای محوری

Fig. 6. Sections created in the axial direction

جدول ۵. مقادیر پیش‌بینی شده و نهایی مربوط به چرخاننده دوطبقه

Table 5. Predicted and final values for the double-swirler

شماره	قطر بیرونی (متر)	قطر داخلی (متر)	تعداد پره	زاویه (درجه)	عدد چرخش
چرخاننده بیرونی					
۱	۰/۰۴۸	۰/۰۳۲	۱۶	۴۵	۰/۸۷
۲	۰/۰۴۸	۰/۰۳۲	۱۶	۴۶	۰/۸۸
چرخاننده درونی					
۱	۰/۰۲۸	۰/۰۱۴	۸	۴۵	۰/۷۷
۲	۰/۰۲۸	۰/۰۱۴	۸	۴۶	۰/۸

جدول ۶. مقادیر پیش‌بینی شده و نهایی مربوط به چرخاننده تک‌طبقه

Table 6. Predicted and final values for the single-swirler

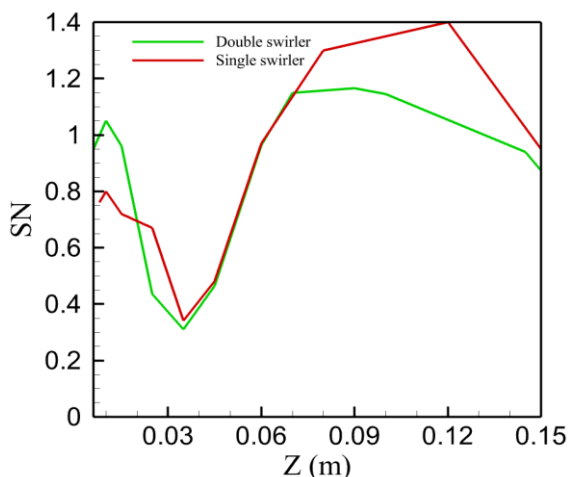
قطر بیرونی (متر)	قطر داخلی (متر)	تعداد پره	زاویه (درجه)	عدد چرخش
۰/۰۳۵	۰/۰۱۴	۸	۶۰	۰/۹

مربوط به چرخاننده درونی و بیرونی موجب افزایش عدد چرخش می‌شود. این مورد احتمالاً بدلیل وجود تعداد پره‌های بالا می‌باشد که اثرات تداخلی انحراف جریان را بهبود می‌بخشد. عدد چرخش جریان با استفاده از رابطه شماره (۵) محاسبه می‌گردد [۱۶].

$$S_n = \frac{\int_{R_i}^{R_0} uwr^2 dr}{R_i \int_{R_i}^{R_0} u^2 r dr} \quad (5)$$

هندسی مربوط به چرخاننده درونی و بیرونی در محدوده قابل قبول جهت ایجاد ناحیه گردش مجدد، به ترتیب مقادیر ۰/۸ و ۰/۸۸ برای چرخاننده درونی و بیرونی در نظر گرفته می‌شود. [۱۶، ۱۸، ۳۴]. عدد چرخش مربوط به چرخاننده تک‌طبقه ۰/۹ می‌باشد. با کاهش فاصله بین چرخاننده درونی و بیرونی از قطر کلی چرخاننده، مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به قطر داخلی و بیرونی و همچنین زاویه پره‌ها در چرخاننده تک‌طبقه و دوطبقه در جدول ۵ و ۶ آورده شده است.

با توجه به جدول ۶، مشاهده می‌شود که افزایش ناچیز (۱ درجه) در زاویه



شکل ۷. مقایسه توزیع عدد چرخش در راستای محور مرکزی

Fig. 7. Comparison of the distribution of the swirl number along the central axis

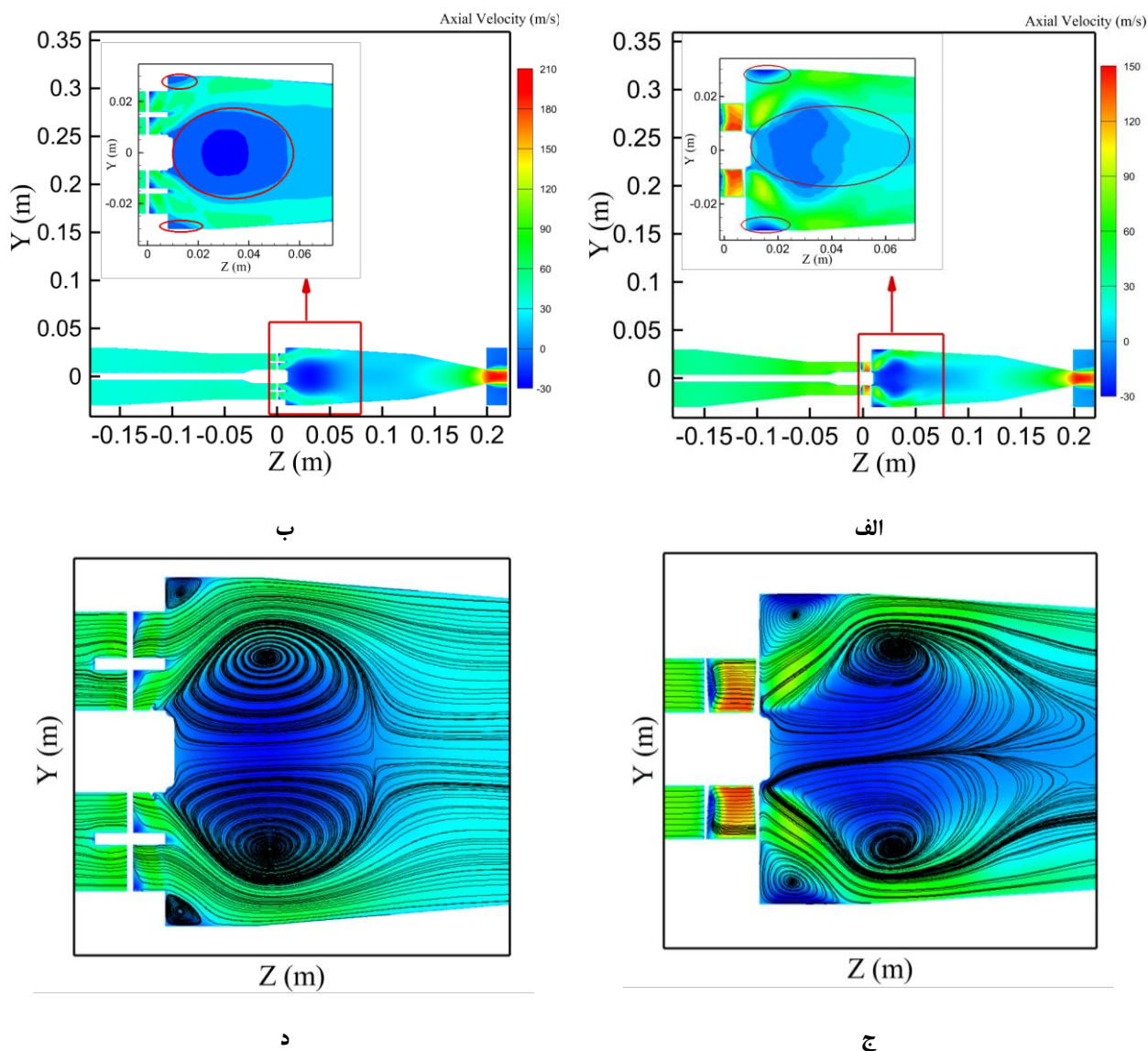
در مرکز و در کناره دیواره‌ها توزیع سرعت محوری در مقاطع مشخص شده در بخش قبل (شکل ۶) نشان داده می‌شود. با توجه به شکل برای هر دو چرخاننده تک‌طبقه و دوطبقه در مقطع $Z = 0.015 \text{ m}$ نواحی گردش مجدد داخلی و بیرونی نشان داده شده است. با اندکی حرکت به سمت پایین‌دست چرخاننده ($Z = 0.03 \text{ m}$)، ناحیه گردش مجدد بیرونی از بین می‌رود. سرعت ورودی به محفظه برای محفظه در هر دو حالت چرخاننده تک‌طبقه و چرخاننده دوطبقه، تقریباً ۳۸ متر بر ثانیه می‌باشد. همانطور که از شکل ۹ مشاهده می‌شود، در مقطع $Z = 0.015 \text{ m}$ پروفیل سرعت مربوط به چرخاننده تک‌طبقه دارای بیشینه سرعت ۸۱ متر بر ثانیه می‌باشد. این در حالی است که جریان بعد از چرخاننده دوطبقه بیشینه سرعت حدود ۴۰ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. این سرعت کمتر اجازه می‌دهد تا زمان بیشتری برای مخلوط شدن سوخت و هوا به طور کامل، منجر به راندمان احتراق بهتر شود. اختلاط بهتر منجر به توزیع یکنواخت‌تر دما در محفظه احتراق، کاهش نقاط داغ و بهبود عملکرد کلی می‌شود. از طرفی جریان بعد از عبور از چرخاننده دوطبقه پروفیل سرعت یکنواخت‌تری در مقایسه با چرخاننده تک‌طبقه دارد. یکنواخت بودن سرعت جریان تشکیل نقاط داغ را کاهش داده، که می‌تواند باعث گرمای بیش از حد موضعی شود و بر دوام اجزای محفظه احتراق تأثیر بگذارد. با توجه به شکل ۹ می‌توان گفت پروفیل سرعت محوری بعد از چرخاننده دوطبقه، نسبت به چرخاننده تک‌طبقه، در طول کوتاه‌تری از محفظه یکنواخت می‌شود.

