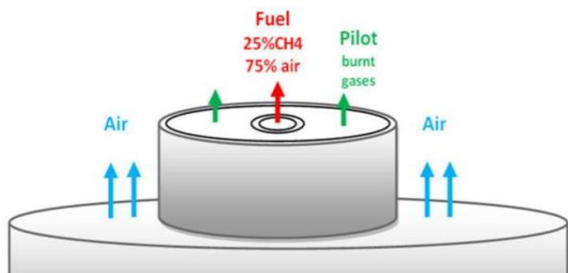


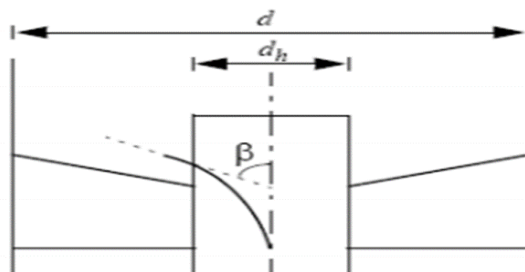
عدد چرخش، به شکل حاصل تقسیم شار تکانه چرخشی بر شار تکانه محوری بیان می‌گردد. برای محاسبه عدد چرخش یک چرخاننده به قطر داخلی d_h و قطر خارجی d از معادله ۱ بهره خواهیم برد [۱۱].

در معادله ۱، β زاویه چرخش می‌باشد. شکل ۱ کمک شایانی به درک هر چه بهتر این مسئله خواهد نمود.



شکل ۲: مشخصات هندسی محفظه احتراق SANDIA D [۱۸]

در شکل ۲، در قسمت PILOT، جریان مخلوطی از سوخت‌های H_2 و C_2H_2 و... و همچنین هوا و CO_2 و N_2 موجود می‌باشد. طول محفظه احتراق ۹۰ سانتی متر و قطر قاعده آن، ۳۰ سانتی متر می‌باشد. جدول ۱ بیانگر جزئیات هندسه محفظه احتراق می‌باشد.

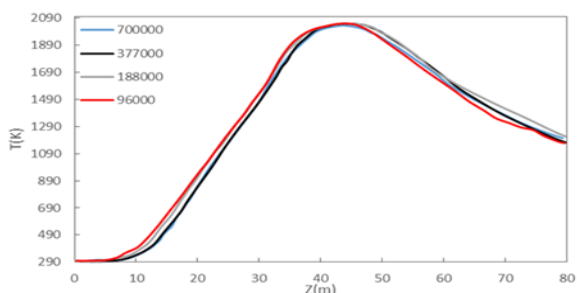


شکل ۱: شمای جانبی یک پره از چرخاننده [۱۲]

جدول ۱: مشخصات شرایط مرزی محفظه احتراق SANDIA D

مشخصه	جت اصلی	پایلوت	ورودی هوا	واحد
دمای ورودی	۲۹۴	۱۸۸۰	۲۹۱	کلوین
سرعت ورودی	۴۹٫۶	۱۱٫۴	۰٫۹	متر بر ثانیه
قطر داخلی	۷٫۲	۷٫۷	۱۹٫۹	میلی متر
قطر خارجی	۰	۱۸٫۲	۳۰۰	میلی متر
ضخامت دیواره	۰٫۲۵	۰٫۳۵	۰	میلی متر

برای شبیه سازی همراه با چرخاننده، پس از استفاده از معادله ۱ و محاسبه عدد چرخش و متعاقباً مولفه‌های سرعت، این مولفه‌ها به عنوان شرایط مرزی بر محفظه احتراق اعمال خواهند شد و شبیه سازی شکل خواهد گرفت. در ابتدا و قبل از انجام مراحل شبیه سازی نیاز به بررسی استقلال از شبکه خواهد بود. تعداد شبکه برای این مرحله، مقادیر ۹۶۰۰۰، ۱۸۸۰۰۰، ۳۷۷۰۰۰ و ۷۰۰۰۰۰ خواهند بود. در شکل ۳ و ۴ نتایج استقلال از شبکه برای نتایج دما در راستای محور احتراق و کسر جرمی متان در راستای محور X و در ارتفاع ۴۵ سانتی متری محفظه احتراق مشاهده می‌شوند. با بررسی نتایج، مشاهده می‌شود که تعداد شبکه ۳۷۷۰۰۰ برای این نوع شبیه سازی مناسب می‌باشد.



شکل ۳: نتایج استقلال از شبکه دما برای محور محفظه احتراق

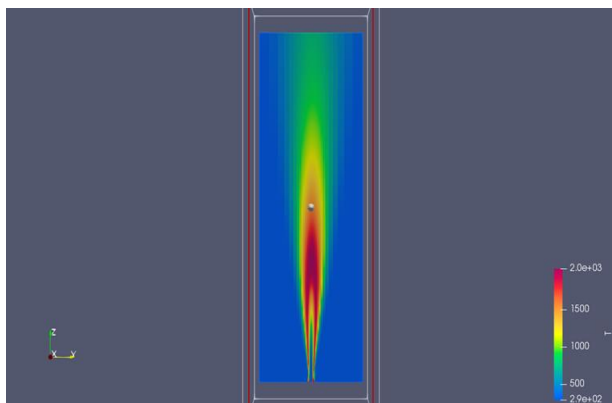
تا به حال کارهای علمی زیادی پیرامون شبیه سازی چرخاننده و تاثیر عدد چرخش بر احتراق صورت پذیرفته است که به صورت اجمالی به برخی از آن‌ها اشاره خواهد شد. فیکما و همکاران در بررسی تاثیر عدد چرخش بر پایداری شعله نشان دادند که استفاده از چرخاننده می‌تواند پایداری شعله را نسبت به حالت بدون چرخاننده بسیار افزایش دهد [۱۳]. یواسا و همکاران با چرخاندن همزمان سوخت و هوا محدوده پایداری شعله غیر پیش آمیخته هیدروژن و پروپان را بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که در اعداد چرخش بالا به دلیل ایجاد ناحیه چرخش داخلی، پایداری افزایش خواهد یافت و همچنین اینکه ایجاد چرخش همزمان سوخت و هوا باعث تاثیر بیشتری بر پایداری نسبت به حالت با چرخش هوا خواهد شد [۱۴]. ویلسون و همکاران با انجام شبیه سازی‌هایی دریافته‌اند که عملیات رقیق سازی منجر به کاهش سرعت‌های پایداری شعله خواهد شد [۱۵]. باکلی و همکاران در بررسی تاثیر چرخاننده بر تشکیل آلاینده‌ها دریافته‌اند که، تعبیه چرخاننده باعث کاهش تشکیل اکسیدهای نیتروژن و کربن دی اکسید خواهد شد [۱۶].

در تحقیق حاضر تاثیر چرخاننده با اعداد چرخش ۰، ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۶ و بررسی خواهد شد و نتایج از نظر حرارتی و انتشار آلاینده با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

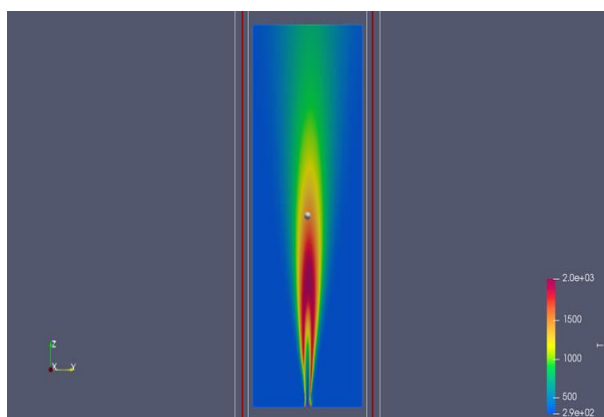
روش شبیه سازی و نتایج

در تحقیق حاضر برای چرخاننده با اعداد چرخش ۰، ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۶ روی محفظه احتراق SANDIA D [۱۷] شبیه سازی، بررسی صورت می‌پذیرد. در شبیه سازی پیش رو، از مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ و مدل احتراقی EDC و سینتیک شیمیایی GRI-MECH 3.0 و همچنین برای حل معادلات از روش RANS بهره برده خواهد شد. نرم افزار مورد استفاده جهت شبیه سازی نیز، نرم افزار متن باز openFOAM خواهد بود. سعی خواهد شد که به صورت مختصر هندسه و مشخصات محفظه احتراق معرفی گردد.