که در رابطه فوق، R_0 و R_i نشان‌دهنده شعاع داخلی و خارجی، u و w به ترتیب نشان دهنده سرعت محوری و مماسی می‌باشند. مقدار شعاع جهت محاسبه عدد چرخش چرخاننده تک‌طبقه برابر با قطر داخلی و قطر خارجی داده شده در جدول ۳ می‌باشد. مقادیر شعاع جهت محاسبه عدد چرخش چرخاننده دوطبقه، به صورت میانگین قطر داخلی و قطر خارجی برای هر کدام از چرخاننده‌های داخلی و بیرونی بر اساس مقادیر موجود در جدول ۳ تعریف شده است. مقدار عدد چرخش خروجی برای چرخاننده تک‌طبقه بر اساس رابطه بالا 0.8 و برای چرخاننده دوطبقه مقدار عدد چرخش به ترتیب 0.93 و 1.04 برای چرخاننده داخلی و بیرونی محاسبه شده است. شکل زیر مقایسه توزیع عدد چرخش را در طول محور مرکزی محفظه نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۷ مشخص می‌باشد، روند کلی هر دو نمودار مشابه می‌باشد. بطوریکه با افزایش اندکی در خروج از چرخاننده روند کاهشی تا مقطع $Z = 0.035 \text{ m}$ ادامه می‌یابد. سپس روند صعودی شدیدی تا مقطع تقریبی $Z = 0.075 \text{ m}$ مشاهده می‌شود. این روند صعودی برای چرخاننده تک‌طبقه تا مقطع $Z = 0.12 \text{ m}$ و تا مقطع $Z = 0.09 \text{ m}$ برای چرخاننده دوطبقه، یکنواخت‌تر شده و بعد از این مقاطع کاهش می‌یابد. در خروجی چرخاننده عدد چرخش مربوط به چرخاننده دوطبقه بیشتر از چرخاننده تک‌طبقه می‌باشد. از مقطع $Z = 0.02 \text{ m}$ تا $Z = 0.075 \text{ m}$ عدد چرخش برای چرخاننده تک‌طبقه بیشتر از چرخاننده دوطبقه می‌باشد. همچنین از مقطع $Z = 0.035 \text{ m}$ تا $Z = 0.071 \text{ m}$ میانگین اعداد چرخش با هم برابر بوده و بعد از آن تا مقطع $Z = 0.15 \text{ m}$ باز هم عدد چرخش چرخاننده تک‌طبقه بیشتر از چرخاننده دوطبقه می‌باشد.

۳-۲- توزیع سرعت محوری

کانتور سرعت محوری و خطوط جریان در محفظه و نمایش نواحی گردش مجدد برای هر دو حالت چرخاننده تک‌طبقه و دوطبقه در شکل ۸ آمده است. نواحی گردش مجدد مرکزی و گوشه درکانتورها قابل مشاهده می‌باشد. نواحی با سرعت صفر و منفی نشان داده شده در شکل ۸، نمایانگر نواحی گردش مجدد می‌باشند که شامل یک ناحیه بزرگ در پایین دست چرخاننده و تقریباً در وسط خط عرضی محفظه و دوناچه کوچکتر در گوشه‌ها می‌باشد. توزیع سرعت محوری و شعاعی مربوط به چرخاننده دوطبقه و تک‌طبقه، در هر یک از مقاطع مشخص شده، به ترتیب در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

در شکل ۹ به منظور شناسایی دقیق نقاط ابتدا و انتهای گردش مجدد



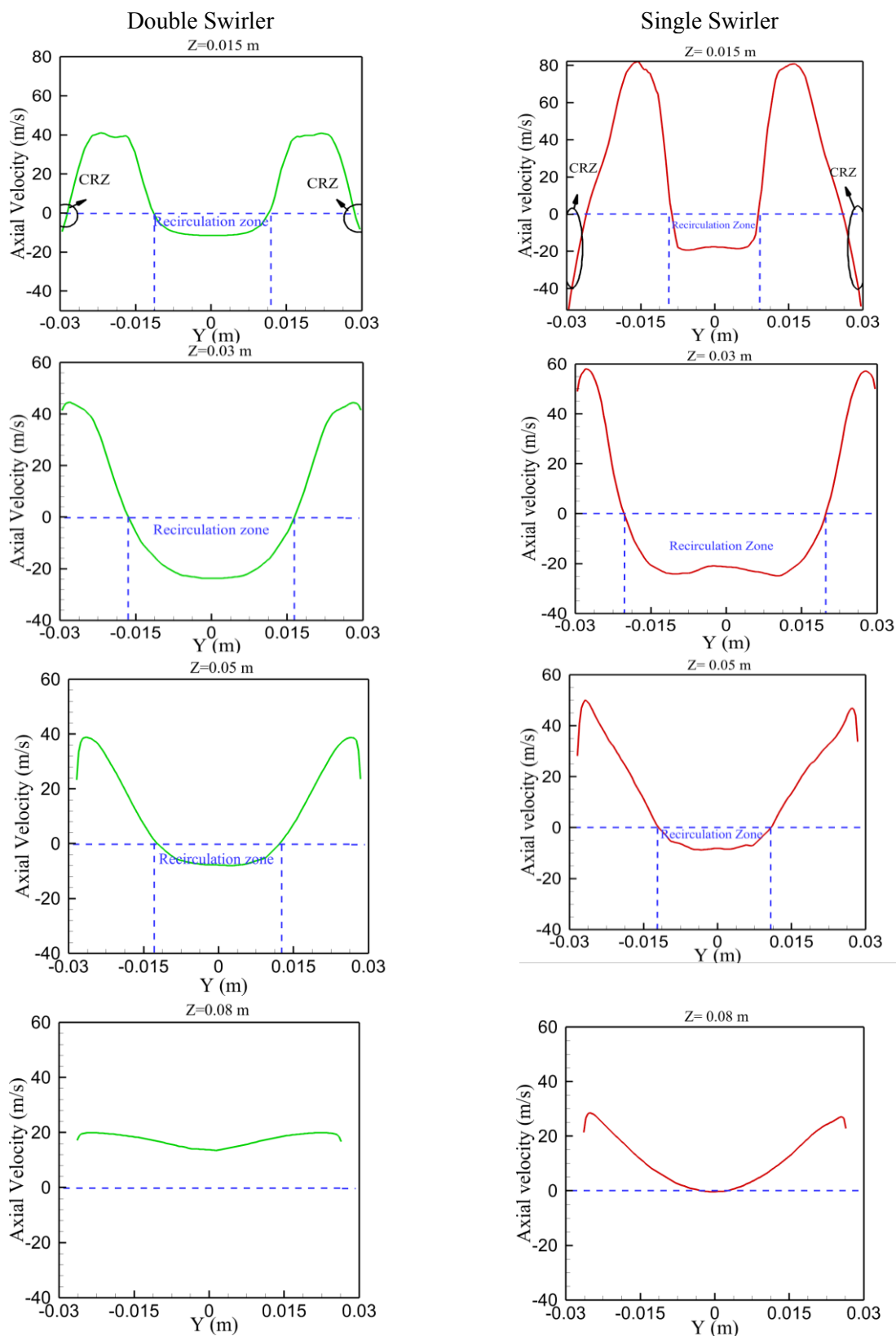
شکل ۸. کانتور توزیع سرعت محوری و نمایش نواحی گردش مجدد و خطوط جریان الف و ج) چرخاننده تک طبقه . ب و د) چرخاننده دوطبقه

Fig. 8. Axial velocity distribution contour and display of recirculation zones and streamlines. a and c) Single swirler . b and d) Double swirler

۳-۳- توزیع سرعت مماسی

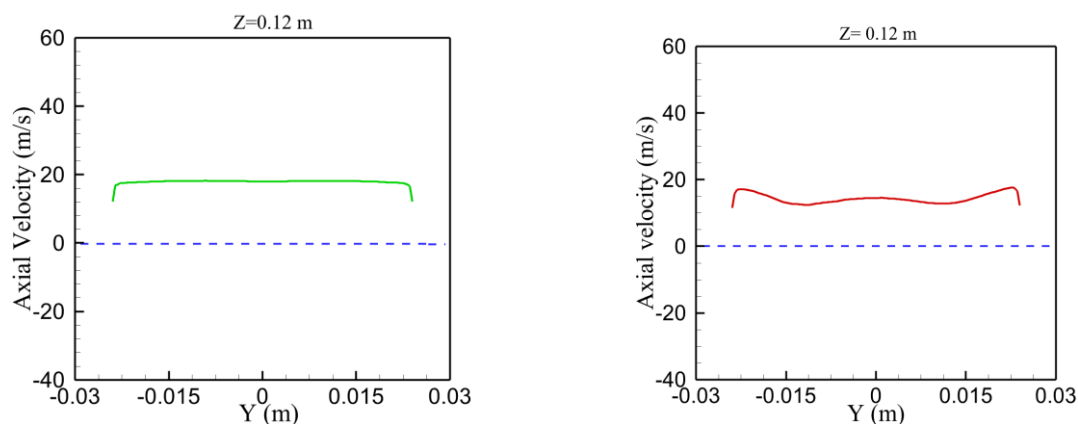
پشت شعله‌نگهدار رسانیده و موجب بهبود احتراق گردد. همانطور که مشاهده می‌شود با پیشروی به سمت پایین‌دست محفظه، ناحیه گردش مجدد داخلی کوچکتر شده بطوریکه در مقاطع خاصی در پایین دست چرخاننده، اثری از نواحی گردش مجدد دیده نمی‌شود. به منظور درک بهتر تغییرات سرعت محوری و مقایسه پروفیل سرعت مربوط به چرخاننده دوطبقه و تک طبقه و همچنین بدلیل تغییرات شدید پروفیل جریان و ناحیه گردش مجدد در گوشه برای هر دو چرخاننده، پروفیل سرعت بی‌بعد شده با سرعت ورودی برای هر دو چرخاننده در مقطع $Z = 0.15 \text{ m}$ در شکل ۱۱

شکل ۱۰ توزیع سرعت مماسی جریان بعد از چرخاننده دوطبقه و چرخاننده تک طبقه را نشان می‌دهد. توزیع سرعت مماسی درواقع شدت چرخش جریان درون محفظه و بعد از چرخاننده را نمایان می‌سازد. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود، توزیع سرعت مماسی مربوط به چرخاننده تک طبقه در نزدیکی خروجی چرخاننده، مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد که این موجب تثبیت شعله شده و اختلاط در نواحی اولیه را افزایش می‌دهد. هر چه مقدار چرخش بالاتر باشد، جریان می‌تواند خود را به نشیمنگاه شعله در



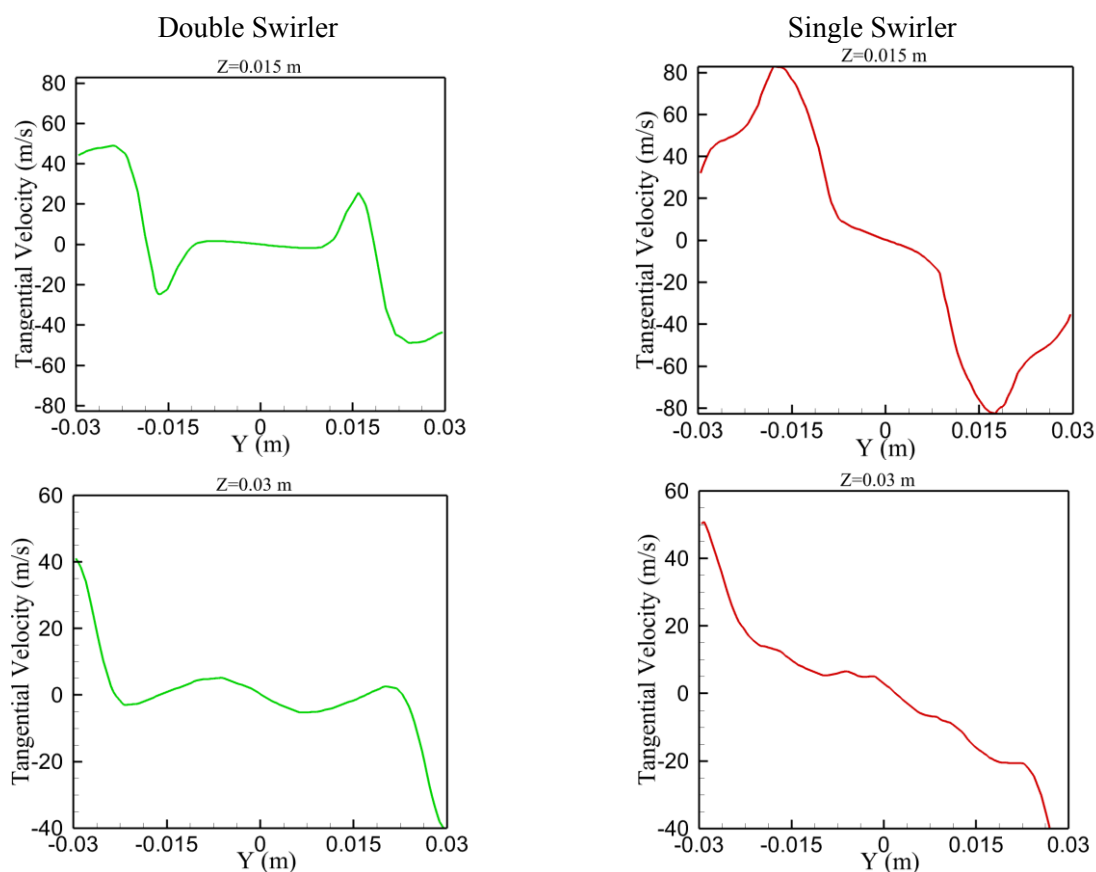
شکل ۹. توزیع سرعت محوری در مقاطع مختلف مربوط به چرخاننده تک طبقه (شکل‌های سمت راست) و چرخاننده دوطبقه (شکل‌های سمت چپ) (ادامه دارد)

Fig. 9. Axial velocity distribution in different sections for single swirler(right figures) and double swirler (left figures).(Continued)



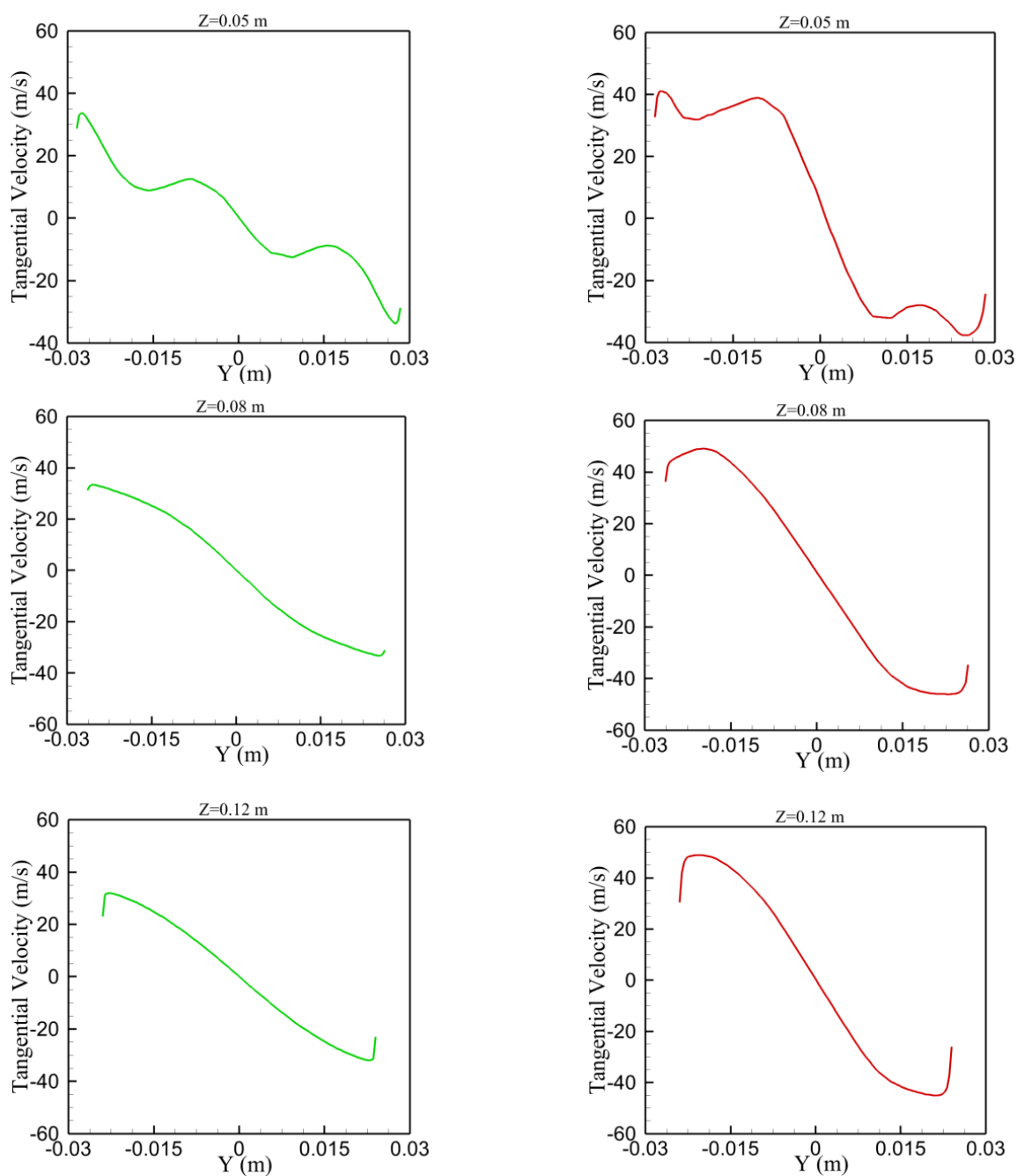
شکل ۹. توزیع سرعت محوری در مقاطع مختلف مربوط به چرخاننده تک طبقه (شکل‌های سمت راست) و چرخاننده دوطبقه (شکل‌های سمت چپ)

Fig. 9. Axial velocity distribution in different sections for single swirler(right figures) and double swirler (left figures).



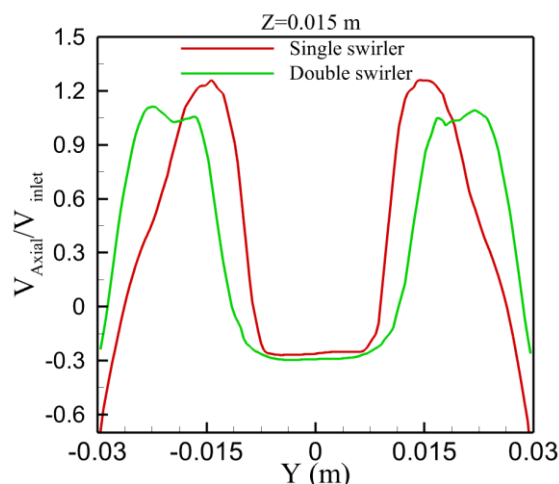
شکل ۱۰. توزیع سرعت مماسی در مقاطع مختلف مربوط به چرخاننده تک طبقه (شکل‌های سمت راست) و چرخاننده دوطبقه (شکل‌های سمت چپ). (ادامه دارد)

Fig. 10. Tangential velocity distribution in different sections for single swirler(right figures) and double swirler (left figures). (Continued)



شکل ۱۰. توزیع سرعت مماسی در مقاطع مختلف مربوط به چرخاننده تک طبقه (شکل‌های سمت راست) چرخاننده دوطبقه (شکل‌های سمت چپ)

Fig. 10. Tangential velocity distribution in different sections for single swirler(right figures) and double swirler (left figures)



شکل ۱۱. مقایسه توزیع سرعت بی بعد جریان مربوط به چرخاننده دوطبقه و چرخاننده تک طبقه.