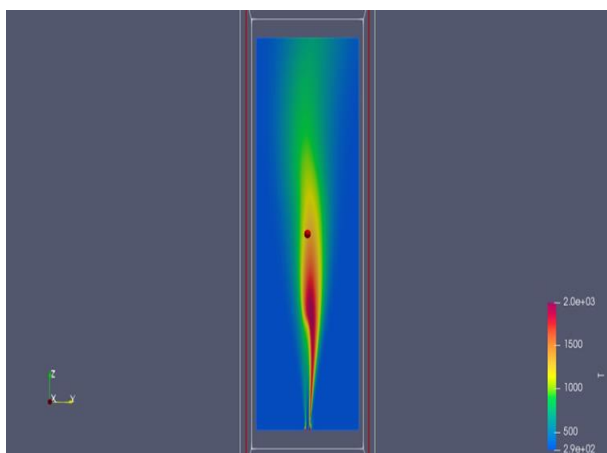
$$S = \frac{2}{3} \tan \beta \left(\frac{1 - (d_h/d)^3}{1 - (d_h/d)^2} \right) \quad (1)$$



شکل ۸: کانتور دمای مشعل با عدد چرخش ۲۵

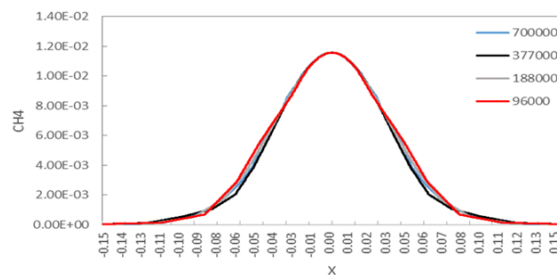


شکل ۹: کانتور دمای مشعل با عدد چرخش ۰/۵



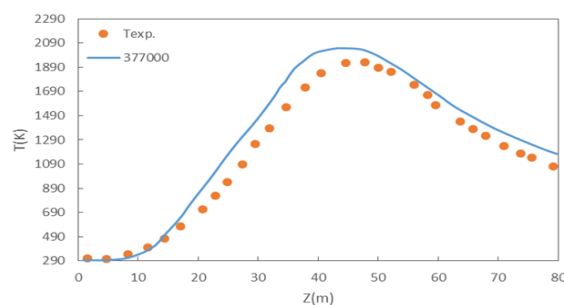
شکل ۱۰: کانتور دمای مشعل با عدد چرخش ۰/۶

همانطور که در شکل‌های ارائه شده ۷ تا ۱۰ مشخص است عدد چرخش ۰/۶ به نسبت مابقی اعداد چرخش، تقریباً شکل شعله متفاوتی دارد و حالت متقارن خود را از دست داده است که خود می‌تواند بیانگر حالت ناپایداری شعله باشد. مشاهده می‌شود که هر چه عدد چرخش افزایش می‌یابد، طول شعله کوتاه‌تر می‌شود (در مشاهده نمودارها و قله در شکل ۱۱ مشخص می‌باشد). همانطور که می‌دانیم، شکل‌های مربوط به کانتورها اطلاعات دقیق و مکفی‌ای به محققان ارائه نخواهند کرد و برای بررسی دقیق‌تر تاثیر این