Fig. 11. Comparison of dimensionless flow velocity distribution for a double swirler and a single swirler.

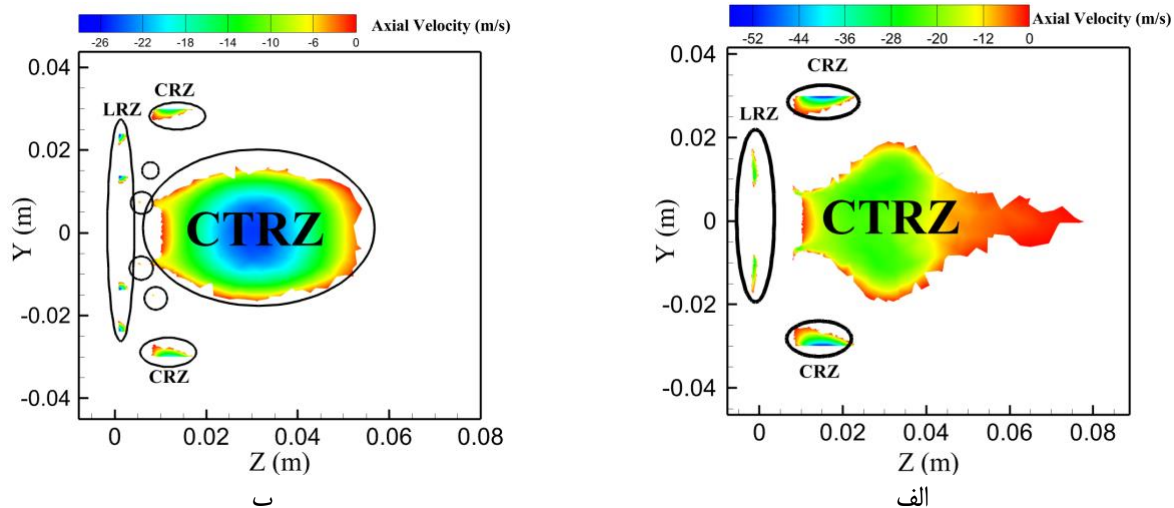
وقتی از چرخاننده دوطبقه استفاده می‌شود، چهار ناحیه گردش مجدد علاوه بر نواحی ذکر شده در بخش‌های قبلی مشاهده می‌شود که می‌تواند موجب بهبود اختلاط و آشفته‌گی جریان گردد. همانطور که شکل زیر نشان می‌دهد، ناحیه گردش مجدد مرکزی مربوط به چرخاننده دوطبقه، در مقطع $Z = 0.056 \text{ m}$ و برای چرخاننده تک طبقه در مقطع $Z = 0.08 \text{ m}$ از بین می‌رود.

این نشان می‌دهد که ناحیه گردش مجدد مرکزی بعد از چرخاننده تک طبقه بزرگتر از ناحیه تشکیل شده توسط چرخاننده دو طبقه است. همانطور که در قسمتهای قبل ذکر شد، هندسه چرخاننده و محفظه در تشکیل و سائز ناحیه گردش مجدد تاثیر خواهد گذاشت. ناحیه گردش مجدد بزرگتر علی رغم ایجاد یک ناحیه چرخشی بمنظور اختلاط بهتر سوخت و هوا، موجب افت فشار بیشتر درون محفظه می‌گردد که در بخش مربوط به افت فشار، به تفصیل راجع به آن صحبت شده است. همچنین مشاهده می‌شود که چرخاننده دوطبقه، با اینکه ناحیه گردش مجدد مرکزی و ناحیه گردش مجدد گوشه با مساحت کمتر نسبت به چرخاننده تک طبقه ایجاد می‌کند، اما تعداد نواحی گردش مجدد ایجاد شده در لبه، توسط این چرخاننده، بیشتر از نواحی گردش مجدد لبه ایجاد شده توسط چرخاننده تک طبقه می‌باشد. شکل ۱۳ توزیع سرعت محوری در راستای خط مرکزی محفظه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص شده، قسمتی از نمودار که در بخش منفی محور عمودی قرار گرفته است، نشان‌دهنده ناحیه گردش مجدد مرکزی می‌باشد و طول خط قرمز نشان داده شده، بیانگر بیشینه طول ناحیه گردش

نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود مقدار بیشینه سرعت در این مقطع برای چرخاننده تک طبقه بیشتر از چرخاننده دوطبقه می‌باشد. بالاتر بودن مقدار سرعت مماسی در محفظه احتراق دارای چرخاننده تک طبقه نشان می‌دهد که اختلاط سریعتر شروع شده و جریان بلافاصله و سریعتر نسبت به حالت چرخاننده دوطبقه شروع به آشفته شدن می‌کنند. وجود نوسانات در نمودار سبز رنگ که مربوط به چرخاننده دوطبقه می‌باشد به دلیل برهمکنش بین جریان‌های چرخشی داخلی و بیرونی می‌باشد. این نوسانات نوسانات می‌تواند از ناپایداری‌هایی مانند ریزش گردابه، هسته‌های گردابی یا دیگر ساختارهای آشفته‌ای که به‌طور طبیعی در نوسان هستند، ناشی شوند. نقاط پیک، مربوط به نواحی با چرخش بالا می‌باشد. در چرخاننده دوطبقه، دو ناحیه اصلی با سرعت بالا مشاهده می‌شود که توسط چرخاننده‌های داخلی و بیرونی ایجاد شده است. دو جریان چرخشی داخلی و بیرونی به راحتی با هم ادغام نمی‌شوند و بیشتر تمایل به جدا شدن از هم دارند. این مسئله منجر به ایجاد نوسانهای مشابه نوسانات موجود در شکل ۱۱ می‌گردد.

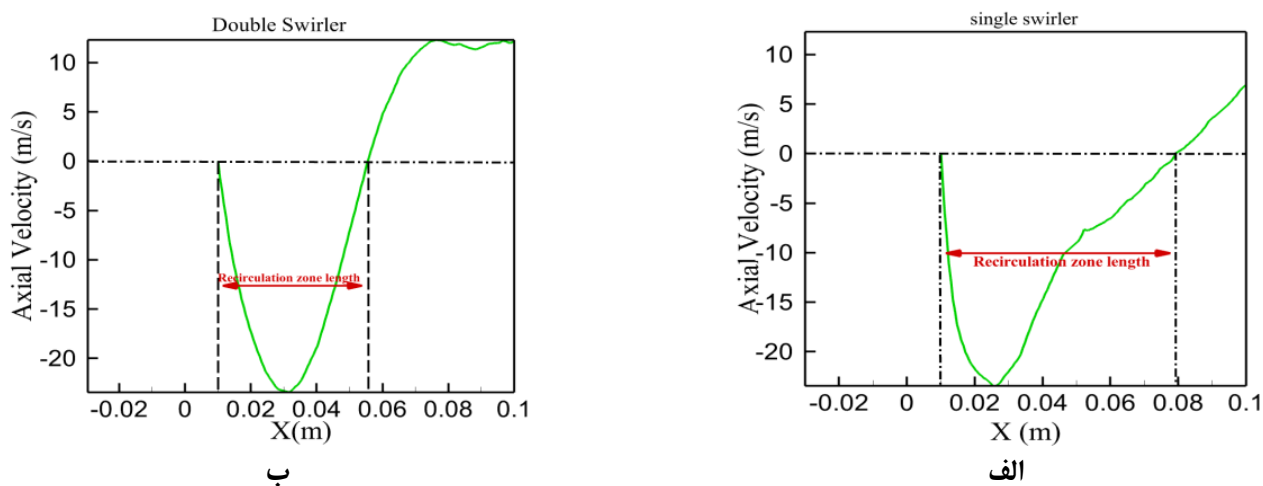
۳-۴- طول ناحیه گردش مجدد

شکل ۱۲ نواحی با سرعت کمتر از صفر مربوط به محفظه احتراق دارای چرخاننده تک طبقه و دوطبقه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نواحی گردش مجدد مرکزی و گوشه در محفظه با چرخاننده تک طبقه، بزرگتر از نواحی متناظر در محفظه با چرخاننده دوطبقه می‌باشد. همچنین



شکل ۱۲. نواحی دارای سرعت منفی یا سرعت صفر الف) چرخاننده تک طبقه ب) چرخاننده دوطبقه

Fig. 12. Areas with negative or zero velocity. Right) single swirler. Left) double swirler



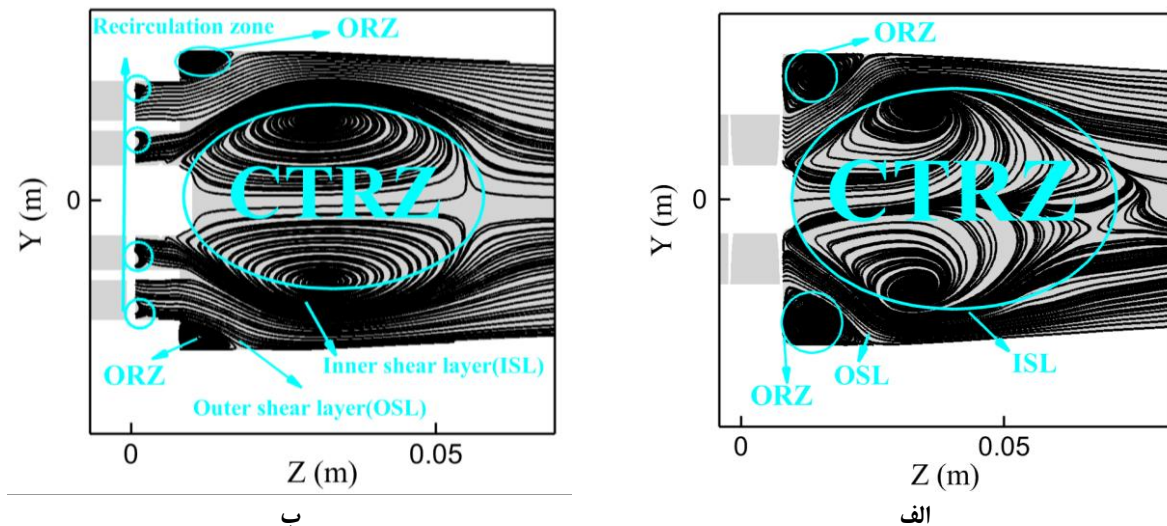
شکل ۱۳. طول ناحیه گردش مجدد الف) چرخاننده تک طبقه ب) چرخاننده دوطبقه.

Fig. 13. Length of recirculation zone Right) single swirler Left) double swirler.

۳-۵- خطوط جریان و نواحی گردش مجدد

شکل ۱۴ خطوط جریان را در یک مقطع دوبعدی نشان می‌دهد. نواحی چرخشی در مرکز، گوشه و لبه در شکل مشخص شده است. در مرکز صفحه نشان داده شده دو ناحیه چرخشی بعنوان ناحیه گردش مجدد مرکزی شناخته می‌شوند. با مشاهده کانتور توزیع سرعت محوری در شکل ۹ که شامل نواحی گردش مجدد مرکزی و نواحی گردش مجدد گوشه می‌باشد، این موضوع

مجدد مرکزی می‌باشد. با تطبیق شکل ۱۳ و شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که طول ناحیه گردش مجدد مرکزی مربوط به چرخاننده تک طبقه و چرخاننده دوطبقه به ترتیب ۰/۰۷ متر و ۰/۰۴۶ متر می‌باشد. همچنین با تطبیق شکل ۱۲ و شکل ۹ می‌توان گفت وسعت ناحیه چرخشی در گوشه محفظه مربوط به چرخاننده تک طبقه بزرگتر از ناحیه متناظر مربوط به چرخاننده دوطبقه می‌باشد.



شکل ۱۴. طرحواره میدان جریان به همراه خطوط جریان بعد از چرخاننده (الف) محفظه با چرخاننده تک طبقه (ب) محفظه با چرخاننده دوطبقه.

Fig. 14. Schematic of flow field with streamline in downstream of swirler. a) Chamber with single swirler . b) Chamber with double swirler.

بین جریان‌های با سرعت و جهت مختلف منجر به تولید گردابه‌های کوچکتر می‌شود که به آشفتگی منتقل شده و از طریق مکانیزم‌های مختلف، نظیر کشش و شکست گردابه‌ها، شدت آشفتگی را افزایش می‌دهد. در چرخاننده دوطبقه، این لایه‌های برشی ناشی از اختلاف سرعت و جهت در دو جریان چرخشی داخلی و خارجی، تولید آشفتگی را نسبت به حالت سوئیرلر منفرد به شدت افزایش می‌دهند. مشاهده می‌شود که یک ناحیه چرخشی داخلی قوی در امتداد خط مرکزی محوری و دو ناحیه چرخش خارجی در نزدیکی دیواره‌ها، سوخت تزریق شده را مجبور می‌کند که بین نواحی چرخشی داخلی و خارجی در داخل لایه‌های برشی جریان یابد. این به معنای وجود شکست گردابه قوی در داخل محفظه می‌باشد. ناحیه چرخشی لبه ناحیه است که در نزدیکی لبه چرخاننده (در بیشتر موارد، سوئیر دوطبقه) قرار می‌گیرد و نقش مهمی در اختلاط سوخت و هوا خواهد داشت.

۳-۶- انرژی جنبشی آشفتگی

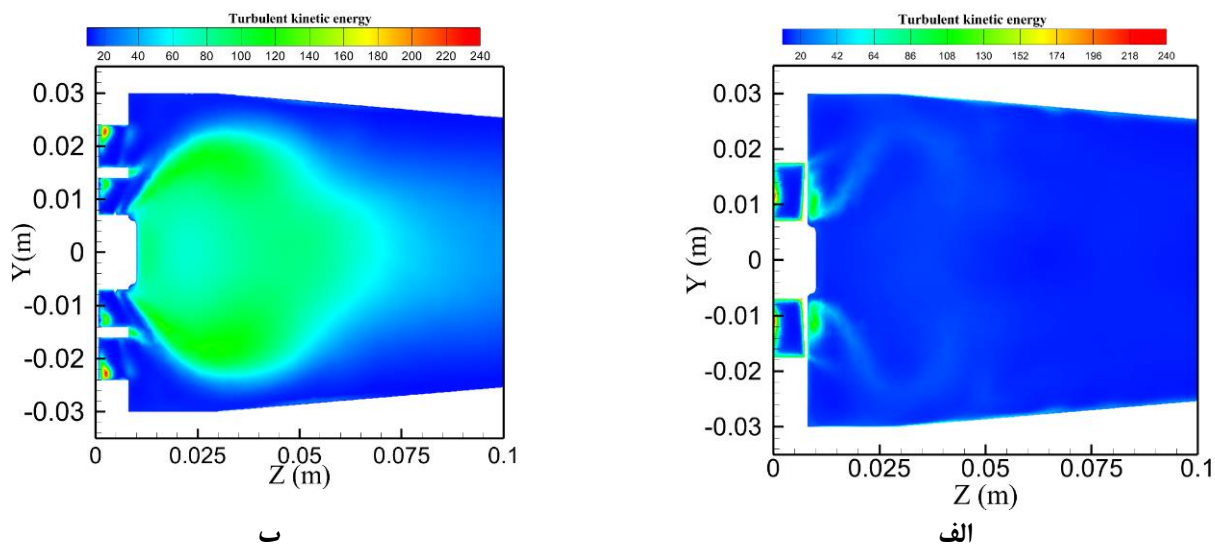
انرژی جنبشی آشفتگی^۲، اندازه‌گیری انرژی موجود در گردابه‌های آشفته یک جریان سیال می‌باشد. این یک پارامتر مهم در درک و پیش‌بینی رفتار جریان‌های متلاطم به‌ویژه در محفظه‌های احتراق است. انرژی جنبشی آشفته نقش مهمی در توصیف مزایای استفاده از چرخاننده دوطبقه در افزایش اختلاط سوخت و اکسندة داشت. وجود انرژی جنبشی

قابل بیان می‌باشد که از یک مقدار بحرانی (۰/۶) فراتر رفته که نهایتاً به شکست گردابه و تشکیل نواحی چرخشی در مرکز، گوشه و لبه منجر شده است. در ناحیه گردش مجدد مرکزی حلقوی، کمترین مقدار سرعت در ناحیه هسته وجود دارد، این در حالی است که در لبه‌ها مقدار سرعت بیشتر از هسته می‌باشد. تعامل بین چرخاننده درونی و بیرونی در چرخاننده دوطبقه می‌تواند الگوی جریان پیچیده‌ای ایجاد نماید که آشفتگی را حتی در نواحی گردش مجدد کوچکتر بهبود بخشد. همانطور که در بخش قبل بیان شد، اندازه ناحیه گردش مجدد تحت اثر همزمان هندسه چرخاننده و محفظه باشد. شکل ۱۴ طرحواره میدان جریان بعد از چرخاننده دو طبقه و تک طبقه را نشان می‌دهد. لایه‌های برشی داخلی^۱ و بیرونی^۲ به دلیل اختلاف سرعت بین نواحی گردش مجدد و جریان سیال ورودی به محفظه بوجود آمده‌اند.

لایه برشی داخلی ناحیه‌ای است که گازهای سوخته و نسوخته به سرعت با هم مخلوط می‌شوند و از این رو اکثر واکنش‌ها در این ناحیه انجام می‌شود. در نمودار تغییرات سرعت این ناحیه دارای بیشترین سرعت در مقایسه با سایر نواحی می‌باشد. لایه برشی بیرونی به ناحیه‌ای اطلاق می‌شود که جریان چرخشی چرخاننده بیرونی با سیال اطراف در تعامل است. این مسئله یک لایه برشی ایجاد می‌کند که با یک گرادیان سرعت بین هوای پرسرعت چرخشی بیرونی و هوای کندتر خارج از این ناحیه مشخص می‌شود. لایه‌های برشی

1. Inner Shear Layer (ISL)
2. Outer Shear Layer (OSL)

3. Turbulent Kinetic Energy (TKE)



شکل ۱۵. کانتور توزیع انرژی جنبشی آشفته‌گی (الف) محفظه با چرخاننده تک‌طبقه (ب) محفظه با چرخاننده دوطبقه.