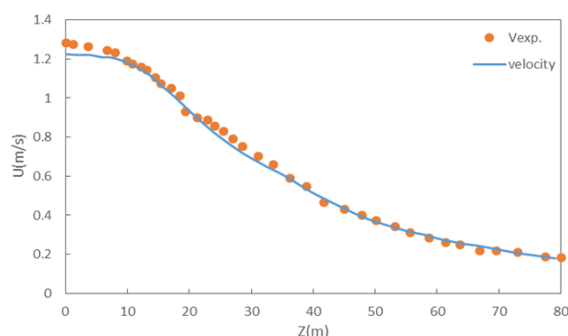


شکل ۴: نتایج استقلال از شبکه برای نتایج کسر جرمی متان در راستای محور X در ارتفاع ۴۵ سانتی متری محفظه احتراق

در ادامه برای صحت سنجی نتایج، می‌بایست که نتایج تجربی را با تعداد شبکه ۳۷۷۰۰۰ مقایسه نمود. در شکل ۴ و ۵ این نتایج برای دما و سرعت محوری در راستای محور محفظه احتراق، قابل مشاهده می‌باشند.

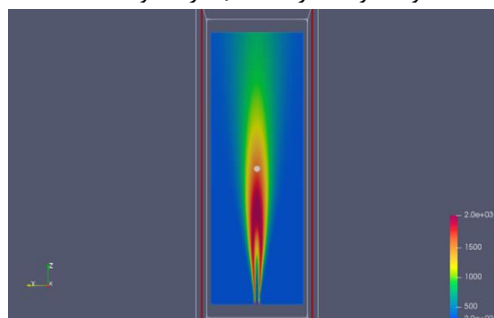


شکل ۵: اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی دما با نتایج آزمایشگاهی



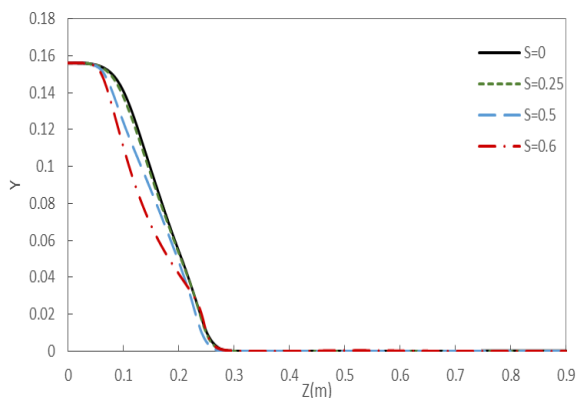
شکل ۶: اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی سرعت با نتایج آزمایشگاهی

در این مرحله، تاثیر تعبیه چرخاننده با عدد چرخش ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۰/۶ روی ورودی پایلوت بر احتراق در محفظه احتراق SANDIA D بررسی می‌شود. در ابتدا شکل‌های مربوط به کانتورهای دمای محفظه احتراق با عددهای چرخش ۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۰/۶ در صفحه z-y ارائه خواهند شد.



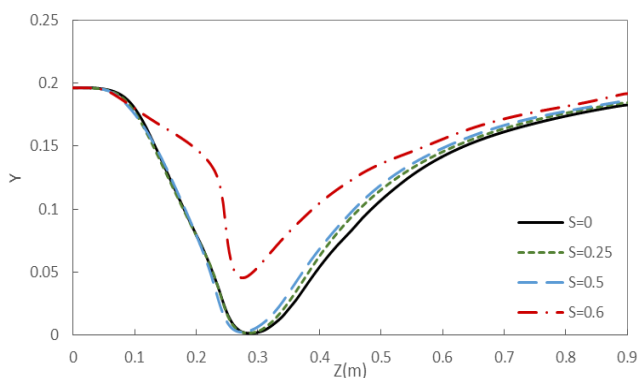
شکل ۷: کانتور دمای مشعل SANDIA D با عدد چرخش.

تغییرات می‌بایست نمودارها در راستاهای مختلف بررسی شوند. در شکل ۱۱ نمودارهای دما برای هر ۴ عدد چرخش، در راستای محور استوانه نمایش داده شده است.