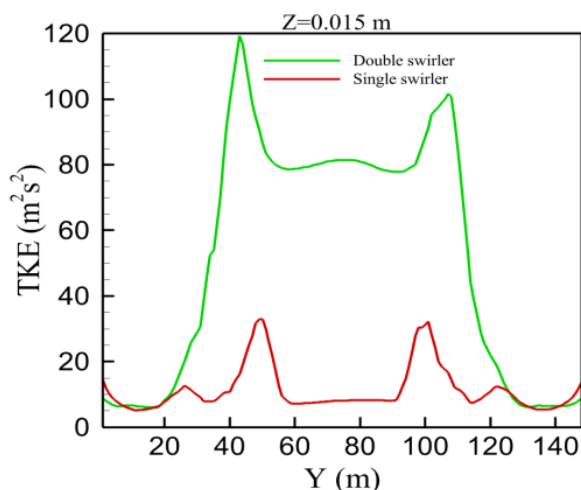
Fig. 15. Turbulence kinetic energy distribution contour a) Chamber with single swirler. b) Chamber with double swirler.

نسبت به چرخاننده تک‌طبقه دارند. این بیانگر شدت آشفته‌گی و اختلاط بالاتر و بالتبع عملکرد بهتر چرخاننده دوطبقه نسبت به چرخاننده تک‌طبقه می‌باشد. علیرغم این برتری باید گفت، افزایش بیش از حد انرژی جنبشی آشفته‌گی می‌تواند موجب افت فشار بیشتر در محفظه شده و همچنین احتمال برگشت شعله^۱ را افزایش می‌دهد [۳۶]. بیشترین مقدار این پارامتر برای چرخاننده دوطبقه و تک‌طبقه به ترتیب ۸۷ و ۱۷ می‌باشد.

شکل ۱۷ پروفیل تغییرات انرژی جنبشی آشفته‌گی را در مقطع $Z = 0.015 \text{ m}$ در پایین‌دست چرخاننده نشان می‌دهد. مقطع $Z = 0.015 \text{ m}$ به دلیل تغییرات شدید انرژی آشفته‌گی در این مقطع و همچنین وجود نواحی چرخش مجدد مرکزی و نواحی گردش مجدد گوشه از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد این شکل نشان می‌دهد که مقادیر پیک در این مقطع برای چرخاننده دوطبقه، بطور میانگین ۳ برابر نقاط پیک مربوط به چرخاننده تک‌طبقه می‌باشد. علاوه بر این، انرژی جنبشی آشفته‌گی در ناحیه چرخشی مرکزی، توزیع یکنواختی دارد. این در حالی است که ماکزیمم مقدار انرژی در لایه برشی رخ داده که می‌تواند به دلیل تعامل بین جریان چرخشی مرکزی و جریان ورودی باشد. افزایش میزان انرژی جنبشی آشفته‌گی در پایین‌دست چرخاننده برای تقویت اختلاط هوا و سوخت مورد نیاز می‌باشد. تعامل بین جریان ورودی از

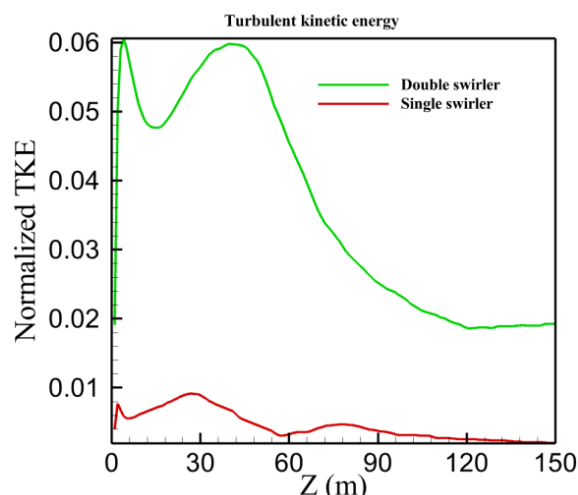
آشفته‌گی نشان‌دهنده شدت آشفته‌گی در جریان بوده که برای اختلاط موثر بسیار مهم است [۳۵]. انرژی جنبشی آشفته‌گی بالاتر باعث اختلاط بهتر سوخت و هوا شده و منجر به احتراق کارآمدتر می‌گردد. این برای دستیابی به توزیع یکنواخت دما و کاهش نقاط داغ بسیار مهم است. هنگامی که سیال از میان پره‌های چرخاننده عبور می‌کند، مؤلفه‌های سرعت محوری و مماسی در جریان القا می‌شوند که منجر به تولید گردابه‌های قوی می‌شود. این گردابه‌ها با ایجاد لایه‌های برشی در مرزهای جریان باعث افزایش نرخ تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی می‌شوند. در شکل ۱۵ کانتور توزیع این انرژی برای چرخاننده تک‌طبقه و دوطبقه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شدت توزیع انرژی جنبشی آشفته‌گی در محفظه احتراق با چرخاننده دوطبقه بیشتر از چرخاننده تک‌طبقه می‌باشد. این نشان‌دهنده انرژی کم موجود در گردابه‌ها در حالت چرخاننده تک‌طبقه می‌باشد. شکل ۱۶ تغییرات انرژی جنبشی آشفته‌گی بی‌بعد را در راستای محور جریان برای چرخاننده تک‌طبقه و چرخاننده دوطبقه نشان می‌دهد. انرژی جنبشی آشفته‌گی با مربع سرعت ورودی بی‌بعد شده است. مقدار سرعت ورودی در هر یک از حالات (محفظه با چرخاننده دوطبقه و تک‌طبقه)، ۳۸ متر بر ثانیه می‌باشد.

نمودار سبز رنگ که مقادیر انرژی جنبشی آشفته‌گی را برای حالت چرخاننده دوطبقه نشان می‌دهند، در تمام طول محفظه مقادیر بیشتری



شکل ۱۷. مقایسه پروفیل تغییرات TKE در مقطع $Z=0.015$ در پایین دست چرخاننده

Fig. 17. Comparison of TKE variation profiles at section $Z=0.015$ downstream of the swirler



شکل ۱۶. مقایسه Normalized TKE در چرخاننده تک طبقه و دوطبقه.

Fig. 16. Comparison of Normalized TKE in single swirler and double swirler

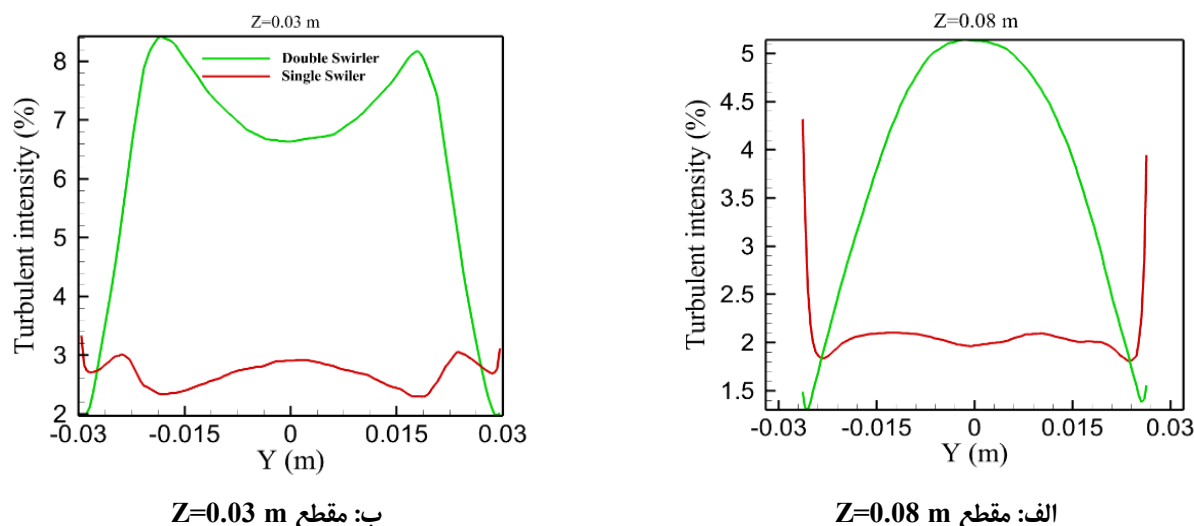
۳-۷- شدت آشفستگی^۱

شدت آشفستگی یک پارامتر کلیدی در دینامیک سیالات و مدل سازی آشفستگی می باشد که سطح تلاطم در میدان جریان را اندازه گیری می کند و به عنوان نسبت ریشه میانگین مربع^۲ نوسانات سرعت به سرعت جریان متوسط تعریف می شود. این پارامتر به صورت درصد بیان شده و نشان می دهد که تلاطم در جریان چقدر شدید می باشد. حرکت چرخشی ایجاد شده توسط چرخاننده با ایجاد تلاطم زیاد موجب افزایش اختلاط سوخت و هوا می گردد. این اختلاط کامل منجر به احتراق کامل، بهبود راندمان و کاهش انتشار می شود. شدت آشفستگی بالا پایداری شعله و توزیع یکنواخت دما را تضمین نموده و شرایط احتراق بهینه را بهبود می بخشد. شکل ۱۸ مقایسه توزیع شدت تلاطم جریان را بعد از چرخاننده تک طبقه و دوطبقه نشان می دهد. نقاط پیک در نمودار سبزرنگ موجود در شکل ۱۸ ب، نشان دهنده برهمکنش بین چرخاننده داخلی و بیرونی در لایه برشی می باشد که به دلیل وجود گرادیان سرعت زیاد منجر به افزایش آشفستگی و اختلاط می گردد. با توجه به شکل، بیشینه شدت تلاطم جریان در مقاطع $Z = 0.015$ m مربوط به چرخاننده تک طبقه ۳٪ می باشد. این در حالی است که بیشینه این مقدار برای چرخاننده دوطبقه ۸/۵٪ می باشد. بطور متوسط شدت تلاطم برای چرخاننده

چرخاننده داخلی و چرخاننده بیرونی عامل ایجاد عدم تقارن در نمودار انرژی جنبشی آشفستگی مربوط به چرخاننده دوطبقه می باشد. در واقع می توان گفت چرخاننده داخلی، تقارن توزیع سزعت محوری چرخاننده بیرونی را از بین می برد و بالعکس.