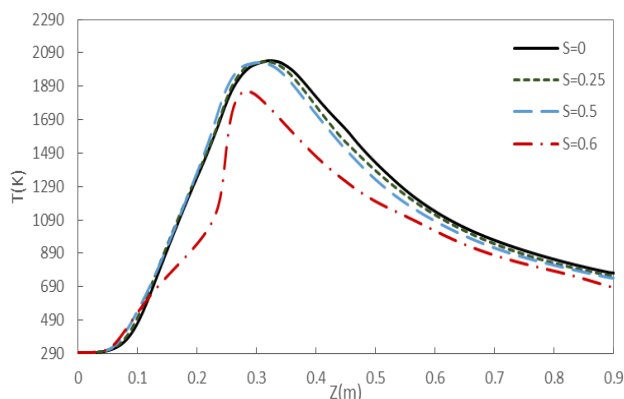
شکل ۱۳: نمودار کسر جرمی CH_4 در راستای محور محفظه احتراق

تقریباً برای هر ۴ حالت، متان در ناحیه شعله به صورت کامل مصرف شده است و تقریباً سوخت نسوخته در محصولات احتراق وجود نداشته است. باید توجه داشت که از مهم‌ترین دلایل وجود سوخت نسوخته در محصولات احتراق می‌توان به عدم اختلاط مناسب سوخت و اکسنده و یا همچنین احتراق با سوخت بسیار غنی اشاره نمود که به دلیل کمبود اکسنده کافی، مقداری سوخت نسوخته در محصولات احتراق وجود خواهد داشت. در نمودار شکل ۱۳ همانطور که قابل مشاهده می‌باشد، هر چه عدد چرخش افزایش می‌یابد، به دلیل اختلاط بهتر سوخت و هوا و همچنین یکنواخت تر شدن شرایط دمایی در محفظه احتراق، میزان مصرف متان بیشتر خواهد شد و مقدار کسر جرمی کمتری در محصولات احتراق وجود خواهد داشت. در شکل ۱۴ نمودار کسر جرمی غلظت اکسیژن در راستای محور استوانه قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به نمودارها، هر چه عدد چرخش بیشتر می‌شود، غلظت اکسیژن در راستای محور استوانه نیز بیشتر شده است. به عبارت دیگر با افزایش عدد چرخش، اکسیژن کمتری مصرف شده است.



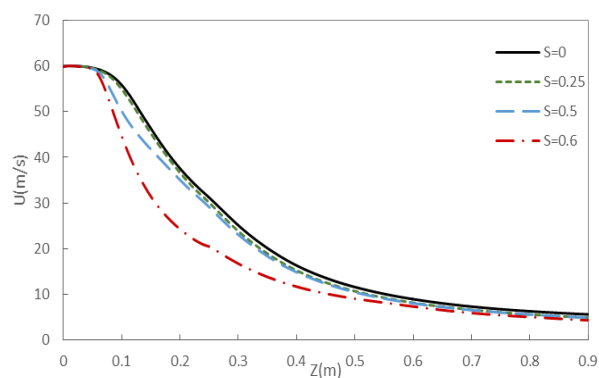
شکل ۱۴: نمودار کسر جرمی O_2 در راستای محور محفظه احتراق

در شکل ۱۵ نمودار کسر جرمی غلظت نیتروژن در راستای محور محفظه احتراق قابل رویت می‌باشد.



شکل ۱۱: نمودار دما در راستای محور محفظه احتراق

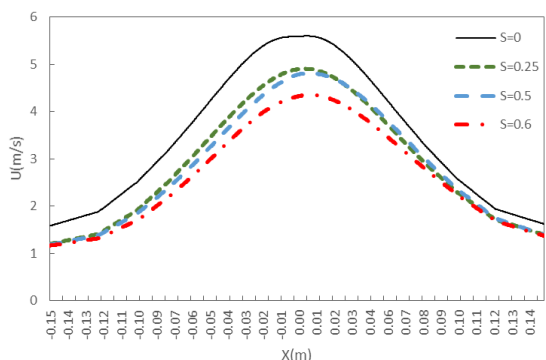
همانطور که در نمودارهای شکل ۱۱ مشخص است، شعله با عدد چرخش $0/6$ دمای پایین‌تری در مقایسه با مابقی حالات را دارا می‌باشد که همین موضوع می‌تواند باعث ایجاد تغییر در بسیاری از مشخصه‌های احتراق نظیر انتشار آلاینده‌ها شود، زیرا دما مولفه بسیار مهم و تعیین کننده‌ای می‌باشد. همچنین در ناحیه شعله (کمتر از $0/3$ متر از ابتدای مشعل) یک شکل نامنظمی را در مقایسه با مابقی حالت‌ها دارد. مشاهده می‌شود با افزایش عدد چرخش، قله دما به سمت ورودی محفظه حرکت کرده است که خود بیانگر کوتاه‌تر شدن طول شعله و پایداری بیشتر می‌باشد. شکل ۱۲ نمودار سرعت محوری در راستای محور محفظه احتراق را نمایش داده است.



شکل ۱۲: نمودار سرعت محوری در راستای محور محفظه احتراق

همانطور که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است، به ازای افزایش عدد چرخش، سرعت محوری کاهش یافته است، این مسئله کاملاً منطقی می‌باشد به این دلیل که هر چه عدد چرخش افزایش می‌یابد مولفه مماسی سرعت در مقایسه با مولفه محوری آن بزرگ‌تر خواهد شد البته یکی از دلایل دیگر ممکن است تغییر چگالی در اثر تغییر عدد چرخش باشد. در ادامه شکل‌های کسر جرمی مربوط به محصولات احتراق ارائه خواهند شد. شکل ۱۳ نمودار کسر جرمی CH_4 در راستای محور محفظه احتراق را نمایش می‌دهد.

راستای محور X مشاهده می‌شود که با افزایش عدد چرخش، سرعت روی محور مد نظر کاهش یافته است که این مسئله بیانگر کاهش چگالی با افزایش عدد چرخش می‌باشد. در شکل ۱۷ مقدار سرعت روی محور X در ارتفاع ۹۰ سانتی متری از شعله قابل مشاهده می‌باشد.



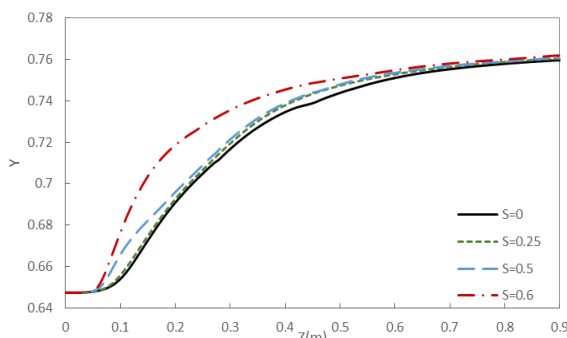
شکل ۱۷: نمودار سرعت محوری بر روی محور X در مقطع ۰/۹ متر

نتیجه گیری

پس از انجام شبیه سازی برای هر ۴ عدد چرخش نتایج مهم و مفیدی برای این محفظه احتراق به دست آمدند. در این شبیه سازی با افزایش عدد چرخش، بیشینه دمای درون محفظه احتراق تا حدودی کاهش می‌یافت. این مسئله خود کمک مهمی به عدم تشکیل اکسیدهای نیتروژن می‌نماید. اختلاط بهتر سوخت و هوا که از نتایج تعبیه چرخاننده می‌باشد خود کمک شایانی به تولید کمتر آلاینده‌ها می‌نماید. با افزایش عدد چرخش، غلظت متان در طول محور محفظه احتراق با کاهش روبرو می‌شود و همچنین در این حالت، اکسیژن کمتری جهت تشکیل واکنش احتراق مورد نیاز خواهد بود. با مرور نتایج، مشاهده می‌شود که با افزایش عدد چرخش، مولکول نیتروژن بیشتری در طول محور محفظه احتراق موجود می‌شود که خود به معنای کاهش میزان تولید اکسیدهای نیتروژن می‌باشد. با مرور نتایج همچنین مشاهده می‌شود با افزایش عدد چرخش، کربن دی اکسید کمتری تولید می‌شود. در انتها و با توجه به کانتورهای دما مشاهده می‌شود که طول شعله با افزایش عدد چرخش، تا حدودی کم می‌شود این خود به معنای پایداری بیشتر شعله خواهد بود. در مجموع، استفاده از چرخاننده در فرآیندهای احتراقی از منظر انتشار آلاینده‌ها بسیار مطلوب می‌باشد.