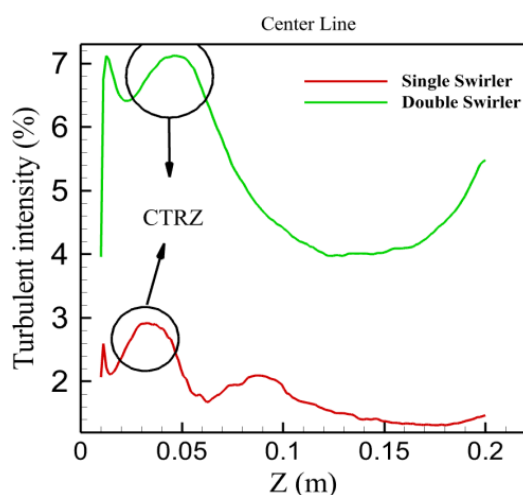
در یک چرخاننده تک طبقه، ساختار جریان نسبتاً ساده تر بوده و یک الگوی چرخشی مشخص با یک سرعت مماسی و یک سرعت محوری غالب تولید می شود. این جریان در ناحیه پس از چرخاننده به سرعت توسعه می یابد و به دلیل گرادیان های سرعت کمتر، شدت آشفستگی محدودتری نسبت به حالت دوطبقه دارد. با این حال، سرعت محوری و مماسی در این حالت به دلیل عدم تداخل دو لایه چرخشی، بیشتر باقی می ماند. در مقابل، در چرخاننده دوطبقه دو مجموعه پره با جهت چرخش مخالف وجود دارد که جریان را با دو جهت و سرعت چرخشی متفاوت عبور می دهد. این امر منجر به ایجاد یک ساختار جریان پیچیده شامل لایه های برشی قوی تر بین دو جریان چرخشی، افزایش تبادل انرژی بین مقیاس های مختلف آشفستگی، تشدید نرخ تولید انرژی جنبشی آشفستگی، گسترش ناحیه چرخش مجدد مرکزی می گردد. در نتیجه، میزان آشفستگی در این حالت به میزان قابل توجهی افزایش می یابد و باعث افزایش نرخ اختلاط سوخت و هوا و بهبود یکنواختی احتراق می شود.

1. Turbulent Intensity
2. Root Mean Square



شکل ۱۸. مقایسه شدت آشفتگی در مقاطع مختلف بعد از چرخاننده

Fig. 18. Comparison of turbulence intensity at different sections downstream of the swirler



شکل ۱۹. مقایسه شدت آشفتگی در خط مرکزی.

Fig. 19. Comparison of turbulence intensity at the centerline.

افزایش شدت آشفتگی و تشکیل تعداد بیشتر ناحیه بازچرخش در حالت چرخاننده دوطبقه باعث افزایش زمان اقامت سیال در محفظه احتراق شده و به تثبیت شعله کمک می‌کند. همچنین، آشفتگی بیشتر منجر به بهبود اختلاط سوخت و هوا شده و احتراقی کامل‌تر و کارآمدتر ایجاد می‌کند. در مقابل، در چرخاننده منفرد، گرچه سرعت‌های بالاتری وجود دارد، اما اختلاط

تک‌طبقه ۲/۵٪ و برای چرخاننده دوطبقه ۵/۵٪ می‌باشد. همانطور که در پاراگراف قبل گفته شده، شدت تلاطم بیشتر منجر به اختلاط بهتر و بیشتر سوخت و هوا خواهد شد. البته لازم بذکر می‌باشد که افزایش بیش از حد شدت آشفتگی می‌تواند موجب نوسانات شعله و نهایتاً خاموشی شعله گردد. شکل ۱۹ تغییرات شدت آشفتگی را در امتداد محور مرکزی محفظه نشان می‌دهد. در خروجی چرخاننده شدت آشفتگی روند صعودی داشته و سپس کمی کاهش یافته و مجدداً روند صعودی تکرار می‌شود. در پروفیل تغییرات شدت آشفتگی مربوط به چرخاننده دوطبقه که با رنگ سبز در شکل مشخص شده است، در فاصله مشخصی بعد از چرخاننده، شدت آشفتگی در بازه ۲۰ میلی‌متر تا ۶۰ میلی‌متر (در شکل مشخص شده است) نسبت به سایر نقاط به طور متوسط مقادیر بالاتری را داراست. این بازه منطبق بر هسته ناحیه گردش مجدد مرکزی می‌باشد. شدت آشفتگی در ناحیه گردش مجدد مرکزی، بیشتر از سایر نواحی محفظه می‌باشد. برای چرخاننده تک‌طبقه هم همین موارد قابل ذکر می‌باشد، بطوریکه ناحیه گردش مجدد مرکزی در بازه تقریبی ۲۰ میلی‌متر تا ۵۰ میلی‌متر بطور متوسط بیشترین مقدار شدت آشفتگی را داراست. بنابراین بطور خلاصه می‌توان گفت نقاط پیک مربوط به نمودار در حالت چرخاننده دوطبقه، نسبت به چرخاننده تک‌طبقه مقادیر بیشتری را داراست، بالاتر بودن نقاط پیک نمودار نشانگر شدت اختلاط شدیدتر و موثرتر با استفاده از چرخاننده دوطبقه می‌باشد.

ممکن است به اندازه حالت دوطبقه مؤثر نباشد.

۴- نتیجه‌گیری

تغییرات در هندسه چرخاننده به منظور دستیابی به اندازه بهینه ناحیه گردش مجدد و متعاقباً اختلاط بهتر سوخت و هوا اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بعنوان مثال تغییر در هندسه پره چرخاننده از حالت تخت به پره انحنادار می‌تواند ناحیه گردش مجدد بزرگتر و نواحی برشی قوی‌تری ایجاد نماید [۳۷]. استفاده از چرخاننده با دو ردیف پره بجای استفاده از چرخاننده با یک ردیف پره، اگر بر اساس ملاحظات طراحی آیرودینامیکی صورت پذیرد، می‌تواند عملکرد چرخاننده و محفظه را بهبود بخشیده و احتراق با بالاترین کیفیت را تضمین نماید. چرخاننده تک‌طبقه ناحیه چرخش مجدد مرکزی بزرگتری ایجاد می‌نماید که این به پایداری شعله کمک نموده و یک ناحیه بزرگ جهت لنگر انداختن^۱ شعله فراهم می‌نماید اما موجب افت فشار بیشتر درون محفظه می‌گردد. مزیت دیگر چرخاننده تک‌طبقه شدت چرخش بالاتر بوده که موجب تثبیت شعله شده و اختلاط را در نواحی اولیه افزایش می‌دهد. اما انرژی جنبشی آشفته‌گی و شدت آشفته‌گی با مقادیر کمتری را در محفظه احتراق با چرخاننده تک‌طبقه شامل می‌شود. این موجب کاهش نرخ اختلاط سوخت و هوا شده و بازده احتراق کمتری را نتیجه می‌دهد. در مورد چرخاننده دوطبقه باید گفت، انرژی جنبشی آشفته‌گی و شدت آشفته‌گی بالاتر، موجب افزایش اختلاط سوخت و هوا، بهبود بازده احتراق و توزیع دمایی یکنواخت‌تر می‌گردد. استفاده از چرخاننده‌های دوطبقه می‌تواند یک ناحیه چرخش مرکزی قوی‌تر ایجاد نمایند، که به عنوان نگهدارنده شعله عمل نموده و تثبیت فرآیند احتراق را بهبود می‌بخشد. همچنین استفاده از چرخاننده دوطبقه نسبت به چرخاننده تک‌طبقه، تعداد نواحی گردش مجدد بیشتری ایجاد می‌کند که می‌تواند موجب اختلاط بهتر و احتراق پایدارتر گردد. علاوه بر این، پتانسیل بیشتر برای اختلاط در ناحیه ثانویه را ایجاد می‌نماید (اختلاط بهتر در پایین‌دست که توسط چرخاننده دوطبقه ایجاد شده و موجب کامل شدن احتراق و کاهش باقیمانده سوخت می‌گردد، بیشتر در حوزه توربین‌گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد). همچنین شدت چرخش کمتری در جریان درون محفظه احتراق با چرخاننده دوطبقه در مقایسه با محفظه با چرخاننده تک‌طبقه مشاهده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از این مطالعه استفاده از چرخاننده دوطبقه برای توربین‌های گازی مدرن که در فشارهای بحرانی کار می‌کنند، جایی که اتمیزه‌سازی و اختلاط کارآمد

حائز اهمیت است، توصیه می‌گردد. افزایش راندمان اختلاط و احتراق امکان طراحی محفظه احتراق کوتاه‌تری را فراهم می‌کند که برای کاربردهای هوافضایی مفید می‌باشد. افت فشار پایین به ویژه برای کاربردهای موتورهای هوایی با تراست بالا، جایی که به حداقل رساندن تلفات فشار حیاتی است، مناسب می‌باشد.