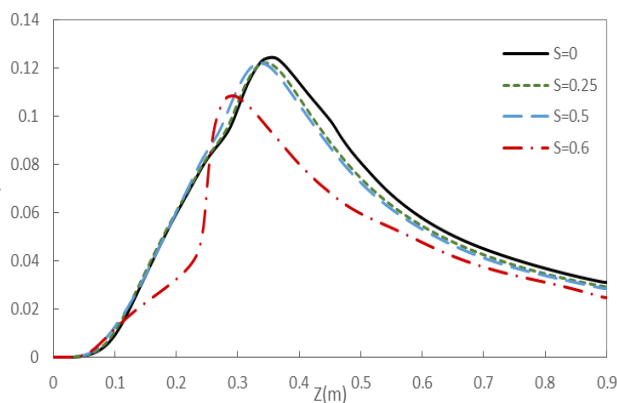
فهرست علائم

T	دما K
S	عدد چرخش
d_h	قطر داخلی m
d	قطر خارجی m
β	زاویه چرخش در چرخاننده rad
Z	محور استوانه m
X	محور x m
U	سرعت m/s
Y	کسر جرمی



شکل ۱۵: نمودار کسر جرمی N_2 در راستای محور محفظه احتراق

با توجه به نمودار شکل ۱۵، با افزایش عدد چرخش، کسر جرمی نیتروژن افزایش یافته است و این خود به معنای کاهش اکسیدهای نیتروژن می‌باشد. البته باید به این نکته توجه داشت که با افزایش عدد چرخش تا ۰/۵، تفاوت مقدار کسر جرمی نیتروژن چشمگیر نمی‌باشد. دمای محفظه احتراق در میزان نیتروژن موجود در محفظه احتراق بسیار تاثیر گذار می‌باشد و هر چه که دما پایین تر باشد، نیتروژن بیشتری در محفظه احتراق وجود خواهد داشت. در شکل ۱۶ نمودار مربوط به کسر جرم کربن دی اکسید در راستای محور محفظه احتراق دیده می‌شود. در بررسی تمامی نمودارها، اعم از نمودارهای کربن دی اکسید و...، توجه به ترکیبات واکنش دهنده‌ها بسیار مهم می‌باشند. همچنین بررسی نمودارهای دما نیز از اهمیت به سزایی برخوردار می‌باشند زیرا هر چه دما بالا تر می‌رود، ترکیبات ناپایدار، بروز و ظهور بیشتری خواهند داشت و به عبارت دیگر، ترکیب‌های پایدار شکسته شده و به ترکیب‌های ناپایدار تبدیل می‌شوند. البته تنها عامل تاثیر گذار، دما نمی‌باشد و باید عوامل دیگر نظیر سینتیک و نسبت هم‌ارزی و... نیز بررسی شوند.



شکل ۱۶: نمودار کسر جرمی CO_2 در راستای محور محفظه احتراق

به دلیل وجود هیدروژن و کربن در سوخت، وجود کربن دی اکسید و بخار آب در محصولات احتراق طبیعی می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد چرخش، کسر جرمی کربن دی اکسید نیز کم می‌شود. لازم به ذکر می‌باشد که هر چه میزان کربن دی اکسید بیشتر باشد، احتراق کامل‌تری خواهیم داشت و دمای ماکزیمم نیز به دمای شعله آدیاباتیک نزدیک‌تر خواهد شد. در نهایت در بررسی نمودارهای سرعت در انتهای محفظه و در

Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, 66, pp. 181-192.