بعنوان پیشنهادات ادامه مطالعات در این حوزه می‌توان به بررسی عملکرد هندسه‌های چرخاننده جدید، مانند مقطع بیضی یا چرخاننده شعاعی، اثرات چرخاننده‌های چند مرحله‌ای با پیکربندی‌های مختلف (مانند، پیکربندی‌های متحدالمرکز) بمنظور بهینه‌سازی پایداری شعله و کاهش انتشار آلاینده‌گی، بررسی تأثیر چرخاننده‌های دوطبقه بر احتراق سوخت‌های جایگزین (مانند هیدروژن یا بیوگاز)، انجام مطالعات دقیق در مورد رابطه بین زاویه تیغه چرخان، نسبت هم‌ارزی، و انتشار آلاینده‌ها و تمرکز بر چگونگی تأثیر تولید گردابه‌ها بر تولید ناکس و کنترل انتشار اشاره نمود.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

D	قطر چرخاننده، cm
D_{hub}	قطر داخلی چرخاننده، cm
$D_{swirler}$	قطر بیرونی چرخاننده، cm
S_n	عدد چرخش
R_0	شعاع بیرونی، cm
R_i	شعاع داخلی، cm
u	سرعت محوری، m/s
w	سرعت مماسی، m/s

علائم یونانی

θ	زاویه بین پره چرخاننده و محور مرکزی محفظه
----------	---

منابع

- [1] G. Lopez-Ruiz, J. Blanco, A. Peña, N. Romero-Anton, Z. Azkorra-Larrinaga, CFD study of flameless combustion in a real industrial reheating furnace considering different H₂/NG blends as fuel, International Journal of Hydrogen Energy, 49 (2024) 1362-1374
- [2] P.C. Nassini, D. Pampaloni, R. Meloni, A. Andreini, Lean

- [12] Y.C. See, M. Ihme, Large-Eddy Simulation of a Gas Turbine Model Combustor, in: 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2013, pp. 172.
- [13] P. Weigand, W. Meier, X.R. Duan, W. Stricker, M. Aigner, Investigations of swirl flames in a gas turbine model combustor: I. Flow field, structures, temperature, and species distributions, *Combustion and flame*, 144(1-2) (2006) 205-224.
- [14] Y.C. See, M. Ihme, LES investigation of flow field sensitivity in a gas turbine model combustor, in: 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014, pp. 0621.
- [15] A. Mardani, A. Fazlollahi-Ghomshi, Numerical investigation of a double-swirled gas turbine model combustor using a RANS approach with different turbulence–chemistry interaction models, *Energy & Fuels*, 30(8) (2016) 6764-6776
- [16] C. Liu, J. Yang, Q. Dong, C. Lai, J. Zhao, J. Lin, M. Liu, Experimental and numerical study on flow field characteristics of a combustion chamber with double-stage counter-rotating swirlers, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 151 (2024) 107245.
- [17] S. Barakat, H. Wang, T. Jin, W. Tao, G. Wang, Isothermal swirling flow characteristics and pressure drop analysis of a novel double swirl burner, *AIP Advances*, 11(3) (2021).
- [18] D. Kallifronas, P. Ahmed, J.C. Massey, M. Talibi, A. Ducci, R. Balachandran, N. Swaminathan, K. Bray, Influences of heat release, blockage ratio and swirl on the recirculation zone behind a bluff body, *Combustion Science and Technology*, 195(15) (2023) 3785-3809.
- [19] Y. Shen, M. Ghulam, K. Zhang, E. Gutmark, C. Duwig, Vortex breakdown of the swirling flow in a lean direct injection burner, *Physics of Fluids*, 32(12) (2020).
- [20] G. Vignat, D. Durox, S. Candel, The suitability of different swirl number definitions for describing swirl flows: Accurate, common and (over-) simplified blow-out prediction in an industrial gas turbine combustor through a LES-based CFD analysis, *Combustion and Flame*, 229 (2021) 111391.
- [3] E. Lekzian, H. Farshi Fasih, R. Modanlou, Aerothermodynamic off-design performance study of a fixed double bypass duct turbofan engine, *The Journal of Engine Research*, 70(3) (2023) 62-75
- [4] E. Lekzian, and R. Modanlou, Performance Study of Separate Exhaust Innovative Turbofan Engine Configurations with the Control Mechanism of a Baseline Engine. *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 2024(Articles in Press).
- [5] M.R. Abdulwahab, K.A. Al-attab, I.A. Badruddin, M.N. Bashir, J.S. Lee, Biofuels spray and combustion characteristics in a new micro gas turbine combustion chamber design with internal exhaust recycling, *Case Studies in Thermal Engineering*, 65 (2025) 105595.
- [6] A.C. Fernandez-Pello, Micropower generation using combustion: Issues and approaches, *Proceedings of the combustion institute*, 29(1) (2002) 883-899.
- [7] D. Chen, S. Serbin, K. Burunsuz, Features of a gas turbine combustion chamber in operation with gaseous ammonia, *Fuel*, 372 (2024) 132149.
- [8] A.M. Dostiyarov, I.K. Iliev, A.K. Makzumova, Numerical model and experimental research of a new two-tier micro-flame combustor for gas turbines, *Thermal Science*, (00) (2024) 141-141.
- [9] E. Lekzian, M. Sabouri, DSMC investigation on rarefied gas mixing through diverging and converging channels, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 157 (2024) 107764.
- [10] E. Lekzian, H.R. Farshi Fasih, Effect of Obstacles Location and Flow Injection on the Mixing of Two-Gaseous Flow in a Microchannel, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 54(9) (2022) 2139-2156..
- [11] M. Darbandi, E. Lakzian, Mixing enhancement of two gases in a microchannel using DSMC, *Applied Mechanics and Materials*, 307 (2013) 166-169.

- [29] D. Huang, J. Xu, R. Chen, H. Meng, Large eddy simulations of turbulent combustion of kerosene-air in a dual swirl gas turbine model combustor at high pressures, *Fuel*, 282 (2020) 118820.
- [30] Q. Zeng, D. Zheng, Y. Yuan, Counter-rotating dual-stage swirling combustion characteristics of hydrogen and carbon monoxide at constant fuel flow rate, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7) (2020) 4979-4990.
- [31] N. Bai, W. Fan, R. Zhang, Z. Zou, C. Zhang, P. Yan, Numerical investigation into the structural characteristics of a hydrogen dual-swirl combustor with slight temperature rise combustion, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(43) (2021) 22646-22658.
- [32] Z. Fu, H. Gao, Z. Zeng, J. Liu, Q. Zhu, Generation characteristics of thermal NO_x in a double-swirler annular combustor under various inlet conditions, *Energy*, 200 (2020) 117487.
- [33] A.M. Elbaz, H. Moneib, K. Shebil, W.L. Roberts, Low NO_x-LPG staged combustion double swirl flames, *Renewable Energy*, 138 (2019) 303-315.
- [34] R. Sharma, M. Kumar, Characterizing Swirl Strength and Recirculation Zone Formation in Tangentially Injected Isothermal Flows, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 16(3) (2023) 549-560.
- [35] Y. Fu, S.-M. Jeng, R. Tacina, Confinement effects on the swirling flow generated by a helical axial swirler, in: 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2006, pp. 545.
- [36] G.I. Ilieva, On turbulence and its effects on aerodynamics of flow through turbine stages, *Turbulence modelling approaches: current state, development prospects, applications*, 143 (2017)
- [37] H.R.M. Anil, P.S.K. Gowda; S.K. Shankaregowda; S. Rajendran; S.H. Venkataramana. Analytical investigation on mixing characteristics of airfoil shaped swirler for gas turbine combustors. in AIP Conference Proceedings. 2024. AIP Publishing.
- formulations, *Progress in Energy and Combustion Science*, 89 (2022) 100969.
- [21] Y. Li, R. Li, D. Li, J. Bao, P. Zhang, Combustion characteristics of a slotted swirl combustor: An experimental test and numerical validation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 66 (2015) 140-147.
- [22] F. Vashahi, S. Lee, J. Lee, Experimental and computational analysis of the swirling flow generated by an axial counter-rotating swirler in a rectangular model chamber using water test rig, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139(8) (2017) 081501.
- [23] G. Ding, X. He, Z. Zhao, Y. Jin, Z. Zhu, Effect of different triple swirlers on the performance of a triple swirler combustor, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 229(1) (2015) 26-37.
- [24] Y. Tong, X. Liu, Z. Wang, M. Richter, J. Klingmann, Experimental and numerical study on bluff-body and swirl stabilized diffusion flames, *Fuel*, 217 (2018) 352-364.
- [25] S.S. Rashwan, The effect of swirl number and oxidizer composition on combustion characteristics of non-premixed methane flames, *Energy & Fuels*, 32(2) (2018) 2517-2526.
- [26] Z. Xi, Z. Fu, X. Hu, S.W. Sabir, Y. Jiang, An experimental investigation on flame pulsation for a swirl non-premixed combustion, *Energies*, 11(7) (2018) 1757.
- [27] A.A. Hosseini, M. Ghodrat, M. Moghiman, S.H. Pourhoseini, Numerical study of inlet air swirl intensity effect of a Methane-Air Diffusion Flame on its combustion characteristics, *Case Studies in Thermal Engineering*, 18 (2020) 100610.
- [28] M. İlbaş, S. Karyeyen, İ. Yilmaz, Effect of swirl number on combustion characteristics of hydrogen-containing fuels in a combustor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(17) (2016) 7185-7191.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Yadollahi Afra, E. Lekzian, Performance Analysis of Non-Reacting Flow of a Single and Double Swirler in a Microchamber Using Numerical Simulation Method, Amirkabir J. Mech Eng., 56(12) (2025) 1663-1690.

DOI: [10.22060/mej.2025.23813.7816](https://doi.org/10.22060/mej.2025.23813.7816)