15- D. A. Vilson, and K. M. Lyons, 2007, "Effects of Dilution and Co-Flow on the Stability of Lifted Non-Premixed Biogas-Liked Flames," *Fuel*, 87, pp. 405-413.

16- Buckley, P. L., Craig, R. R., Davis, D. L., and Schartzkopf, K. G., 1983, "The Design and Combustion Performance of Practical Swirlers for Integral Rocket/Ramjet", *AIAA*, 21, NO. 5, pp. 740-743.

17- Barlow R. S., 1996, "Proceedings of the international workshop on measurement and computation of turbulent non premixed flames", Sandia National Labs., Livermore, CA (United States).

18- Mahmoud R., Jangi M., Fiorina B., 2018, "Numerical Investigation of an Oxyfuel Non-Premixed Combustion Using a Hybrid Eulerian Stochastic Field/Flamelet Progress Variable Approach: Effects of H₂/CO₂ Enrichment and Reynolds Number", *Energies* 11(11):22.

1- Shirneshan, A. R., Almassi, M., Ghobadian, B., & Najafi, G. H., 2014, "Investigating the effects of biodiesel from waste cooking oil and engine operating conditions on the diesel engine performance by response surface methodology", *Iranian Journal of Science Technology - Transactions of Mechanical Engineering*, Vol.38, pp:289-301.

2- Shirneshan, A. R., Almassi, M., Ghobadian, B., & Borghei, A. M., 2016, "Response surface methodology (RSM) based optimization of biodiesel-diesel blends and investigation of their effects on diesel engine operating conditions and emission characteristics", *Environ Engineering Manage Journal*, Vol.15, pp:2771-80.

3- Shirneshan, A., Hosseinzadeh Samani, B., & Ghobadian, B., 2016, "Optimization of biodiesel percentage infuel mixture and engine operating conditions for diesel engine performance and emission characteristics by Artificial Bees Colony Algorithm". *Fuel*, Vol.184, pp: 518-26.

4- Gupta, A. K., Lewis, M. J., & Qi, S., 2000, "Swirl effects on combustion characteristics of premixed flames *Journal Engineering Gas Turbines Power*", Vol.123, and pp: 619-26.

5- Khalil, K. H., El-Mahallawy, F. M., & Moneib, H. A., et al, 1977, "Effect of combustion air swirl on the flow pattern in a cylindrical oil fired furnace", *Symposium (Int) Combustion*, Vol.16, pp:135-43.

6- Motamedifar, N., & Shirneshan, A., 2018, "an experimental study of emission characteristics from cylindrical furnace: effects of using diesel-ethanol-biodiesel blends and air swirl", *Fuel*, Vol.221, and pp: 233-9.

7- Zhou, L. X., Chen, L. X., & Zhang, J., 2002, "Studies on the effect of swirl on no formation in methane/air turbulent combustion", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.29, pp: 2235-2242.

8- Syred, N., 2006, "A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems, *Progress Energy Combustion Science*", Vol. 32, pp:93-161.

9- Ishak, M., & Nazari mohd jaafar, M., 2005, "THE EFFECT OF SWIRL NUMBER ON REDUCING EMISSIONS FROM LIQUID FUEL BURNER SYSTEM", *Jurnal Mekanikal*, Vol. 19, pp :48 - 56.

10- Wojciech, j., & Monika, Z., 2016, "Experimental study of impact of swirl number as well as oxygen and carbon dioxide content in natural gas combustion air on flame flashback and blow-off, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*", Vol. 29, pp:46-54.

11- Gupta, A. K., Lilley, D. G., & Syred, N., 1984, "Swirl flows", Abacus Press, Tunbridge Wells, England.

12- Hashemi, S. A., & Hajizade, M., 20016, "Experimental Study of Stability of V-shaped Flame in a Premixed Swirl Burner", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol.48, pp: 315-322.

13- Feikema, D., Chen, R. H., and Driscoll, J. F., 1996, "Enhancement of Blowout Limits by the Use of Swirl," *Combustion and Flame*, 80, pp. 183-195.

14- Yuasa, S., (1986) "Effects of Swirl on Stability of